

S. E. FRISH hám A. V. TIMOREVA

ULIWMA FIZIKA KURSİ

III TOM

**OPTIKA
ATOMLIQ FIZIKA**

Qaraqalpaq tiline rus tilindegi altınshı basılıwınan awdarıldı

RSFSR Joqarı hám orta arnawlı bilim ministrligi tárepinen universitetler ushın oqıw
qollanbası sıpatında qabıl etilgen

Nókis - 2022

MAZMUNÍ

JETINSHI BÓLIM

OPTIKA

XXII bap. Jaqtılıqtıń tiykarǵı qásiyetleri.

§ 250. Kirisiw.

§ 251. Jaqtılıqtıń shaǵılısıw hám sınıw nızamları.

§ 252. Tolıq ishki shaǵılısıw.

§ 253. Ferma principi.

§ 254. Jaqtılıqtıń tezligin ólshew.

§ 255. Jaqtılıqtıń tolqınlıq teoriyası. Gyuygens principi.

§ 256. Jaqtılıqtıń interferenciyası.

§ 257. Turgın tolqınlardıń payda bolıwı.

§ 258. Jaqtılıqtıń polarizaciyası.

§ 259. Jaqtılıqtıń elektromagnitlik teoriyası.

§ 260. Jaqtılıq aǵısınıń energiyası menen qozǵalıw muǵdarı.

XXIII bap. Jaqtılıqtıń interferenciyası menen difrakciyası.

§ 261. Jaqtılıqtıń interferenciyasını baqlaw usılları.

§ 262. Móldir plastinada shaǵılısqandaǵı interferenciya.

§ 263. Interferenciya qubılısınıń qollanılawı.

§ 264. Interferometrler hám olardıń qollanılawı.

§ 265. Interferenciyalıq metrologiya.

§ 266. Gyuygens-Frenel principi.

§ 267. Amplitudalardı grafikalıq qosıw.

§ 268. Móldir emes tosqınlıqlardaǵı difrakciya.

§ 269. Parallel nurlardaǵı difrakciya.

§ 270. Kóp sańlaqlardaǵı difrakciya. Difrakciyalıq pánjere.

§ 271. Difrakciyalıq pánjereniń dispersiyası menen ajırata alıwshılıq kúshi.

§ 272. Joqarı ajırata alıw kúshine iye spektroskopiya.

§ 273. Kóp ólsheмли pánjeredegi difrakciya.

§ 274. Rentgen nurlarınıń spektroskopiyası menen rentgenstrukturalıq analiz.

XXIV bap. Jaqtılıqtıń izotrop zatlardan hám olardıń shegarasınan ótiwi.

§ 275. Jaqtılıqtıń zatlar menen tásirlesiwı.

§ 276. Jaqtılıqtıń jutılıwı.

§ 277. Eki móldir zattıń shegarası arqalı jaqtılıqtıń ótiwi.

§ 278. Metallardaǵı jaqtılıqtıń shaǵılısıwı.

§ 279. Jaqtılıqtıń dispersiyası.

§ 280. Dispersiyanı baqlaw.

§ 281. Prizmalıq spektrallıq ásbaplar.

§ 282. Jaqtılıqtıń gruppalıq tezligi.

§ 283. Jaqtılıqtıń optikalıq jaqtan bir tekli emes zattaǵı tarqalıwı.

§ 284. Gúńgirt zat arqalı jaqtılıqtıń ótiwi.

XXV bap. Jaqtılıqtıń anizotrop zatlar arqalı ótiwi.

§ 285. Jaqtılıqtıń anizotrop zattan ótiwi.

§ 286. Bir kósherli kristaldaǵı tolqınlıq betler.

§ 287. Bir kósherli kristallardaǵı ádettegidey hám ádettegidey emes nurlardı tabıw.

§ 288. Normallardıń beti.

§ 289. Eki kósherli kristallar.

§ 290. Polyarizatsiyalıq ásbaplar.

§ 291. Polyarizatsiyalanğan nurlardıń interferentsiyası. Ellips tárizli hám dóńgelek polyarizatsiya.

§ 292. Nikollardıń arasındagı kristallıq plastinka.

§ 293. Jasalma qos nur sıdırıw.

§ 294. Elektr maydanındagı qos nur sıdırıw.

§ 295. Polyarizatsiya tegisliginiń aylanıwı.

§ 296. Polyarizatsiya tegisliginiń magnitlik aylanıwı.

XXVI bap. Qozǵalıwshı denelerdegi jaqtılıqtıń tarqalıwı.

§ 297. Qozǵalıwshı deneler menen ótkerilgen tájiriybeler.

§ 298. Salıstırmalıq teoriiyası.

§ 299. Salıstırmalıq teoriiyasınıń túrlendiriwlerinen kelip shıǵatuǵın nátiyjeler.

§ 300. Qozǵalıwshı deneler optikası hám salıstırmalıq teoriiyası.

§ 301. Salıstırmalıq teoriiyasınıń mexanikası.

XXVII bap. Jaqtılıq dástesi hám nurlanıwdıń termodinamikası.

§ 302. Kóriniw funktsiyası. Jaqtılıq aǵısı.

§ 303. Jaqtılıqtıń kúshi, jarqınlıq hám jaqtılandırılǵanlıq.

§ 304. Jarıqlıq.

§ 305. Fotometrlik shamalardı ólshew birlikleri.

§ 306. Jaqtılıqtı qabıllaw.

§ 307. Fotometrlik shamalardı ólshew.

§ 308. Temperaturalıq nurlanıw.

§ 309. Absolyut qara dene.

§ 310. Absolyut qara deneniń nurlanıw nızamları.

§ 311. Absolyut qara deneniń jarqınlıǵınıń tolqın uzınlıqları boyınsha tarqalıwı.

§ 312. Jaqtılıqtıń derekleri.

§ 313. Optikalıq pirometriya.

XXVIII bap. Ámeliy nurlıq optika.

§ 314. Kirisiw.

§ 315. Tegis bettiń qasındaǵı shaǵılısw hám sınıw.

§ 316. Bir sferalıq bettegi sınıw.

§ 317. Bir sıdırıwshı sferalıq bet tárepinen beriletuǵın úlkeytiw.

§ 318. Juqa linzalar.

§ 319. Oraylastırılǵan betlerdiń sisteması.

§ 320. Sistemaniń bas fokuslarınıń hám bas tegislikleriniń ornı.

§ 321. Teleskoplıq sistema.

§ 322. Optikalıq sistemalardıń qátelikleri hám olardı saplastırıw usılları.

§ 323. Xromat aberratsiya.

§ 324. Optikalıq sistema arqalı ótetuǵın jaqtılıq dástesi.

§ 325. Kiriw hám shıǵıw qarashıqları.

§ 326. Kózdıń optikalıq sisteması.

§ 327. Subektivlik jarıqlıq.

§ 328. Vizualıq optikalıq ásbaplar.

§ 329. Proektsionalwshı hám jaqtılandırıwshı ásbaplar.

§ 330. Optikalıq ásbaplardıń ajırata alıwshılıq kúshi.

§ 331. Mikroskoptaǵı difraktsiyalıq qubılıslar.

XXIX bap. Fotonlar.

§ 332. Elektronniń nurlanıwınıń klassikalıq teoriiyası hám onı qollanıw shegaraları.

- § 333. Fotoeffekt.
- § 334. Eynshteyn formulasi hám onı eksperimentte tekseriw.
- § 335. Jaqtılıqtıń korpuskulalıq qásiyetleri.
- § 336. Fotoeffektıń ámeldegi qollanılawı.
- § 337. Rentgen nurlarınıń shashırawı.
- § 338. Fotoximiya.

SEGIZINSHI BÓLIM. ATOMLIQ FIZIKA

XXX bap. Atomlar menen molekulalardıń qurılısı.

- § 339. Kirisiw.
- § 340. Atomnıń yadrolıq modeli.
- § 341. Atomlıq spektrlerdegi nızamlıqlar.
- § 342. Spektrallıq termlerdiń tábiyatı.
- § 343. Vodorodtıń hám oǵan usaǵan atomlardıń qurılısı.
- § 344. Ellips tárizli orbitalar.
- § 345. Keńisliktegi kvantlanıw; atomlardıń magnit momentleri.
- § 446. Sırtqı elektr hám magnit maydanlarınń spektrge tási.
- § 347. Siltili metallardıń spektrleri.
- § 348. Bor teoriyasınıń qıyınshılıqları; elektronnıń spini haqqındaǵı gipoteza.
- § 349. Atomnıń vektorlıq modeli.
- § 350. Mendeleevtıń dáwirlik sisteması.
- § 351. Elektronlıq qabıqlardı toltırıw.
- § 352. Rentgen spektrleri.
- § 353. Spektrallıq sıızılardıń intensivlikleri. Ótiwlerdiń itimallıqları.
- § 354. Molekulalardıń qurılısı.
- § 355. Molekulalardıń terbeliw spektrleri.
- § 356. Molekulalardıń aylanıw spektrleri.
- § 357. Eki atomlıq molekulalardaǵı elektronlıq hallar.
- § 358. Molekulalardıń dissociaciyası.
- § 359. Izotopıyanıń molekulalıq spektrlerge tási.
- § 360. Jaqtılıqtıń kombinaciyalıq shashırawı.
- § 361. Suyıq hám qattı denelerdiń lyuminescenciyası.

XXXI bap. Kvantlıq mexanika.

- § 362. Elementar bólekshelerdiń tolqınlıq qásiyetleri.
 - § 363. Shredinger teńlemesi.
 - § 364. Klassikalıq teoriyanıń paydalanılıw shegarası.
 - § 365. Potencial qutıdaǵı bóleksheler. Potencial barer arqalı ótiw.
 - § 366. Kvantlıq mexanikanıń kóz-qarasları boyınsha vodorod atomı.
 - § 367. Klassikalıq hám kvantlıq statistikalar.
- XXXII bap. Yadrolardıń tábiyiy hám jasalma aylanısları.
- § 368. Atom yadrosı hám onıń xarakteristikası.
 - § 369. Tábiyiy radioaktivlik.
 - § 370. Awısıw qaǵıydası.
 - § 371. Radioaktiv qubılıslardı baqlaw usılları.
 - § 372. Alfa-ıdıraw.
 - § 373. γ -nurlarınıń spektrleri hám ishki konversiya.
 - § 374. Beta-ıdıraw.
 - § 375. α -bóleksheleriniń urılıwınıń saldarınan yadrolardıń bóliniwi.
 - § 376. Neytronlar.

§ 377. Jasalma radioaktivlik. Pozitronlar.

§ 378. Jasalma túrde tezletilgen bólekshelerdiń tásirinde júretuǵın yadrolıq aylanıslar.

§ 379. Yadrolıq momentler.

§ 380. Atom yadrolarınıń qurılısı.

§ 381. Yadrolardıń bóliniwi. Shinjırlı reakciyanıń alınıwı.

§ 382. Yadrolıq energetika.

§ 383. Kosmoslıq nurlar.

§ 384. Mezonlar. Kosmoslıq nurlardıń kelip shıǵıwı.

Qosımsha

JETINSHI BÓLIM

OPTIKA

XXII BAP

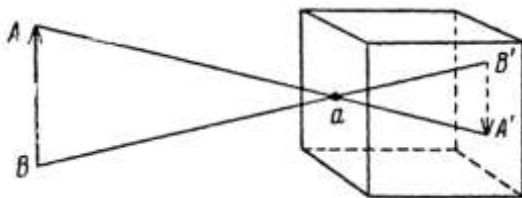
JAQTILIQTÍŇ TIYKARGÍ QÁSIYETLERI

§ 250. Kirisiw. Optika yamasa jaqtılıq haqqındaǵı tálimat eń dáslep adam ne sebepli qorshap turǵan predmetlerdi kóredi degen sorawǵa juwap beriwge tırıswlardıń nátiyjesinde payda boldı. Bazı bir áyyemgi filosoflar kóz benen kóriwdi qol menen uslap kóriwde alınatuǵın sezimge uqsas dep boljadı. Bul filosoflardıń pikiri boyınsha adamnıń kózinen qaraytuǵın predmetke qaray barıp qarmalastırıp kóretuǵın bir nárise tarqaladı. Shaması, usınday kóz-qaras qálegen nadan sana ushın tán bolsa kerek. Bunday pikirdiń bar bolıwına "názer menen qarmalap kóriw", "kóz jiberiw menen sińiw" h.t.b.sózler tiykar bola aladı. Biraq, sol áyyemgi Greciyada jaqtılıq denelerden shıǵadı degen pikirler de ayılǵan. Bazı bir deneler belgili bolǵan sharayatlarda jaqtılıqtıń deregi bolıp tabıladı, sol jaqtınıń biziń kózimizge túsip kóriw sezimin payda etedi. Basqa deneler bolsa jaqtılıqtı jutiwdıń yamasa onıń tarqalıw baǵıtın ózgeritiwdiń saldarınan kózge kórinedi (shaǵılistıradı, shashıratadı). Solay etip, "jaqtılıq" kózge tásir etip, subektivlik kóriw sezimin payda etetuǵın bizden sırtta bolǵan obektiv qubılıs bolıp tabıladı. Keyin fizika bul túsinikti ulıwmalastırdı hám "jaqtılıq" haqqında gáp etkende adamda kóriw sezimin payda ete me, payda etpey me, onnan gárezsiz qısqa elektromagnit toqınlardıń tarqalıwına alıp kelinetuǵın óziniń tábiyatı boyınsha birden-bir bolǵan obektiv qubılıslardıń keń jıynaǵına ayta basladı. Biziń kursımızda "jaqtılıq" sózin usınday mániste paydalanamız.

Áyyemgi Greciyada jaqtılıqtıń tiykarǵı qásiyeti sıpatında onıń bir tekli zattaǵı tuwrı sızıqlı tarqalıwı atap ótildi. Jaqtılıqtıń tuwrı sızıqlı tarqalıwı jaqtılıqtıń kishi deregi bolǵanda móldir emes predmetlerdiń keskin sayanı beretuǵınlıǵınan kelip shıǵadı. Ekrandaǵı sayanıń forması jaqtılıqtıń deregi jaylasqan orındaǵı proekciyalaw noqatınan shıǵatuǵın dásteniń járdeminde alınǵan geometriyalıq proekciyaǵa sáykes keledi. Bunday jaǵdayda geometriyalıq tuwrını fizikalıq jaqtan kúshli kerilgen sabaqtıń járdeminde qaytadan tikleniwı múmkin. Sabaqlardıń paydalanılıwı múmkin bolmaǵan úlken qashıqlılarda tallawlardıń keri barısı qollanıladı: tuwrı sızıqtı bir tekli ortalıqtaǵı jaqtılıqtıń tarqalıw baǵıtına teń dep esaplaydı. Solay etip, geometriyalıq tuwrını fizikalıq jaqtan kórsetiw menen jaqtılıqtıń tuwrı sızıqlı tarqalıwı bir biri menen tıǵız baylanısqan.

Jaqtılıqtıń tuwrı sızıqlı tarqalıwın kórsetetuǵın basqa fakt kishi tesiktiń járdeminde predmetlerdiń súwretin alıwdıń múmkinshiligi bolıp tabıladı. Bunday súwret XVI ásirde birinshi ret táriyiplengen "kamera-obskura" nıń járdeminde baqlanadı. Kamera-obskura qutı bolıp, onıń diywallarınıń birinde kishi α tesigi islengen (1-súwret). Predmettiń A noqatınan shıqqan jaqtılıq nurı, tuwrı sızıqlı tarqalıp, kamera-obskuranıń artqı diywalındaǵı A' noqatında kishkene jaqtılı daqtı payda etedi. AB obektiniń hár qıylı orınlarınan shıqqan nurlardan payda bolǵan jaqtı daqlardıń jıynaǵı onıń tónkerilgen $A'B'$ súwretin payda etedi.

Jaqtılıqtıń atap ótiliwı zárúr bolǵan kelesi qásiyeti jaqtılıq nurlarınıń bir biri menen kesiliskende bir birine tásir etpewinen ibarat. Ádettegi sharayatlarda hár qıylı obektlerden shıǵatuǵın nurlar kóp ret kesilisedi. Bul kesilisiwler nurlardıń hár birine basqa nurlardan gárezsiz tarqalıwǵa kesent jasamaydı. Baqlawshınıń bir tárepinde jaylasqan obektlerden shıqqan nurlar aldında turǵan obektlerden shıqqan nurlardı kesedi. Biraq, bul jaǵday biziń aldımızda turǵan predmetlerdi anıq kóriwge hesh qanday kesent bermeydi.



1-súwret.
Kamera-obskurada súwretti alıw.

XIX ásirdeń basına shekem optikanıń rawajlanıwı nurlardıń tuwrı sızıqlı tarqalıwınıń tiykarında rawajlandı. Biraq, XVII ásirden baslap jaqtılıqtıń haqıyqatında tuwrı sızıq boyınsha tarqalmaytuǵınlıǵın kórsetetuǵın faktler belgili bola basladı. Mısalı, eger kamera-obskuradaǵı a tesigin júdá kishi etip islegende alınatuǵın súwrettiń jaylatuǵınlıǵı belgili boldı. Eger tesik kishi bolǵan jaǵdayda usınday tesik arqalı ótkende nurlardı sezilerliktey iymeyedi dep esaplasa, onda bunday jayıldıw túsindiriwge boladı. Sonıń menen birge jaqtılıqtı móldir bolmaǵan denedegi júdá ensiz bolǵan sańlaq arqalı ótkergende ekranniń arǵı tárepinde gezeklesip jaylasatuǵın jaqtılı hám qarańǵı jolaqlardıń payda bolatuǵınlıǵı da belgili boldı. Jaqtılıqtıń kishi dereginıń járdeminde alınǵan sayanıń shegarasında da jaqtılı hám qarańǵı jolaqlardıń payda bolatuǵınlıǵın baqlawǵa boladı. Jaqtılıqtıń interferenciyası hám difrakciyası dep atalatuǵın bul qubılıslar házirgi waqıtları jaqsı úyrenilgen. Eger jaqtılıqtıń deregi menen saya baqlanatuǵın ekran obektten ádewir qashıqlatılǵan bolsa sayanıń shegarasındaǵı jolaqlar keńirek boladı. 1-súwrette (qosımshadaǵı) V.K.Arkadev tárepinen túsirilgen dóńgelek diskti uslap turǵan adamnıń qolınıń fotosúwreti kórsetilgen. 1-a súwrette noqatlıq derek penen ekran bir birinen 2 m ge qashıqlatılǵan, al 1-b súwrette bolsa derek penen ekran 16 km ge qashıqlatılǵan jaǵday kórsetilgen. Kórinip turǵanıday, sońǵı jaǵdayda saya obektin geometriyalıq proekciyasına sáykes kelmeydi; disktiń orayındaǵı jaqtılı daqtıń bar ekenligine itibar beriw kerek. Bul fotografiyalar jaqtılıqtıń tuwrı sızıqlı tarqalıwın sezilerliktey awıttıqlardıń bar ekenligin ayqın kórsetedi. Biraq, kóp sanlı jaǵdaylarda jaqtılıqtı tuwrı sızıqlı tarqaladı dep esaplawǵa boladı.

Jaqtılıqtıń tuwrı sızıqlı tarqalıwı jaqtılıqtı derekten bóleksheler túrinde shıǵıp, bir tekli zatta tuwrı sızıqlı hám teń ólshewli qozǵalatuǵın bólekshelerdin aǵısı degen oyǵa alıp keldi. Biraq, bul gipotezani jaqtılıqtıń tosqınlıqlardı aylanıp ótiw faktı hám jaqtılıq nurlarınıń bir birine tásir etpewi qásiyeti menen sáykes keltiriw qıyın boldı. XVII ásirdeń aqırında Gyuygens bılay jazdı: "Eger biz nurlardıń biriniń izinen biri ótip, bir birine kesent bermeytuǵınlıǵın qabil etetuǵın bolsaq ..., jaqtılıq shıǵarıp turǵan deneni kórgenimizde onnan shıǵatuǵın jaqtılıqtıń hawanı kesip ótetuǵın oq jaydıń oǵı sıyaqlı materiyanıń alıp júrilmeytuǵınlıǵın kóriwge boladı". Jaqtılıq bóleksheleri gipotezasınan bas tartıp, Gyuygens jaqtılıqtı baqlaw múmkin bolǵan keńislikti toltırıp turǵan serpimli ortalıq bolǵan efirdegi tarqalatuǵın tolqın dep esapladı. Solay etip, XVII ásirdeń aqırında jaqtılıqtıń eki teoriiyası payda boldı. Olardıń biri *aǵıw teoriiyası* yamasa *korpuskulalıq teoriya* atamasına iye boldı hám ol jaqtılıqtı tuwrı sızıq boyınsha tarqalatuǵın bólekshelerdin aǵısı dep esapladı. Ekinshi teoriya jaqtılıqtı *efirde* - gipotezalıq *serpimli ortalıqta tarqalatuǵın* tolqın dep qaradı.

Nyutonda korpuskulalıq teoriyanıń dóretiwshisi hám qorǵawshısı dep esaplaw qabil etilgen. Biraq, ol óziniń birinshi ret 1704-jılı jarıq kórgen dańqlı "Optika" kitabında korpuskulalıq kóz-qarastan da, tolqınlıq kóz-qarastan da paydalandı. Korpuskulalıq teoriyanıń paydasına Nyuton jaqtılıqtıń tuwrı sızıqlı tarqalıwın jatqardı. Biraq, usınıń menen birge ol sayanıń shegarasındaǵı jaqtılı hám qarańǵı jolaqlardıń payda bolıwın túsindiriwde korpuskulalıq teoriyanıń qıyınshılıqqa ushıraytuǵınlıǵın kóre bildi. Nyuton nurlardı "jeńil shaǵılısıw qásiyetine de, jeńil ótiw qásiyetine de iye" dep boljawǵa tuwrı keldi. Ol eki teoriyanı korpuskulalıq teoriya menen tolqınlıq teoriyanı birlestiriwge tırıstı. Ol bılay jazdı "Jaqtılıq qanday bir móldir denede sındanda hám onıń betinen shaǵılısqanda, ... usınıń saldarınan tolqın yamasa terbelis túrinde qozadı...".

Korpuskulalıq teoriyanıń qarsılası Gyuygens boldı. 1690-jılı jarıq kórgen óziniń "Jaqtılıq haqqındaǵı traktat" kitabında ol jaqtılıqtı "ses tárizli sferalıq betler boyınsha tolqın túrinde tarqaladı; tas taslangan suwdıń betinde payda bolatuǵın tolqınlarǵa sáykes, men olardı tolqınlar dep atayman".

M.V.Lomonosov jaqtılıqtıń tolqınlıq teoriyasınıń tárepdarı boldı. Ol jaqtılıq penen baylanıslı bolǵan terbelmeli qozǵalıstı zattıń bóleksheleriniń qozǵalıstı menen baylanıstırdı. 1753-jılı Lomonosov Ilimler Akademiyasına boslıqtaǵı tardıń terbelislerin úyreniw boyınsha tájiriybelerdi ótkermekshi hám bul tájiriybelerde tardıń tebelmeli qozǵalıstıların jaqtılıqtıń nurlanıwına alıp keletuǵınlıǵın biliwge tırısatuǵınlıǵın xabarladı¹. Bir qansha waqıttan keyin bunday tájiriybeler haqıyqatında da ótkerilgen. Ótkerilgen tájiriybeler kútilgen nátiyjelerdi bermegen bolsa da, olar tariyxıy jaqtan úlken áhmiyetke iye. Sebebi Lomonosovtıń jumısları jaqtılıqtıń tolqın ekenligin dálillewge qaratılǵan birinshi tırısw edi. 1756-jılı Ilimler Akademiyasınıń saltanatlı jıynalıstında M.V.Lomonosov "Jaqtılıqtıń payda bolıwı, reńlerdiń payda bolıwı haqqında sóz" sóyledi. Korpuskulalıq teoriyanı áshkaralap (Lomonosovtıń sózi boyınsha efirdiń bóleksheleriniń "aǵıwshı" qozǵalıstı), ol mınanı ayttı: "Efir aǵıw túrindegi qozǵalısqı qatnasa almaytuǵın, al jıllılıq bolsa efirdiń jaqtılıq penen baylanıssız bolǵan qozǵalıstı bolǵanlıqtan jaqtılıqqa sebep bola alatuǵın efirdiń úshinshi turaqlı bolmaǵan qozǵalıstı ǵana qaladı"

Gyuygens penen Lomonosovtıń teoriyaları jaqtılıqtıń tolqınlıq tábiyatın durıs tapqan bolsa da, olar tolqınlıq processtıń jetkilikli ayqın túrdegi tiykarǵı xarakteristikasına iye emes edi. Bul tiykarǵı xarakteristika onıń keńisliklik hám waqıt boyınsha dáwirliǵi hám onnan kelip shıǵatuǵın jaqtılıqtıń interferenciyası menen difrakciyası qubılısların túsindire alıw múmkinshiligi bolıp tabıladı. Gyuygens hátte jaqtılıq tolqınlarınıń dáwirli ekenligin biykarladı da hám "tolqınlardı birininen soń biri birdey qashıqlıqlarda júredi dep qarawdıń keregi joq" dep jazdı. Tarqalıwshı terbelisler ushın tán bolǵan jaqtılıqtıń keńisliklik-waqıtlıq dáwirliǵi birinshi ret ayqın túrde Peterburg Ilimler Akademiyasınıń akademigi L. Eyler tárepinen ayıldı. Biraq, interferenciya hám difrakciya qubılısların tolqınlıq kóz-qaraslar tiykarında túsindiriw tek XIX ásirdiń basında YUng penen Freneldiń jumıslarında ámelge asırıldı. Jaqtılıqtıń tolqın uzınlıǵı júdá kishi bolǵan tolqın ekenligi kórsetildi: kózge kórinetuǵın jaqtılıq, yaǵnıy adamnıń kózine tásir etetuǵın jaqtılıqtıń tolqın uzınlıǵı santimetrdiń júz mırnan bir bólegi bolıp tabılatuǵın 0,76 mkm dan 0,4 mkm ǵa shekemgi (reńge baylanıslı) tolqın ekenligi kórsetildi. Tolqın uzınlıǵınıń usınday júdá kishi ekenligine baylanıslı ádettegi jaǵdaylarda jaqtılıqtıń tosqınlıqlardı aylanıp ótiwi dım kishi boladı, al bul jaǵday jaqtılıqtıń tuwrı sızıq boyınsha tarqalatuǵınday bolıp tarqalatuǵınlıǵın támiyinleydi (266-paragrafqa qarańız).

XIX ásirdiń birinshi yarımındaǵı jaqtılıqtıń tolqınlıq teoriyası jaqtılıqtı dúnyalıq efir dep atalatuǵın gipotezalıq serpimli ortalıqtaǵı mexanikalıq terbelislerdiń tarqalıwı túrinde túsindiredi. Elektromagnit tolqınları ashılǵannan keyin (II tom, 246-paragraf) jaqtılıq tolqınlarınıń kishi tolqın uzınlıǵına iye elektromagnit tolqınları ekenligin kórsetiwdiń sáti tústi. Solay etip, XIX ásirdiń aqırındaǵı hám XX ásirdiń basındaǵı barlıq fizikanıń rawajlanıwında úlken áhmiyetke iye bolǵan *jaqtılıqtıń elektromagnitlik teoriyası* payda boldı. Jaqtılıqtıń elektromagnitlik teoriyası jaqtılıq hám elektromagnit qubılıslardıń birligin kórsetti hám usınıń menen birge tábiyattıń barlıq qubılıslarınıń arasındaǵı tereń óz-ara baylanıstıń bar ekenligin dálilledi.

Biziń kursımızdıń bunnan keyingi paragraflarında biz dáslep tuwrı sızıqlı tarqalıw kóz-qarası boyınsha jaqtılıqtıń tiykarǵı qásiyetlerin tallaymız, al bunnan keyin jaqtılıqtıń tolqınlıq qásiyetke iye ekenligin hám jaqtılıq tolqınlarınıń elektromagnitlik tábiyatqa iye ekenligin kórsetetuǵın faktlerdi kórsetemiz.

¹ Biz M.V.Lomonosovtıń miynetlerinen keltirilgen eski rus tilinde jazılǵan úzindilerdi ádebiy qaraqalpaq tilinde bayanlaymız (Awdarıwshılar).

Jaqtılıq haqqındağı tálimattıń rawajlanıwına rus hám sovet fizikleri úlken úles qostı. XIX ásirdeń basında V. V. Petrov ózine shekem izertlegen adamlarǵa salıstırǵanda qattı hám suyıq denelerdeń lyuminescenciyasın tolıǵıraq úyrendi (361-paragraf). 1888-jılı A. G. Stoletov ózi "aktinli-elektrik" qubılıs dep ataǵan qubılıstı ashtı. Házirgi waqıtları fotoelektrik qubılıs dep atalatuǵın bul qubılıs jaqtılıqtıń tásirinde denelerden elektronlardı julıp alıw qubılısı bolıp tabıladı; bul qubılıstıń ashılıwı jaqtılıqtıń tábiyatı haqqındağı biziń bilimlerimizdeń rawajlanıwında úlken orındı iyeledi. XIX ásirdeń aqırında B. B. Golitsin menen V. A. Mixelson nurlanıw termodinamikasına úlken úles qostı, optikanıń bul bólimi jaqtılıq qubılısların termodinamikalıq kóz-qarastan qaraydı. A. A. Belopolskiy hám B. B. Golitsin birinshi bolıp tolqın uzınlıǵınıń derektiń tezliginen ǵárezli ekenligin taptı (Doppler qubılısı, I tomdağı 113-paragrafqa qarańız). 1901-jılı P.N. Lebedev óziniń ájayıp, júdá názik tájiriybelerinde jaqtılıqtıń elektromagnitlik teoriyası tárepinen bolǵan basımınıń bar ekenligin dálilledi. 1910-1912 jılları D. S. Rojdestvenskiy házirgi waqıtları klassikalıq bolıp tabılatuǵın jaqtılıqtıń anomallıq dispersiya qubılısın izertledi.

XIX hám XX ásirlerdeń arasında ótkerilgen izertlewler tolqın uzınlıǵınıń ózgeriwi menen jaqtılıqtıń qásiyetlerinde sapalıq ózgerislerdeń bolatuǵınlıǵın kórsetti. A.G. Stoletov tárepinen ashılǵan fotoeffektte izertlew kishi tolqın uzınlıqlarındağı nurlardıń (kózge kórinetuǵın jaqtılıq nurları menen onnan da qısqa bolǵan nurlardıń) klassikalıq tolqınlıq kóz-qaraslarǵa sáykes kelmeytuǵın qásiyetlerdi kórsetetuǵınlıǵın kórsetti. 334-paragrafta biz bir qatar faktlerdeń jaqtılıqtıń ayırım porciyalar túrinde nurlanatuǵınlıǵın hám jutılatuǵınlıǵın kórsetti. Bul porciyalardıń shaması jaqtılıq terbelisleriniń jiyiligine ǵárezli bolıp shıqtı. *Jaqtılıq aǵısı úzlikli strukturaǵa iye boladı eken.* Bul jaǵday qaytadan *fotonlar* dep atalatuǵın jaqtılıq bóleksheleri kóz-qaraslarına alıp keldi. Hár bir foton belgili energiyaǵa hám qozǵalısqı muǵdarına iye. Fotonnıń energiyası $h\nu$ ge teń. Bul jerde ν - jaqtılıqtıń jiyiligi, h arqalı san mánisi $6,624 \cdot 10^{-27}$ erg·sek bolǵan turaqlı shama (Plank turaqlısı dep ataladı) belgilengen. Bunnan jiyilik qanshama kóp bolsa, fotonnıń energiyasınıń da sonshama úlken bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Kishi jiyiliklerdegi nurlanıw ushın (kórinbeytuǵın infraqızıl nurlar) fotonlardıń energiyaları sonshama kishi, sonlıqtan bunday nurlardıń úzlikli strukturasın tabıw qıyın boladı; ámeliy jaqtan olar tek tolqınlıq qásiyetlerge iye boladı. Kózge kórinetuǵın jaqtılıq ushın fotonlardıń energiyası úlken hám kórinetuǵın jaqtılıq nurları bir waqıtta korpuskulalıq qásiyetke de, tolqınlıq qásiyetke de iye. Júdá kishi tolqın uzınlıǵına iye nurlar ushın (rentgen nurları hám radioaktiv elementler tárepinen nurlandırılatuǵın nurlar) fotonlardıń energiyaları salıstırmaı úlken hám, sonlıqtan, olardıń korpuskulalıq qásiyetleri ańsat baqlanadı.

Jaqtılıq bir waqıtta korpuskulalıq qásiyetke de, tolqınlıq qásiyetke de iye. Fizikanıń bunnan bılay rawajlanıwı bunday ekileniwdeń, yaǵnıy korpuskulalıq hám tolqınlıq qásiyetlerge iye bolıwdeń tek jaqtılıqqa ǵana tán emes, al basqa qálegen elementar "bólekshelerdeń" aǵısı - ayırım atomlarǵa, elektronlarǵa da h.t.b. ushın da tán ekenligi belgili boldı. Mexanikalıq kóz-qaraslar menen shekleniwge tırısatuǵın ilim ushın bunday ekileniw túsinikli emes. Kóp sanlı burjuaziya fizikleri ushın bunday ekileniw materialistik kóz-qaraslardan bas tartıwǵa, "jaqtılıq" penen "materiya" túsiniklerin bir birine qarama-qarsı qoyıwǵa, sebeplilik principinen h.t.b. bas tartıwǵa alıp keldi ...

A. F. Ioffe N. I. Dobronravov penen birlikte elementar fotoeffekt boyınsha bir qatar tájiriybelerdi qoydı, bul tájiriybeler jaqtılıq energiyasınıń porciyalar túrinde jutılatuǵınlıǵın hám hár bir porciyanıń Plank turaqlısı h penen jaqtılıqtıń jiyiligi ν deń kóbeymesine teń ekenligin kórsetti.

S. I. Vavilov jaqtılıq aǵıslarınıń olardıń úzlikli strukturası menen baylanıslı bolǵan fluktuaciyların vizuallıq baqlawǵa múmkinshilik beretuǵın usıldı islep shıqtı.

D. S. Rojdestvenskiy óziniń anomallıq dispersiya hám atomlardıń teoriyası boyınsha jumısları menen spektrler haqqındağı tálimattıń rawajlanıwına úlken úles qostı.

Moskvalı fizikler L. I. Mandelshtam menen G. S. Landsberg kombinaciyalıq shashıraw dep atalatuǵın jaqtılıqtırnı shashırawınıń jańa túrin ashtı; bul qubılıs jaqtılıq penen zatlardırnı óz-ara tásir etisiw processlerdin túsiniwde úlken áhmiyetke iye...

§ 251. Jaqtılıqtırnı shıǵılısıwı menen sınıw nızamları. Optikalıq qubılıslardıń eń birinshi nızamları jaqtılıq nurlarınıń tuwrı sızılıq tarqalatuǵınlıǵı haqqındaǵı kóz-qaraslardırnı tiykarında tabıldı. Olar shaǵılısqanda jaqtılıqtırnı tarqalıw baǵıtınıń ózgeriwine hám jaqtılıqtırnı bir móldir ortalıqtan ekinshisine ótiwindegi tarqalıwına tiyisli.

Jaqtılıqtırnı tarqalıw baǵıtınıń ózgerisi jaqtılıq eki móldir zattırnı aralıǵındaǵı tegis shegara arqalı ótkende, misalı hawa menen shiysheniń yamasa shiyshe menen suwdırnı h.t.b. arasındaǵı shegara arqalı ótkende baqlanadı. Bunday jaǵdayda túsetuǵın AB nurı eki nurǵa ajıraladı: shaǵılısqan BC hám sınǵan BD nurına ajıraladı.

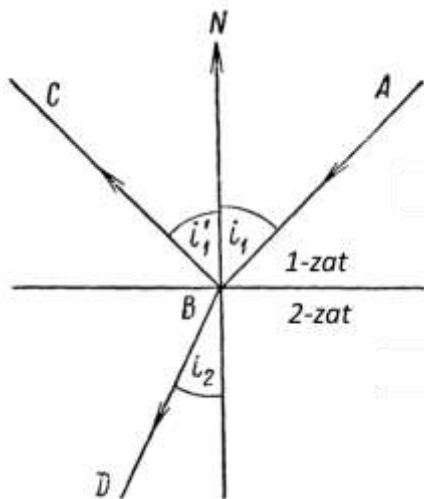
Shaǵılısqan nurdıń baǵıtın anıqlaytuǵın nızam Evklidtiń zamanında belgili edi (biziń eramızdan burınǵı III ásir). *BC shaǵılısqan nurı túsiwshi AB nurı hám túsiw noqatındaǵı betke normal BN menen bir tegisliktiń betinde jaylasadı.* Bunday jaǵdayda shaǵılısqan nur normaldıń ekinshi tárepinde jaylasadı; shaǵılısıw múyeshi i_1' túsiw múyeshi i_1 ge teń:

$$i_1' = i_1. \quad (1)$$

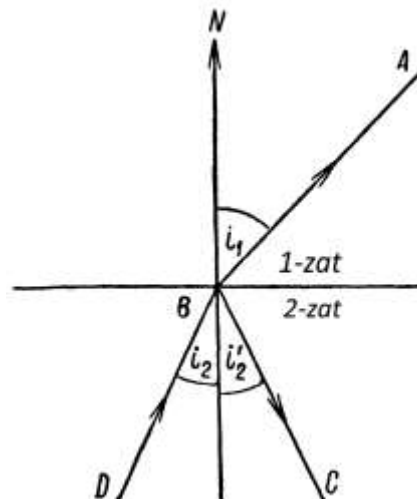
Al sınıw nızamına kelsek, onda onıń dál anıqlaması ádewir keyinirek, atap aytqanda XVII ásirdeń basında berildi. Sınıw nızamı boyınsha BD sınıw nurı (2-súwret) túsiwshi AB nurı, túsiw noqatında betke túsilgen BN normalı menen bir tegislikte jatadı; túsiw múyeshi i_1 diń sinusınıń sınıw múyeshi i_2 niń sinusına qatnası zattırnı berilgen jubı ushın turaqlı shama bolıp tabıladı:

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = n_{21}. \quad (2)$$

n_{21} shaması ekinshi zattırnı birinshi zatqa salıstırǵandaǵı salıstırmalı sınıw kórsetkishi dep ataladı.



2-súwret. Eki móldir zattırnı arasındaǵı shegaradaǵı jaqtılıqtırnı shaǵılısıwı menen sınıwı.



3-súwret. Eki móldir zattırnı arasındaǵı shegaradaǵı jaqtılıqtırnı shaǵılısıwı menen sınıwı.

Tájiriybeler jaqtılıq ekinshi zattan shegaralawshı betke i_2 múyeshi menen túsetuǵın bolsa, onda ekinshi zattan birinshi zatqa ótkende

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = n_{21}$$

qatnasına sáykes i_1 múyeshi menen sinatuǵınlıǵın kórsetedi (3-súwret). Biraq, ekinshi tárepten

$$\frac{\sin i_2}{\sin i_1} = n_{12} \quad (2a)$$

teńligi orınlanadı dep boljawǵa boladı. Bul teńlikte n_{12} arqalı birinshi zattıń ekinshi zatqa salıstırǵandaǵı salıstırmalı sınıw kórsetkishi bolıp tabıladı. (2)- hám (2a) formulaların salıstırıp, n_{12} hám n_{21} koefficientleriniń arasındaǵı baylanıstı taba alamız:

$$n_{12} = \frac{1}{n_{21}}. \quad (3)$$

Solay etip, birinshi zattıń ekinshi zatqa salıstırǵandaǵı sınıw kórsetkishi menen ekinshi zattıń birinshi zatqa salıstırǵandaǵı sınıw kórsetkishi bir birine keri shamalar bolıp tabıladı eken.

Qanday da bir zattıń boslıqqa salıstırǵandaǵı sınıw kórsetkishin berilgen zattıń absolyut sınıw kórsetkishi dep ataladı. Ádette "absolyut" sózin aytpaydı hám bunday jaǵdayda berilgen zattıń sınıw kórsetkishi haqqında gáp etedi.

Bir birine tiyip turǵan hám hár qıylı bolǵan móldir zatlardan soǵılǵan A hám B tegis-parallel plastinkaların qaraymız (4-súwret). Meyli, birinshi plastinkaǵa nur boslıqtan i múyeshi menen túsetuǵın bolsın. Eki zat arqalı ótip, jaqtılıq i' sınıw múyeshin payda etip, qaytadan boslıqqa ótedi. Tájiriybeler $i' = i$ teńliginiń orınlanatuǵınlıǵın kórsetedi, yaǵnıy jaqtılıq dáslepki baǵıtına parallel baǵıtta shıǵadı eken.

Bólip turǵan úsh shegaraǵa izbe-iz sınıw nızamın qollanıp, mınanı alamız:

$$\frac{\sin i}{\sin i'} = n_1, \quad \frac{\sin i_1}{\sin i_2} = n_{21}, \quad \frac{\sin i_2}{\sin i'} = \frac{1}{n_2}.$$

Bul teńliklerde n_1 menen n_2 ler sáykes birinshi hám ekinshi zatlardıń sındırıw koefficientleri, al n_{21} bolsa ekinshi zattıń birinshi zatqa salıstırǵanda sındırıw koefficientleri bolıp tabıladı. Birinshi eki teńlikten mınaǵan iye bolamız:

$$n_{21} = \frac{1}{n_1} \cdot \frac{\sin i}{\sin i_2}.$$

al sońǵı teńlik mınanı beredi:

$$\frac{\sin i'}{\sin i_2} = n_2.$$

Bunnan $i' = i$ shárti tiykarında

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$$

teńligine iye bolamız.

Solay etip, biz bunnan *eki zattıń salıstırmalı sındırıw koefficientiniń olardıń absolyut sındırıw koefficientleriniń qatnasına teń ekenligine iye bolamız.*

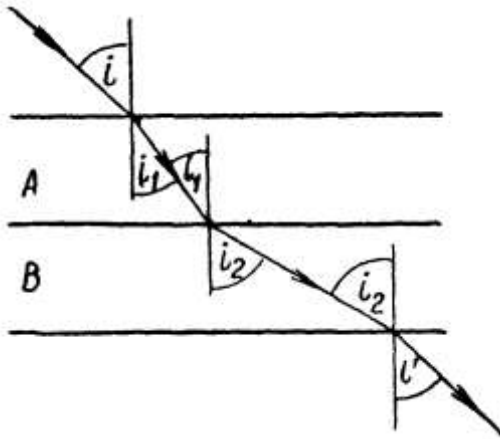
Bunnan keyin eki móldir zattıń shegarasındaǵı jaqtılıqtıń sınıw nızamınıń mınaday túrge enetuǵınlıǵın kóremiz:

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (5)$$

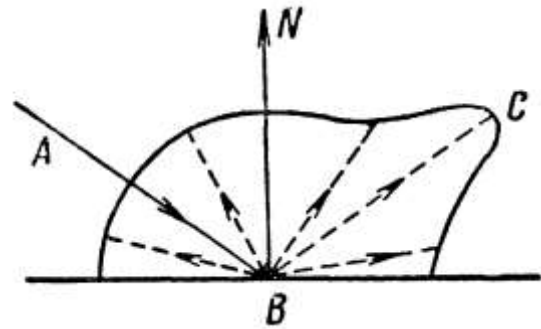
Bul teńlikti simmetriyalı túrde bılayınsha jazamız:

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2. \quad (5a)$$

Jaqtılıqtıń shaǵılıswı tek eki móldir zattıń shegarasında ǵana orın alıp qoymay, qálegen zatta da jaqtılıqtıń belgili shamadaǵı shaǵılıswı baqlanadı. Polirovkalangan zatlar jaqtılıqtı eki móldir zattıń shegarasındaǵı jaqtılıqtıń shaǵılıswı nızamında etip shaǵılıstıradı: kelip túsken nurdıń baǵıtı i múyeshi menen anıqlanatuǵın bolsa, shaǵılısqan nurdıń baǵıtı usı i múyeshine teń i' múyeshi menen anıqlanadı. Bunday shaǵılıswdı *aynalıq* shaǵılısw dep ataydı. Bunday jaǵdayda shaǵılısqan nurdıń intensivligi shaǵılıstıratuǵın bettiń tábiyatına baylanıslı pútkilley hár qıylı bola aladı: gúmislengen polirovkalangan ayna kelip túsken nurdıń 96 procentine shekem shaǵılıstıra aladı; qara polirovkalangan bet túsiwshi nurdıń 1 procentinen kemin shaǵılıstıradı. Usınıń menen birge shaǵılısqan nurdıń intensivligi túsiw múyeshinen de ǵárezli.



4-súwret. Móldir eki tegis-parallel plastinkalar arqalı ótkende nurlardıń sınıwı.



5-súwret. Jaqtılıqtıń diffuziyalıq shaǵılısındaǵı intensivliktiń tarqalıwı.

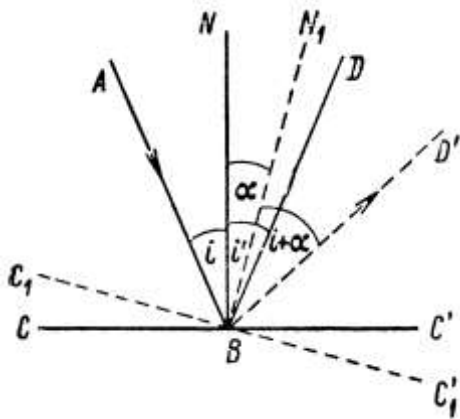
Aynalıq shaǵılısıw menen bir qatarda *diffuziyalıq shashırar* da orın aladı. Diffuziyalıq shıǵılısıwda jaqtılıq barlıq táreplerge azı-kemli bir tekli shashıraydı. Túsken jaqtılıqtıń barlıq táreplerge qaray teń ólshewli shashıratatuǵın betti *absolyut gúńgirt bet* dep ataladı. Dál absolyut gúńgirt bet tábiyatta joq. Absolyut gúńgirt betke jıtıratılmaǵan farfordıń, sızılma sızılatsuǵın qaǵazdıń, qardıń h.t.b. betleri jaqın. Tap sol sıyaqlı tek aynalıq shaǵılıstıratuǵın betler de bolmaydı. Kópshilik jaǵdaylarda aynalıq shaǵılıstırıw múyeshiniń baǵıtında shıǵılısıwdıń maksimumı bar boladı. Diffuziyalıq shaǵılısqan jaqtılıqtaǵı intensivliktiń tarqalıwın grafiktiń járdeminde kórsetiwge boladı: onıń ushın túsiw noqatınan uzınlıǵı usı baǵıttaǵı shashıraǵan jaqtılıqtıń salıstırmalı intensivligine teń vektorlardı qoyıw kerek. Usı vektorlardıń ushları arqalı ótkerilgen sızıq shaǵılısqan jaqtılıqtıń tarqalıwın beredi. Bazı bir shaǵılıstıratuǵın bet ushın usınday grafik 5-súwrette keltirilgen. Aynalıq shaǵılıstırıw baǵıtındaǵı C maksimumı berilgen deneniń absolyut gúńgirt ekenligin ańǵartpaydı: berilgen baǵıtta ol "jıtıraydı".

Jaqtılıq nurlarınıń baǵıtın ózǵertiw hám súwretlerdi alıw ushın xızmet etetuǵın optikalıq ásbaplardıń dúzilisleri jaqtılıqtıń sınıw hám shaǵılısıw nızamlarına tiykarlanǵan. Mısalı, jaqtılıq nurların jıynaw yamasa shashıratıw hám obektlerdiń súwretin alıwǵa múmkinshilik beretuǵın linzalardıń dúzilisi jaqtılıqtıń sınıw nızamına tiykarlanǵan. Sındırıwshı hám shaǵılıstırıwshı sistemalardıń járdeminde súwretlerdi alıwdı biz XXVIII bapta tallaymız.

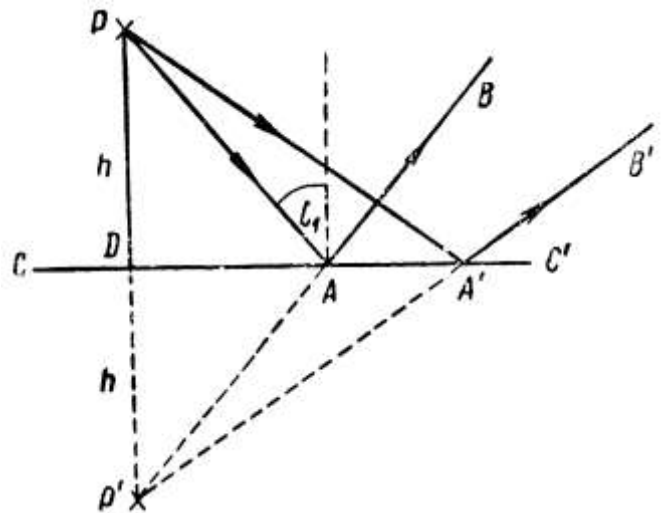
Shaǵılıstırıw hám sınıw nızamların paydalanıwǵa bir neshe mısallar keltiremiz.

1-mısal. Aynanı α múyeshine burǵanda shaǵılısqan nurdıń 2α múyeshine burılatsuǵınlǵın dálilleńiz.

Meyli, AB nurı CC' aynasına i múyeshi menen túsetuǵın bolsın. Shaǵılısıw múyeshi $i' = i$ hám shaǵılısqan nur menen túsiwshı AB nurınıń arasındaqı múyesh $2i$ ge teń. Aynanı α múyeshine burǵanda (6-súwret, bul súwrette aynanıń jańa halı $C_1C'_1$ arqalı belgilengen) BN normalı da α múyeshke burıladı hám túsiw múyeshi $i + \alpha$ ge teń boladı. Al shaǵılısqan BD nurı bolsa túsiwshı AB nurı menen $2i + 2\alpha$ shamasına teń. Burın ol AB nurı menen $2i$ múyeshin jasaytuǵın edi, sonlıqtan ol $2i + 2\alpha - 2i = 2\alpha$ múyeshine burılǵan bolıp shıǵadı.



6-súwret. Aynanı α múyeshine burǵanda shaǵılısqan nur 2α múyeshine burılıdı.



7-súwret. Jaqtılıq tegis aynadan shaǵılısqanda P' jormal súwretiniń payda bolıwı.

2-mısal. Tegis aynanıń obekt onnan qanday qashılıqta turǵan bolsa, aynadan tap sonday qashılıqta payda bolatuǵın jormal súwretti payda etetuǵınlıǵın dálilleńiz.

Noqatlıq P obektiniń noqatlıq súwreti dep usı obekt tárepinen shıǵarılǵan nurlar optikalıq sistema arqalı ótkennen keyin (yamasa onnan shaǵılısqanda) qaytadan kesilisetuǵın P' noqatına aytatuǵınımızdı eske salamız. Nurlardıń ózleri kesilispeytuǵın, al olardıń dawamı kesilisetuǵın jaǵdaylarda jormal súwretler haqqında gáp etedi.

P obektinen shıǵatuǵın (7-súwret) hám CO tegis aynanıń iqtıyarlı A noqatında shaǵılısatuǵın nurdı qaraymız. P noqatınan aynanıń CO tegisligine PD perpendikulyarın júrgizemiz. Meyli, AB nurınıń dawamı PD perpendikulyarınıń dawamın P' noqatında kesetuǵın bolsın. PA nurınıń túsiw múyeshin i arqalı belgileybiz.

DPA hám $DP'A$ úsh múyeshlikleri bir birine teń, sebebi olar ulıwmalıq DA tárepine iye hám $\angle PAD = \angle P'AD$. Bunnan $h = DP' = -DP$ teńlikleriniń orınlı ekenligin kóremiz. PA nurı iqtıyarlı túrde saylap alıńanlıqtan, bul qatnas qálegen basqa $PA'B'$ nurı ushın da durıs, yaǵnıy barlıq nurlardıń dawamı aynanıń artında tap sonday bolǵan $h = PD$ qashılıǵında jaylasqan P' noqatında kesilisedi (obekt aynanıń aldında $h = PD$ qashılıǵında jaylasqan). P' noqatında nurlardıń ózleri emes, al olardıń dawamı kesilisetuǵın bolǵanlıqtan, bul P' noqatı P noqatınıń jormal súwreti bolıp tabıladı.

3-mısal. Kishi A sındırıwshı múyeshke iye prizmaǵa nur kishi múyesh penen kelip túskende usı nurdıń qanday múyesh penen kelip túskenciliginen ǵárezsiz $\delta = A(n - 1)$ múyeshine burılatuǵınlıǵı dálilleńiz (n arqalı prizma soǵılǵan zattıń sındırıw kórsetkishi belgilengen). Prizmanıń birinshi qaptalına túsiw múyeshin i_1 arqalı (8-súwret), al sınıw múyeshin i_1' arqalı belgileybiz. i_2 menen i_2' múyeshleri bolsa prizmanıń ekinshi qaptalı ushın túsiw hám sınıw múyeshleri bolsın. Sınıw nızamı boyınsha:

$$\sin i_1 = n \sin i_1', \quad \sin i_2 = n \sin i_2'$$

teńlikleri orınlı boladı.

Qoyılǵan shárt boyınsha i_1 múyeshi kishi, soǵan sáykes i_1' múyeshi de kishi. Biraq sındırıwshı múyesh A nıń kishi bolıwına baylanıslı i_2 múyeshi de kishi boladı. Bunday jaǵdayda sinuslardı óziniń múyeshleri menen almastırıwǵa boladı hám sońǵı qatnaslar mınaday túrge enedi:

$$i_1 = ni_1', \quad i_2 = ni_2'. \quad (6)$$

Biz izlep atırǵan burılıw múyeshi δ sırtqı $\triangle BCD$ múyeshi bolıp tabıladı. Demek, onıń shaması úsh múyeshliktiń onıń menen baylanıslı bolmaǵan basqa eki múyeshleriniń qosındısına teń:

$$\delta = (i_1 - i_1') + (i_2 - i_2').$$

Bunnan (6)-teńliktiń tiykarında mınaǵan iye bolamız:

$$\delta = i_1'(n - 1) + i_2(n - 1) = (n - 1)(i_1' + i_2). \quad (7)$$

E noqatında N_1 hám N_2 normallarınıń kesilisiwiniń saldarınan payda bolǵan múyesh prizmanıń sandırıwshı múyeshi A ǵa teń. Sonıń menen birge ol $\triangle BED$ sırtqı múyeshi bolıp ta tabıladı. Bunnan

$$i_1' + i_2 = A$$

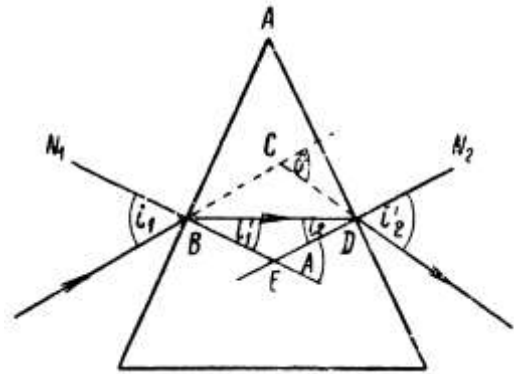
teńligine iye bolamız. $i_1' + i_2$ tiń mánisin (7)-teńlikke qoyıp

$$\delta = A(n - 1)$$

(8)

formulasınıń orınlı ekenligin tabamız. Usı teńliktiń durıs ekenligin dálillew kerek edi.

8-súwret. Nurlardıń prizmadaǵı sınırıwı.

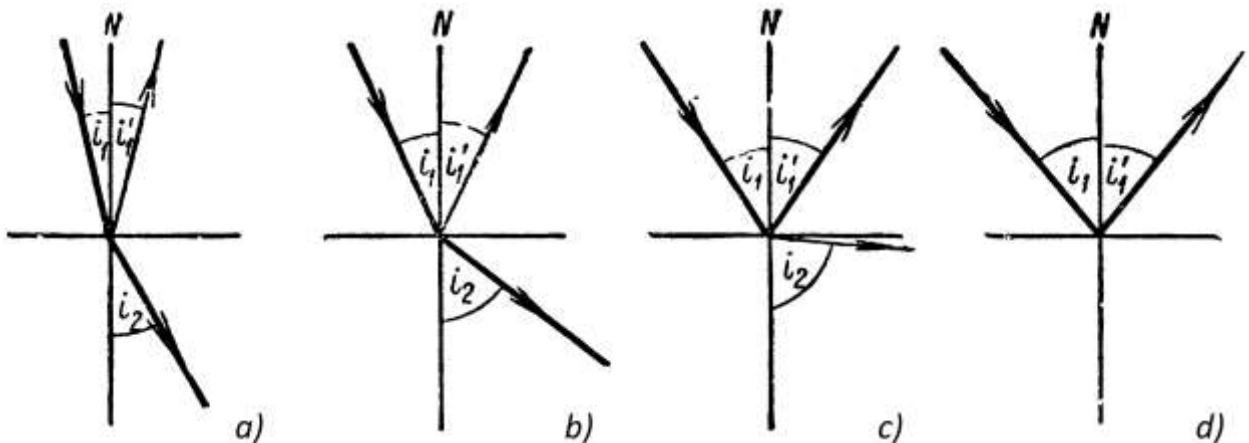


§ 252. Toliq ishki shıǵılısıw. Jaqtılıq sındırıw koefficienti kishi bolǵan zattan (optikalıq tıǵızlıǵı kishi bolǵan) sındırıw koefficienti úlken bolǵan zatqa (optikalıq tıǵızlıǵı úlken bolǵan) zatqa ótkende normalǵa jaqınlasadı. Kerisinshe, optikalıq jaqtan tıǵız bolǵan zattan, optikalıq tıǵızlıǵı kem bolǵan ortalıqqa ótkende nur normaldan qashıqlasadı. Álbette, bunday jaǵdayda $\pi/2$ den kishi bolǵan sonday túsiw múyeshi i_{sh} bar bolıp, i_2 sınıw múyeshiniń shaması $\pi/2$ ge teń boladı, yaǵnıy sınǵan nur jılıwshı nurgá aylanadı. Tájiriybeler $i_1 > i_{sh}$ *teńsizligi orınlanǵanda sınǵan nurdıń bolmaytuǵınlıǵın kórsetedi*: túsken nur tolıǵı menen shaǵılısadı. Bul qubılıstı *toliq ishki shaǵılısıw* dep ataydı. i_{sh} múyeshin *sheklik múyesh* dep ataydı. Sheklik múyesh i_{sh} tiń mánisi $i_2 = \pi/2$ talabınıń tiykarında anıqlanadı, bunnan sınıw nızamı boyınsha [251-paragraftaǵı (5)-formula] mınaǵan iye bolamız:

$$\sin i_{sh} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (1)$$

Bul teńleme $n_2 \leq n_1$ shárti orınlanǵanda tek i_{sh} múyeshiniń zatlıq mánisi menen qanaatlandırıladı, bunnan tolıq ishki shaǵılısıwdıń jaqtılıqtıń optikalıq jaqtan tıǵızraq ortalıqtan optikalıq jaqtan tıǵızlıǵı kem ortalıqqa ótkende júzege keletuǵınlıǵı hám optikalıq jaqtan tıǵızlıǵı kem ortalıqtan optikalıq jaqtan tıǵızlıǵı úlken ortalıqqa ótkende bul qubılıstıń júzege keliwiniń múmkin emes ekenligin kórsetedi. Mısalı, jaqtılıq shiysheden hawaǵa ótkende tolıq ishki shaǵılısıwdıń orın alıwı múmkin, al jaqtılıq hawadan shiyshege ótkende tolıq ishki shaǵılısıwdıń baqlanıwı múmkin emes.

Túsiw múyeshiniń mánisi sheklik mániske jaqınlaǵanda sınǵan nurdıń intensivligi kemeyedi, al shaǵılısqan nurdıń intensivligi úlkeyedi.



9-súwret. Toliq ishki shıǵılısıwdıń júzege keliwi.

9-súwrette hár qıylı sınıw múyeshlerindegi optikalıq tıǵızlıǵı úlken bolǵan zattan optikalıq tıǵızlıǵı kishi bolǵan zatqa ótkendegi jaqtılıqtır sınıwı kórsetilgen. Nurlardıń intensivligi nurlardı sáwlelendiretuǵın sıziqlardıń juwanlıǵına sáykes keledi. 9a súwret jaqtılıqtır kishi i_1 múyeshi menen túsiwine sáykes keledi. Bunday jaǵdayda shaǵılısqan nurdıń intensivligi kishi, al sıngan nurdıń intensivligi úlken. Túsiw múyeshiniń shamasınıń úlkeyiwi menen sıngan nurdıń intensivligi kishireydi (9b súwret). SHekli múyeshke júdá jaqın bolǵan túsiw múyeshinde (9c súwret) bet boyınsha derlik jılıyıtıǵın nurdıń intensivligi júdá ázzi, al shaǵılısqan nurdıń intensivligi túsiwshi nurdıń intensivligine jaqın. SHekli i_{sh} múyeshinen úlken múyeshlerde sıngan nur bolmaydı (9d súwret), tolıq ishki shaǵılısqan orın aladı, jaqtılıq tolıǵı menen shaǵılısadı.

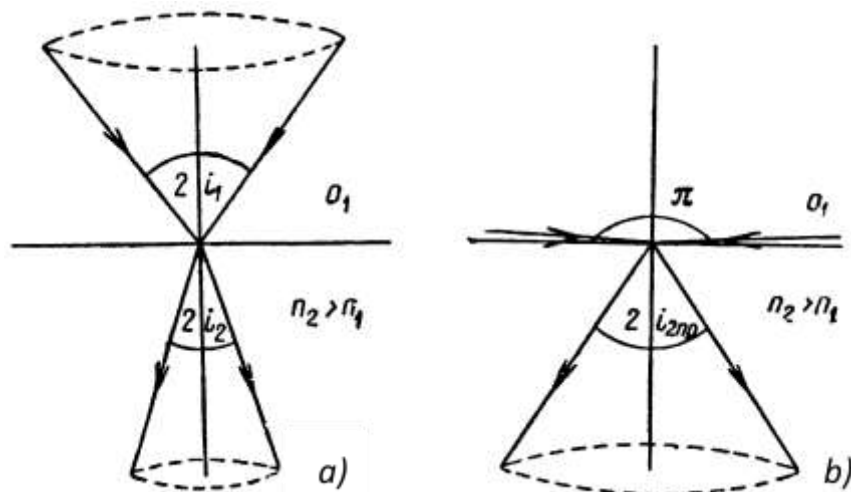
Optikalıq tıǵızlıǵı kishi bolǵan zattan optikalıq tıǵızlıǵı úlken bolǵan zatqa ótkende ashılıw múyeshiniń shaması $2i_1$ (10a súwret) bolǵan konus túrindegi nurlardıń dástesine ekinshi zatta oǵan salıstırǵanda kishi bolǵan ashılıw múyeshi $2i_2$ bolǵan dáste sáykes keledi².

Tıǵızlıǵı kem bolǵan ortalıqtaǵı ashılıw múyeshi π bolǵan dástege tıǵızraq bolǵan zatta ($n_2 > n_1$) $2i_{2sh}$ (10b súwret) shamasına teń bolǵan ashılıw múyeshi sáykes keledi hám ol

$$\sin i_{2sh} = \frac{n_1}{n_2}$$

shártin qanaatlandıradı. Usıǵan sáykes suwdıń ishinde joqarı qarap otırǵan adam aspandı múyeshlik radiusı $i_{2sh} = \arcsin \frac{n_1}{n_2}$ shamasına teń bolǵan dóńgelek daq túrinde kóredi. Hawa ushın $n_1 = 1$, al suw ushın $n_2 = 1,33$. Bunday jaǵdayda $i_{2sh} = 49^\circ$. Ashılıw múyeshi 49° bolǵan konustıń sheklerinden sırtta suwdı hawadan keletuǵın nurlar tarqalmaydı.

Tolıq ishki shıǵılısqan qubılısı optikalıq ásbaplarda shaǵılısqıwları alıw ushın keń túrde qollanıladı. 11-súwrette nurdı 90° qa buratuǵın tolıq ishki shaǵılısqıw orın alatuǵın tuwrı múyeshli prizma kórsetilgen. AB nurı B noqatında tolıq ishki shaǵılısqıwǵa ushıraydı. 12-súwrette nurlardıń oralıwın júzege keltiretuǵın tolıq ishki shaǵılısqıw prizmasınıń ishindegi nurlardıń júrisleri keltirilgen: prizmaǵa joqarıda kelip túsetuǵın 1 nurı sıngannan keyin tómengi nurgá aylanadı.

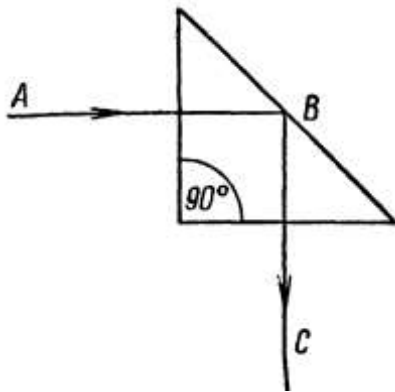


10-súwret. Jaqtılıqtır optikalıq tıǵızlıǵı kishi ortalıqtan optikalıq tıǵızlıǵı úlken bolǵan ortalıqqa ótkendegi nurlardıń konusları.

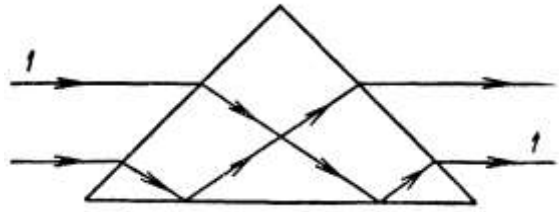
Polirovkalangán metall aynalargá salıstırǵanda tolıq ishki shaǵılısqıw orın alatuǵın prizmalardı paydalanıw shiysheniń mexanikalıq hám ximiyalıq ornıqlı ekenligine baylanıslı artıqmashlıqqa iye

² Usınıń menen birge sınganda dáste bir noqatta kesilisetuǵın nurlardıń dástesine bolmay qaladı.

boladı; metaldan soğılğan polirovkalangan betler ańsat tırnaladı, korroziyaǵa ushıraydı, tez qarawıtadı.



11-súwret. Toliq ishki shaǵılısıw orın alatuǵın tuwrı múyeshli prizma.



12-súwret. Toliq ishki shaǵılısıw prizmasıń járdeminde nurlardıń oralıwı.

§ 253. Ferma principi. Optikalıq jaqtan bir tekli zatta, yaǵnıy barlıq noqatları sındırıw koefficientiniń birdey mánisi menen táriyiplenetuǵın zatta jaqtılıq tuwrı sıızqlı, yaǵnıy berilgen eki noqat arasındaǵı eń qısqa jol menen tarqaladı. Bir zattan ekinshi zatqa ótkende jaqtılıq shegarada sınadı hám shaǵılısadı hám bunday jaǵdayda jaqtılıqtıń jolı sınıq sıızıqtıń járdeminde beriledi. Bir noqattan ekinshi noqatqa ótkende sınıw koefficienti n úzliksiz túrde ózgeretuǵın bir tekli emes zatlarda jaqtılıq nurları úzliksiz túrde sınıp, qıysıq sıızıqlardı payda etedi. Usınıń menen birge eki zattıń arasındaǵı shegarada biz 250-paragrafta esletip ótken difrakciya qubılısı da júzege keledi. Biraq, bul qubılıslarǵa itibar bermesek, onda jaqtılıqtıń bir tekli emes ortalıqlardaǵı tarqalıwı *Ferma principi* dep atalatuǵın ulıwma principitiń tiykarında táriyiplenedi (1679-jılı tabılǵan). Ferma principine anıqlama beriw ushın joldıń *optikalıq uzınlıǵı* túsiniǵın kirgiziw gerek.

13-súwret. Optikalıq joldıń uzınlıǵın anıqlawǵa.



Bir tekli zatta optikalıq jol l haqqında gáp etkende joldıń geometriyalıq uzınlıǵı s penen zattıń sındırıw kórsetkishi n niń kóbeymesin túsinemiz:

$$l = ns. \quad (1)$$

Bir tekli bolmaǵan zatta nurdıń geometriyalıq uzınlıǵın ishinde sınıw kórsetkishi n di turaqlı dep esaplawǵa bolatuǵın júdá kishi bolǵan ds kesindilerine bóliwimiz gerek. Bunday jaǵdayda joldıń optikalıq uzınlıǵı mına shama bolıp tabıladı:

$$dl = n ds.$$

Al joldıń barlıq optikalıq uzınlıǵı barlıq dl elementar optikalıq jollarınıń qosındısına teń boladı, yaǵnıy mınaday integraldıń járdeminde esaplanadı:

$$l = \int_A^B n ds. \quad (2)$$

Bul ańlatpadaǵı integral AB iymekligi boyınsha alınadı (13-súwret, bul iymekliktiń boyı menen jaqtılıq A noqatınan B noqatına shekem tarqaladı).

Ferma principi boyınsha, jaqtılıq optikalıq uzınlıǵı ekstremallıq bolǵan jol boyınsha tarqaladı (yaǵnıy, joldıń shaması múmkin bolǵan jollardıń eń minimallıq yamasa maksimallıq yamasa stacionar bolıwı kerek).

Ferma principi jaqtılıq bir biri menen shegaralasatuǵın bir tekli ayırım uchastkalardan turatuǵın ortalıqta tarqalǵan jaǵdayda da óz kúshinde qaladı.

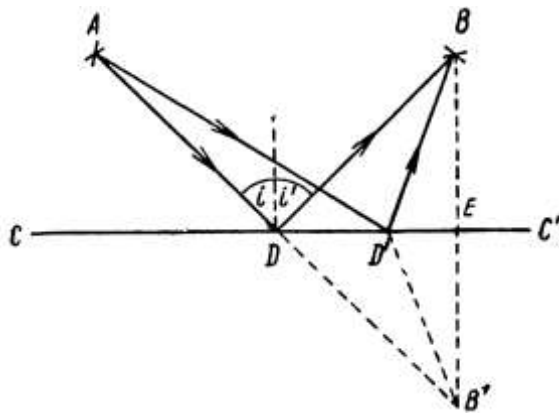
Joldıń optikalıq uzınlıǵınıń ekstremallıq shártı (2)-integraldan alınǵan variaciyanıń nolge teń bolıw shártine alıp kelinedi:

$$\delta \int_A^B n ds = 0. \quad (3)$$

Bul ańlatpa Ferma principiniń matematikalıq formulirovkası bolıp tabıladı.

Bir qatar dara jaǵdaylardı qaraymız hám usı jaǵdaylardagı Ferma principiniń durıs ekenligine kóz jetkeremiz.

Mısalı, eger jaqtılıq CC' betinde shaǵılısıp A noqatınan B noqatına ótetuǵın bolsa (14-súwret), onda shaǵılısıw nızamı orınlanganda jaqtılıqtıń jolınıń uzınlıǵı minimallıq boladı.



14-súwret.

Tegis aynada shaǵılısqanda ADB optikalıq jolınıń uzınlıǵı $AD'B$ optikalıq jolınıń uzınlıǵınan kishi.

Haqıyqatında da, shaǵılısıw nızamına sáykes keletuǵın ADB jolı menen bir qatarda basqa $AD'B$ jolın da qaraymız. B noqatınan shaǵılıstırıwshı betke BE perpendikulyarın ótkeremiz hám onıń dawamında $EB' = EB$ kesindisin túsiremiz. D hám D' noqatların B' noqatı menen tutastıramız. Bunday jaǵdayda BDE hám $B'DE$ úsh múyeshlikleri bir birine teń. Bunnan $DB = DB'$ teńligi kelip shıǵadı. Tap usınday jollar menen $D'B = D'B'$ teńligin de alamız. Bunnan ADB jolınıń uzınlıǵı

$$AD + DB = AD + DB', \quad (4)$$

al $AD'B$ jolınıń uzınlıǵınıń

$$AD' + D'B = AD' + D'B' \quad (4a)$$

Bunnan keyin sızılmadan ADB' múyeshiniń minaday shamaǵa teń ekenligi kelip shıǵadı:

$$\angle ADB' = i + i' + (90^\circ - i') + (90^\circ - i').$$

Bul ańlatpada i menen i' sáykes túsıw hám shaǵılısıw múyeshleri bolıp tabıladı. Shaǵılısıw nızamı boyınsha $i = i'$, bunnan $\angle ADB' = 180^\circ$ teńligine iye bolamız. Demek, ADB' sızıǵı tuwrı bolıp tabıladı, usıǵan sáykes $AD'B'$ sızıǵınıń D noqatı menen sáykes kelmeytuǵın D' noqatınıń qálegen ornı ushın sınıq sızıq bolıp tabıladı. Qálegen eki noqat arqalı ótetuǵın sınıq sızıqtıń uzınlıǵı usı noqatlardı tutastıratuǵın tuwrınıń uzınlıǵınan úlken bolǵanlıqtan, (4)- hám (4a) teńliklerden minanı alamız:

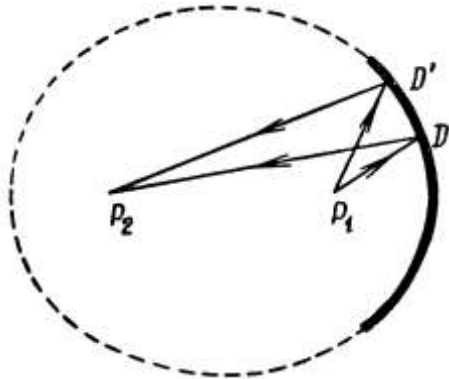
$$AD + DB < AD' + D'B. \quad (5)$$

Biz qarap atırǵan jaǵdayda jaqtılıq bir tekli ortalıqta tarqaladı hám onıń optikalıq jolı geometriyalıq joldan tek turaqlı n kóbeytiwshisine (sındırıw kórsetkishi) ǵana ayrıladı. Sonlıqtan

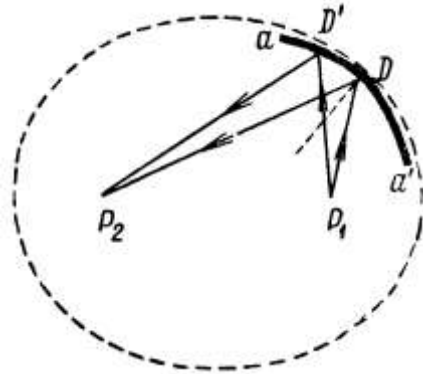
(5)-teńlik (bul teńlik boyınsha joldıń geometriyalıq uzınlıǵı ADB qálegen basqa $AD'B$ joldan kishi) shaǵılısıw nızamı orınlanatuǵın jaǵdayda joldıń optikalıq uzınlıǵınıń minimallıq ekenligin kórsetedi.

Optikalıq uzınlıqlardıń stacionarlıq jaǵdayına aylanıw ellipsoidi formasına iye bolǵan oyıs aynalıq bettegi shaǵılısıw sáykes keledi. Meyli, jaqtılıq ellipsoidtıń fokuslarınıń birinde jaylasqan P_1 noqatınan shıǵatuǵın bolsın (15-súwret). Bunday jaǵdayda aynanıń qálegen D noqatında shıǵısqa ol ekinshi P_2 fokusına kelip túsedi. Ellipstıń belgili qásiyeti boyınsha ellipstıń fokuslarınan onıń boyında jatırǵan qálegen noqatqa túsirilgen radius-vektorlardıń qosındısı turaqlı boladı hám bunnan P_1DP_2 jolınıń uzınlıǵınıń basqa qálegen $P_1D'P_2$ jolınıń uzınlıǵına teń bolatuǵın kelip shıǵadı. Bul belgilewlerde D' arqalı ellipslik aynada jatırǵan qálegen noqat.

Aqırında, shaǵılısqanda optikalıq joldıń uzınlıǵı maksimallıq bolatuǵın oyıq betti kóz aldımızǵa keltiriwge boladı. Meyli, aylanıw ellipsoidiniń fokusınan nur ellipsoidtıń D noqatında shaǵılısatuǵın (16-súwret, ellipsoidlıq bet punktir menen kórsetilgen) hám bunnan keyin ellipsoidtıń ekinshi fokusı arqalı ótetuǵın bolsın. D noqatında ellipsoidtıń betine urınba baǵıtlanǵan, Biraq basqa bólimleri aylanıw ellipsoidiniń ishinde jaylasqan aa' oyıs betin júrgizemiz. Bunday jaǵdayda P_1D nurı aa' betinen de shaǵılısqan nur boladı. Biraq, D' noqatı ellipstıń ishinde jaylasqan bolǵanlıqtan, basqa qálegen $P_1D'P_2$ jolınıń uzınlıǵı P_1DP_2 jolınıń uzınlıǵınan kishi boladı.



15-súwret. Ellipsoidtıń betindegi nurlardıń shaǵılısıwı: P_1DP_2 hám $P_1D'P_2$ optikalıq jollarınıń uzınlıqları birdey.



16-súwret. aa' betinde shaǵılısqan P_1DP_2 nurınıń optikalıq jolınıń uzınlıǵı $P_1D'P_2$ nurınıń optikalıq jolınan úlken.

Jaqtılıq eki bir tekli zattıń tegis shegarasında sınǵan jaǵdayda optikalıq joldıń ekstremallıq shártin qanaatlandıratuǵın kórsetemiz.

Meyli, ADB nurı D noqatında sınatuǵın bolsın (17-súwret), onıń turǵan ornın AC perpendikulyarınıń tiykarınan baslap esaplangan x kesindisiniń járdeminde anıqlaymız. B noqatınan ajratıp turǵan shegaraǵa perpendikulyar ótkeremiz hám CE kesindisin p arqalı belgileybiz. A hám B noqatlarınıń qálegen jubı ushın p kesindisi turaqlı.

ADB nurınıń optikalıq uzınlıǵı mınaǵan teń:

$$l = n_1 AD + n_2 BD. \quad (6)$$

Bul ańlatpada n_1 hám n_2 arqalı sáykes birinshi hám ekinshi zattıń sıdırıw koefficientleri belgilengen. Súwretten mınaday teńliklerdi alamız:

$$AD = \sqrt{h_1^2 + x^2}, \quad BD = \sqrt{h_2^2 + (p - x)^2}.$$

Bul teńliklerde h_1 hám h_2 arqalı AC hám BE perpendikulyarlardıń uzınlıqları belgilengen. AD hám DB lardıń mánislerin (6)-ańlatpaǵa qoyıp, mınanı alamız:

$$l = n_1 \sqrt{h_1^2 + x^2} + n_2 \sqrt{h_2^2 + (p - x)^2}. \quad (7)$$

l optikalıq jolınıń ekstremallıq shártı $\frac{dl}{dx} = 0$ teńliginiń orınlanatuǵınlıǵınan ibarat. (7)-ańlatpanı differenciallap, mınanı alamız

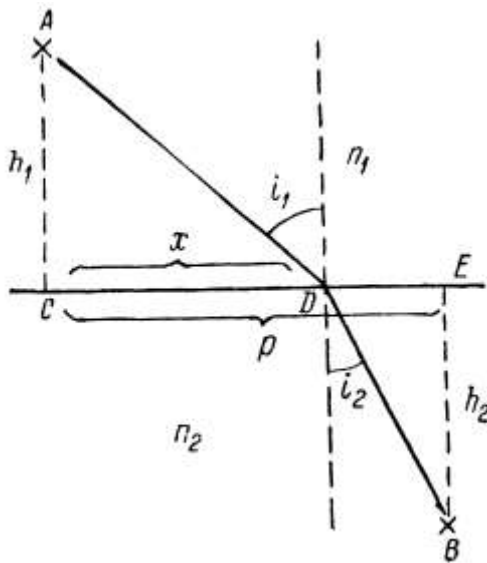
$$\frac{dl}{dx} = n_1 \frac{x}{\sqrt{h_1^2 + x^2}} - n_2 \frac{p-x}{\sqrt{h_2^2 + (p-x)^2}} = 0. \quad (8)$$

Biraq, súwretten

$$\frac{x}{\sqrt{h_1^2 + x^2}} = \sin i_1,$$

$$\frac{p-x}{\sqrt{h_2^2 + (p-x)^2}} = \sin i_2$$

teńlikleriniń orınlı ekenligin kóremiz. Bul teńliklerde i_1 menen i_2 shamaları sáykes túsiw hám shaǵılısıw múyeshleri bolıp tabıladı.



17-súwret.

Sınıw nızamı orınlanatuǵın jaǵdayda ADB optikalıq jolınıń uzınlıǵı minimallıq.

Bunnan (8)-teńlik boyınsha

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$$

teńligine iye bolamız. Demek, ekstremallıq shártin qanaatlandıratuǵın joldıń sınıw nızamın qanaatlandıratuǵının kóremiz. Ekinshi tuwındınıń belgisi boyınsha bul joldıń minimallıq ekenligin ańsat tekserip kóriw múmkin.

§ 254. Jaqtılıqtıń tezligin ólshew. 1607-jılı Galiley birinshi bolıp jaqtılıqtıń tezligin anıqlawǵa tırıstı. Galiley qollarında fonarları bar baqlawshılardı eki biyiktiń basına jaylastırdı. Fonarlardıń aldın ashıp-jabatuǵın dúzilisler menen támiyinlengen. Onı ashıw arqalı birinshi baqlawshı ekinshi baqlawshıǵa jaqtılıq jibergen. Al bul ekinshi baqlawshı jaqtılıq signalın ańǵarıp, óziniń fonarınıń aldın ashqan hám birinshi baqlawshıǵa signaldı jibergen. Jaqtılıqtıń tezliginiń shekli ekenliginen signal birinshi baqlawshıǵa bazı bir Δt shamasına keshigip keliwi kerek. Eger eki biyiktiń arasındagı alǵa hám keri baǵıttaǵı qashıqlıq $2L$ ge teń bolsa, onda jaqtılıqtıń tezligi $c = 2L/\Delta t$ shamasına teń bolıwı kerek. Tájiriybelerdiń barısında Δt waqtınıń shaması ekinshi baqlawshı signaldı kórip, fonarınıń aldın ashaman degenshe ketken waqıttan kishi bolıp shıqqan. Galileydiń tırıswılarınń sátsiz bolıp shıǵıwı jaqtılıqtıń tezliginiń shekli bolǵan jaǵdayda júdá úlken ekenligin kórsetti. Bunnan keyin kóp uzamay jaqtılıqtıń tarqalıw tezligi astronomiyalıq baqlawlardıń tiykarında tabıldı, al keyinirek jaqtılıqtıń tezligin jerdegi sharayatlarda ólshewdiń múmkinshiligi tuwıldı. Boslıqtaǵı jaqtılıqtıń tezligi tiykarǵı fizikalıq konstantalardıń biri bolıp esaplanatuǵınlıǵına baylanıslı, biz xronologiyalıq tártipte jaqtılıqtıń tezligin anıqlawdıń bir neshe usılın tallaymız.

1. Rėmerdiń astronomiyalıq usılı. 1676-jılı Parij observatoriyasınıń astronomı Yupiterdiń joldaslarınıń tutılıwınıń durıs dáwirliginiń buzılatuǵınlıǵın ańǵardı. Jer jılınıń bir

yarımında eki tutılıwdır arasındaǵı waqıt qısqaaraq, al jıldıń ekinshi yarımında eki tutılıwdır arasındaǵı ortasha waqıttan uzınaraq boladı eken. Bul qubılıs jaqtılıqtır tarqalıw tezliginiń shekli ekenligi boyınsha túsindiriledi. Meyli, J Yupiterden keletuǵın jaqtılıq nurınıń baǵıtı A noqatında Jerdiń orbitasına túsirilgen urınbanıń baǵıtı menen sáykes keletuǵın bolsın (18-súwret). Eger Jer sol A noqatında Yupiterden uzaqlasatuǵın bolsa, onda jaqtılıqqa Jerdiń izinen quwıwǵa tuwrı keledi hám eki tutılıwdır arasındaǵı waqıt T' eki tutılıwdır arasındaǵı haqıyqıy T_0 waqıtqa salıstırǵanda úlken boladı:

$$T' = T_0 + \Delta t.$$

T' waqıtı Jerdiń Quyashtır dógeresinde aylanıw dáwirine salıstırǵanda kishi bolǵanlıqtan, Jerdi T' waqıtınıń ishinde JA nurınıń baǵıtında qozǵaladı dep esaplawǵa boladı. Sonlıqtan, Δt keshigiwi Jerdiń T_0 waqıtı ishinde orbita boyınsha qozǵalıw jolınıń ótiw ushın ketken waqıtqa, yaǵnıy $\Delta t = \frac{v}{c} T_0$ shamasına teń boladı. Bul teńlikte v arqalı Jerdiń orbita boyınsha qozǵalıw tezligi, al c arqalı jaqtılıqtır tezligi belgilengen. Bunnan

$$T' = T_0 + \frac{v}{c} T_0 \quad (1)$$

teńligine iye bolamız. Tap sol sıyaqlı, Jer Yupiterge jaqınlaytuǵın B ornında eki tutılıwdır arasındaǵı waqıt aralıǵı T'' haqıyqıy waqıt T_0 den Δt shamasına kishi boladı:

$$T' = T_0 - \frac{v}{c} T_0. \quad (2)$$

Jer sharı basqa orınlar arqalı ótkende keshigiw menen alǵa oziwdır shamaları kishi boladı.

(1)- hám (2)-teńlemelerdi c ǵa qarata sheship, mınanı alamız:

$$c = \frac{T' + T''}{T' - T''} v.$$

Bul qatnas tutılıwlardıń arasındaǵı maksimallıq hám minimallıq waqıt aralıqları jáne Jerdiń orbita boyınsha qozǵalıw tezligi v boyınsha jaqtılıqtır tezligi c nı tabıwǵa múmkinshilik beredi.

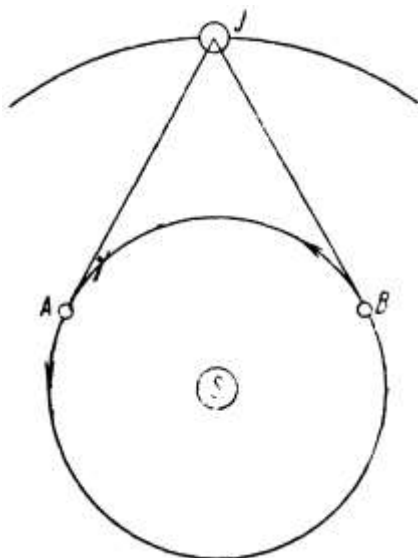
Rëmerdiń ólshewleri jaqtılıqtır tezligi ushın 215 000 km/sek shamasın berdi. Házirgi waqıtlardaǵı astronomiyalıq ólshewlerdiń tiykarında jaqtılıqtır tezligi ushın 300 000 km/sek shamasına jaqın mánis alınadı.

2. Juldızlıq aberraciya usılı. XVIII ásirdiń basında astronomlar "qozǵalmaytuǵın" juldızlardıń koordinatalarınıń kishi dáwirli ózgeretuǵınlıǵın taptı: juldızlar aspan gúmbezinde jer jılınıń barısında $\Delta\varphi = 40,9''$ múyesh penen kórinetuǵın hám barlıq juldızlar ushın birdey yarım kósherge iye ellipsti sızadı eken. Ellipstıń sozılǵanlıq dárejesi juldızdıń ekliptika tegisligine salıstırǵandaǵı jaylasıwınan ǵárezli; ekliptika tegisligine perpendikulyar tegislikte jatatuǵın juldızlar ushın ellips eń kishi ekscentrisitetke, al ekliptika tegisliginde jatatuǵın juldızlar ushın ellips tuwrı sızıqqa aylanadı eken.

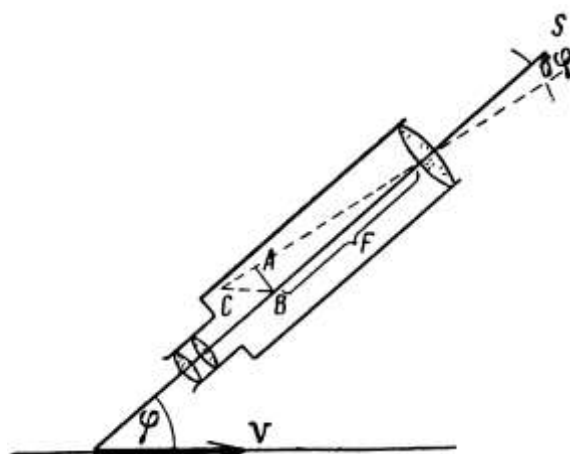
Juldızlıq aberraciya atamasına iye bolǵan bul qubılıs jaqtılıqtır tezliginiń shekli ekenligi menen baylanıslı. Meyli, S juldızına qaray baǵıtlangan haqıyqıy baǵıt Jerdiń tezligi menen v tezligin quraytuǵın bolsın hám bul juldız kósheri usı juldızǵa qaray baǵıtlangan haqıyqıy baǵıtqa sáykes keletuǵın teleskoptır járdeminde baqlanatuǵın bolsın (19-súwret). Jerdiń qozǵalıwınıń saldarınan B juldızınıń súwreti teleskoptır kósherine salıstırǵanda bir qansha burılǵan boladı hám ol C noqatına kelip túsedi. Sebebi jaqtılıq trubanıń ishinde qozǵalatuǵın Δt waqıtınıń ishinde teleskop Jer menen birge v tezliginiń baǵıtında qozǵaladı. Usıǵan baylanıslı, BC kesindisiniń uzınlıǵı Δt waqıtı ishinde teleskop Jer menen birgelikte ótetuǵın joldır uzınlıǵına teń. Bunnan $BC = v\Delta t$ teńliginiń orınlı bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Juldızdıń súwreti teleskoptır bas fokallıq tegisliginde alınatuǵın bolǵanlıqtan, $\Delta t = F/c$ teńligi orınlı boladı. Bul teńlikte F - teleskoptır obektiviniń fokuslıq qashıqlıǵı, c - jaqtılıqtır tezligi. Bunnan

$$BC = \frac{v}{c} F \quad (3)$$

teńligine iye bolamız.



18-súwret. Jaqtılıqtıń tezligin Yupiterdiń joldaslarınıń tutılıwı boyınsha anıqlaw.



19-súwret. Juldızlıq aberraciya.

Juldızdıń súwreti B noqatında emes, al C noqatında alınatuǵın bolǵanlıqtan juldız turǵanday bolıp kórinetuǵın baǵıt haqıyqıy baǵıtqa salıstırǵanda $\delta\varphi$ múyeshine burılǵan bolıp shıǵadı. Aberraciya múyeshi dep atalatuǵın bul múyesh, 19-súwrette kórinip turǵanıday,

$$\delta\varphi = \frac{AB}{F} = \frac{BC \sin(\angle ACB)}{F}$$

qatnasınıń járdeminde alınadı. ACB múyeshiniń shaması $ACB = \varphi - \delta\varphi$, $\delta\varphi$ múyeshiniń shaması kishi bolǵanlıqtan, juwıq túrde

$$\angle ACB = \varphi, \quad \delta\varphi = \frac{BC \sin \varphi}{F}$$

teńliklerine iye bolamız. Bul teńliklerge BC nıń ornına onıń (3)-ańlatpa boyınsha mánisin qoyıp, mınaday shamanı alamız:

$$\delta\varphi = \frac{v}{c} \sin \varphi. \quad (4)$$

Bunnan aberraciya múyeshiniń teleskoptıń fokuslıq qashıqlıǵı F ten ǵárezli emes, al Jerdiń tezligi v , jaqtılıqtıń tezligi c hám φ múyeshinen ǵárezli ekenligi kelip shıǵadı. Jerdiń orbitası boyınsha jıllıq qozǵalıstıń barısında Jerdiń tezligi v menen juldızǵa qaraǵan baǵıt úzliksiz ózgeretuǵın bolǵanlıqtan, juldızdıń kózge kórinetuǵın ornı aspan gúmbezinde ellipstı payda etedi. $\sin \varphi$ tıń absolyut mánisi boyınsha eń úlken shaması $\varphi = \frac{\pi}{2}$ hám $\varphi = \frac{3\pi}{2}$ shamalarında alınatuǵın bolǵanlıqtan, ellipstıń úlken yarım kósheriniń múyeshlik shaması $\Delta\varphi$ (4)-ańlatpa boyınsha mınaǵan teń:

$$\Delta\varphi = \frac{v}{c} \sin \frac{\pi}{2} - \frac{v}{c} \sin \frac{3\pi}{2} = 2 \frac{v}{c}.$$

Bunnan, jaqtılıqtıń tezligi c ushın

$$c = \frac{2v}{\Delta\varphi}$$

ańlatpasın alamız.

Joqarıda keltirilgen $\Delta\varphi$ mánisi hám Jerdiń orbita boyınsha qozǵalıstıń tezligi v nı biliw arqalı jaqtılıqtıń tezligi c nı anıqlawǵa boladı. Usınday usıldıń járdeminde $c = 303\,000$ km/sek mánisi alındı.

3. Tisli dóńgelek usılı. Jerdegi sharayatlarda jaqtılıqtıń tezligi birinshi ret Fizo tárepinen 1849-jılı tisli dóńgelektiń járdeminde ólshendi. Bul usıl, shın mánisinde, Galiley tárepinen

usınılgan usılğa sáykes keledi, tek ekinshi baqlawshı ayna menen, al jaqtılıq dereginiń aldındaǵı ashıp-jabatuǵın dúzilis tez aylanatuǵın tisli dóńgelek penen almasırılǵan. Tisli dóńgelek jaqtılıqtıń aldın jabadı hám ashadı. Tisli dóńgelek usılınıń sxeması 20-súwrette keltirilgen. S dereginen shıqqan jaqtılıq yarım gúmislengen A aynasında dóńgelektiń aa' tisleriniń arasınan ótedi, bunnan keyin M aynasına jetip, keyin qaray shaǵılısadı hám yarım gúmislengen A aynası arqalı ótip, B baqlawshısınıń kózine túsedı.

Eger tisli dóńgelekti aylanısqa keltirse, onda jaqtılıq M aynasına barıp jáne qaytıp keletuǵın Δt waqtınıń ishinde dóńgelek bazı bir múyeshke burılıp úlgeredi. Eger, bunday jaǵdayda tistiń arasınan ótken jaqtılıq jaqın tis penen almasatuǵın bolsa, onda shaǵılısqan jaqtılıq irkiledi hám baqlawshı jaqtılıqtı kórmeydi. Eger dóńgelek tislerdiń arasındaǵı qońsılas aralıq arqalı óte alatuǵın bolsa, onda baqlawshı jaqtılıqtı qaytadan kóredi. Dóńgelektiń tezligi úlkeygende jaqtılıq qaytadan joǵaladı.

Δt waqtınıń shamasın ólshewge boladı. Onıń ushın, mısalı, M aynasınan qaytıp kelgen jaqtılıqtıń joǵalatuǵın dóńgelektiń aylanısar sanı v dı tabıw kerek. Meyli, n arqalı dóńgelekтегі tislerdiń sanı belgilengen bolsın. Bunday jaǵdayda

$$\Delta t = \frac{1}{2nv} \quad (5)$$

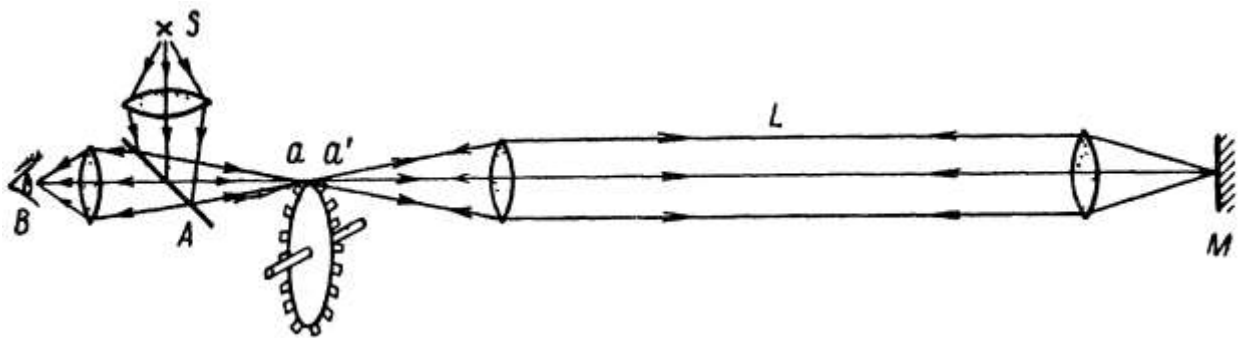
shamasına iye bolamız. Ekinshi tárepten, joqarıda ayılǵanlarǵa sáykes, bul jaqtılıqtıń L bazisi arqalı M aynasına shekem hám onnan qaytqanda basıp ótilgen joldıń uzınlıǵına teń, yaǵnıy onıń shaması mınaǵan teń:

$$\Delta t = \frac{2L}{c}. \quad (6)$$

(5)-hám (6)-ańlatpalardı salıstırıp

$$c = 4nLv$$

ańlatpasın alamız.



20-súwret. Jaqtılıqtıń tezligin tisli dóńgelek usılınıń járdeminde anıqlaw.

Fızo $2L = 14$ km qashıqlıǵın aldı. Jaqtılıqtıń tezligi ushın ol 315000 km/sek shamasın aldı. Keyinirek tisli dóńgelek usılı menen ólshewler úlken bazis penen qaytalandı. $2L = 46$ km bolǵan jaǵdayda $c = 299\,870 \pm 50$ km/sek shaması kelip shıqtı. Jaqında jaqtılıq dástesiniń aldın jabatuǵın dúzilis sıpatında Kerr qutısı paydalanıldı (294-súwret). Bunday jaǵdayda bazis 15 m ge shekem qısartıldı, yaǵnıy barlıq apparatura laboratoriyaniń sheklerinde jaylasadı.

4. Aylanıwshı ayna usılı (Fuko, 1868-jıl). Aylanıwshı ayna usılınıń sxeması 21-súwrette berilgen. S dereginen shıqqan jaqtılıq yarım gúmislengen M plastinkası arqalı ótip, súwrettiń tegisligine perpendikulyar bolǵan O kósheriniń dógereginde aylanatuǵın A aynasına kelip túsedı. Usı A aynasında shaǵılısıp, nur ekinshi B aynasına kelip túsedı. Bul ayna oyıs (yaǵnıy, mayıstırılǵan) hám O kósheri iymeklik kósheri arqalı ótedi. B aynasında shaǵılısıp, nur keri qaray qaytadı hám S' noqatında derektiń súwretin beredi. A aynasın burǵanda nur B oyılǵan aynası boyınsha jılıydy, ol burınǵı baǵıtta shaǵılısadı, sonlıqtan barlıq waqıtta B aynasına normal baǵıtta

onıń radiuslarınń biriniń baǵıtında túsedı. Solay etip, A aynasın burǵanda derektiń súwreti S' qozǵalıssız qaladı. A aynası nur oyıs B aynasınan sırtqa shıǵatuǵınday bolıp burılǵanda S' súwreti joǵaladı. A aynası aylanǵanda S' súwreti óship-jana baslaydı, Biraq júdá tez aylandırılǵanda óship-janıw sonday tez bolıp, onı kóz ajırata almay qaladı. A aynasın jetkilikli dárejede tez aylandırılǵanda S' súwreti azmaz awısa; bul awısıwdıń mánisi mınadan ibarat: jaqtılıqtıń A aynasınan B aynasına jetiwi hám qaytıp keliwi ushın kerekli bolǵan Δt waqıtınıń ishinde A aynası $\Delta\alpha$ múyeshine burılıp úlgeredi. Bunday jaǵdayda shaǵılısqan nur $2\Delta\alpha$ múyeshine burıladı (251-paragraf) hám B' súwreti

$$\Delta s = 2\Delta\alpha \cdot l \quad (7)$$

shamasına jılasadı. Bul teńlikte l - jaqtılıq nurınıń C linzasınan S' súwretine shekemgi qashıqlıq.

Ekinshi tárepten, eger ω arqalı A aynasınıń múyeshlik tezligin belgilesek, onda burılıw múyeshi $\Delta\alpha = \omega\Delta t$ shamasına teń boladı. Biraq Δt waqıtı bolsa jaqtılıqtıń A aynasınan B aynasına hám keri baǵıtta júriw waqıtı bolıp tabıladı; bul joldı L arqalı belgilep

$$\Delta t = \frac{2L}{c}$$

teńligine iye bolamız. Bunnan $\Delta\alpha$ múyeshi ushın

$$\Delta\alpha = \omega \frac{2L}{c} \quad (8)$$

teńligin alamız.

(7)- hám (8)-ańlatpalardan jaqtılıqtıń tezligi ushın

$$c = \frac{4\omega Ll}{\Delta s}$$

ańlatpasın alamız.

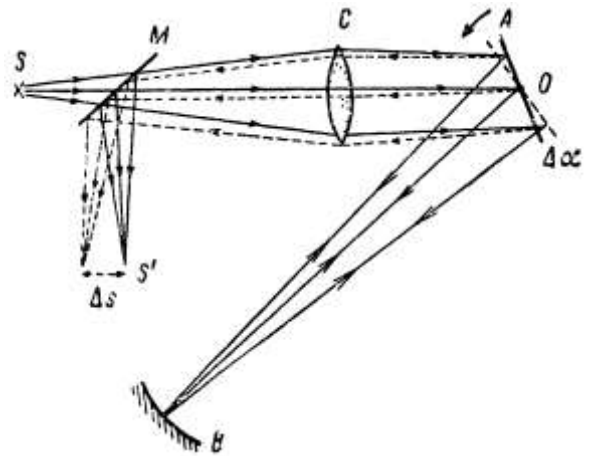
Bunnan tikkeley ólshenetuǵın ω , L, l hám Δs shamaları boyınsha jaqtılıqtıń tezligi c nı tabamız.

Fuko tájiriybelerinde L qashıqlıǵınıń shaması 4 m ge teń, al A aynası bolsa bir sekunda 800 ret aylanǵan. Jaqtılıqtıń tezligi ushın ol $c = 298\,000 \pm 500$ km/sek shamasın aldı. Bul shama dım kishi.

1891-jılı aylanıwshı ayna usılı menen ótkerilgen jańa ólsheuler $c = 299\,810 \pm 50$ km/sek shamasın berdi.

5. Aylanıwshı prizma usılı. Maykelson shın mánisinde tisli dóńgelek hám aylanıwshı ayna usılların biriktirip aylanıwshı prizma dúzilisin dóretti. Tisli dóńgelek usılında tistiń ortası ǵana jaqtılıqtı jawıp qoymay, tistiń shetleri de jaqtılıqtı jabadı hám bul jaǵday bul usıldıń dálligin tómendetedi. Sonlıqtan súwretti joǵalıwı momenti dál anıqlanbaydı. Tap usınday jaǵday tislerdiń arasındaqı qońsılas orın arqalı ótkende de orın aladı: súwrettiń qaytadan payda bolıw momentin dál anıqlawdıń múmkinshiligi joq. Aylanıwshı ayna usılı da jetkilikli dárejede dál emes, sebebi bul usılda júdá kishi L bazisi alınadı; Fuko tájiriybelerindegi súwretteń awısıwı barlıǵı bolıp 0,7 mm ge teń boldı. Aylanıwshı prizma usılı bul kemshiliklerdi saplastıradı; bul usıldıń ulıwmalıq sxeması 22-súwrette berilgen.

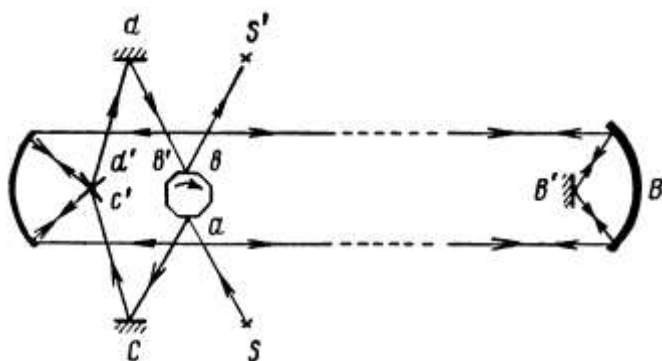
21-súwret.
Jaqtılıqtıń tezligin aylanıwshı ayna usılınıń
járdeminde anıqlaw.



S' dereginen shıqqan jaqtılıq polattan soǵılǵan altı jaqlı a prizmasında shaǵılısadı hám c hám c' tegis aynalardıń járdeminde oyılǵan A aynasına jiberiledi. Oyılǵan A aynasınan jaqtılıq parallel dáste túrinde qońsılas tawda jaylasqan shaǵılıstıratuǵın B hám B' aynalarına qaray jiberiledi. 1926-jılı ótkerilgen tájiriybelerde Maykelson bir birinen 35,4 km qashıqlıqta jaylasqan eki tawdıń shıńların paydalandı. Ekinshi tawdıń shıńında jaqtılıq sol orında jaylastırılǵan B hám B' aynalarında shıǵılısıp qaytadan A aynasına kelip túsken. Bunnan keyin d' hám d tegis aynalarınıń járdeminde jaqtılıq b prizmasınıń qaptal betine qaray jiberiledi hám S' noqatında súwret payda etiledi. Prizma qozǵalmay turǵanda b qaptalı a qaptalına qarama-qarsı jaylasqan. Prizmanı aylandırǵanda onıń múyeshlik tezligin bılayınsha saylap alıwǵa bolatuǵın edi: jaqtılıq bazis boylap alǵa hám keri qaray tarqalǵan waqıttıń ishinde prizmanıń tolıq aylanıwdıń $1/8$ shamasına burılıwı hám b qaptalıń ornına jaqtılıqtıń shaǵılısıwı kerek bolǵan b' qaptalıń keliwi kerek. Haqıyqatında, b' qaptalı b qaptalıń ornında dál turmaydı hám S' súwreti bir qansha awısqa bolıp shıǵadı. Bul awısıwdıń shamasın ólshewge boladı. Solay etip, basqa usıldaǵı bir tistiń ekinshi tis penen almasıwı, bul usılda prizmanıń bir qaptalıń ekinshi qaptal menen awısıwı menen almasıwı; aylanıwshı ayna usılındaǵı S' súwrettiń awısıwı dúzetiwdiń xızmetin atqaradı. Bul jaǵday jaqtılıqtıń bazis arqalı ótiwi ushın ketken waqıt Δt nı bunnan buringı usıllarǵa salıstırǵanda dálirek anıqlawǵa múmkinshilik berdi.

Usınday usıldıń járdeminde ótkerilgen ólshewler $c = 299\,796 \pm 4 \text{ km/sec}$ shamasın berdi.

Joqarıda táriyiplengen tájiriybelardıń barlıǵında jaqtılıqtıń hawadaǵı tezligi ólshendi hám boslıqtaǵı tezliktiń shaması hawanıń sıdırıw kórsetkishiniń járdeminde esaplawlardı júrgiziw jolı menen anıqlandı (251-súwret). Biraq, úlken bazislerde (bunday bazislerde ótkeriletuǵın ólshewlerdiń dáliligi joqarı boladı) hawanıń bir tekli bolmawı tásir ete baslaydı hám boslıqqa ótiw qıyınlasadı. Bunday jaǵdaydan qutılıw ushın Maykelson 1932-jılı jaqtılıqtıń tezligin aylanıwshı prizmanıń járdeminde qaytadan ólshedi. Bul ret ol jaqtılıqtıń hawası sorıp alınǵan trubadaǵı tezligin ólshedi. Trubanıń uzınlıǵı 1,6 km shamasına teń hám ondaǵı jaqtılıq alǵa hám artqa qaray 10 ret júrgizilgen. Sonlıqtan jaqtılıqtıń júriw jolınıń ulıwmalıq uzınlıǵı 16 km ge jetkerilgen. Bul jaǵdayda jaqtılıqtıń tezligi ushın $c = 299\,774 \pm 2 \text{ km/sec}$ shaması alınǵan.



22-súwret. Aylanıwshı prizma usılınıń járdeminde jaqtılıqtıń tezligin anıqlaw.

I kestede jaqtılıqtıń tezligin hár qıylı usıllar menen ólshewde alınǵan nátiyjeler salıstırılǵan.

1-keste.

Usıl	Jıl	km/sek lardaǵı jaqtılıqtıń tezligi
Aylanıwshı ayna.	1891	$299\,810 \pm 50$
Tisli dóńgelek.	1902	$299\,870 \pm 50$
Aylanıwshı prizma.	1926	$299\,796 \pm 4$
Kerr qutısı ³	1928	$299\,778 \pm 10$
Aylanıwshı prizma, jaqtılıqtıń vakuumdıǵı jolı.	1932	$299\,774 \pm 2$

Házirgi waqıtları jaqtılıqtıń boslıqtaǵı tezliginiń eń itimal mánisi sıpatında

$$c = 299\,776 \pm 4 \text{ km/sek}$$

mánisi qabıl etilgen⁴.

§ 255. Jaqtılıqtıń tolqınlıq teoriyası. Gyuygens principı. Kirisiwde biz XVII ásirdeń aqırında Gyuygenstıń jaqtılıqtıń barlıq "bos" keńislikti tóltirip turǵan hám barlıq zatlardıń ishine kiretuǵın tutas bolǵan serpimli ortalıq bolǵan efirde tarqalatuǵın tolqın bolıp tabıladı degen pikirdi aytqanın atap ótip edik. M.V.Lomonosov ta tap usınday pikirdi qollap-quwatladı. Olar jaqtılıq tolqının efirde tarqalatuǵın mexanikalıq serpimli terbelisler dep esapladı.

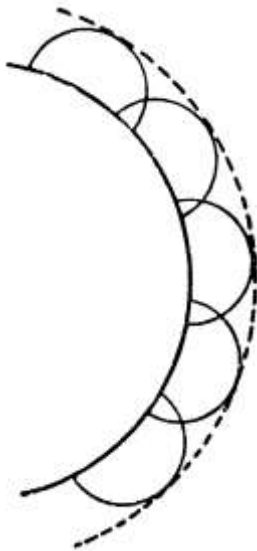
Gyuygens tiykarınan tolqın frontınıń tarqalıwı máselesin qaradı hám tolqın frontınıń ornı menen waqıttıń bunnan keyingi momentlerindegi ornın anıqlaytuǵın principni taptı. Gyuygens principı dep atalatuǵın bul princip I tomdaǵı 107-paragrafta bayanlandı. Biz házir onı qısqaşa eske salamız: tolqın frontı kelip jetken qálegen noqattı elementar tolqınlardıń óz betinshe deregi dep qarawǵa boladı; tolqınınıń jańa frontı barlıq elementar yarım sferalıq tolqınlardı tutastırıw arqalı alınǵan sıziq (bet) tolqınınıń jańa frontı bolıp tabıladı (23-súwret).

Nurlar tolqın frontına normal baǵıtlanǵan tuwrılardıń semeystvosı bolıp tabıladı.

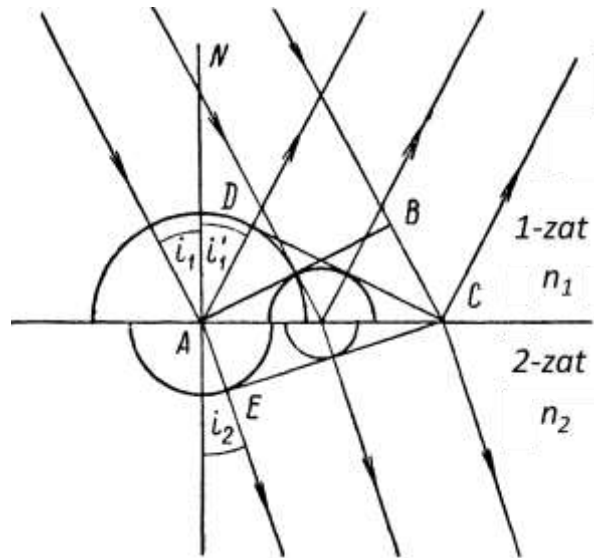
Gyuygens princip tolqınlıq kóz-qarastan jaqtılıqtıń shaǵılısıwı menen sınırı nızamların túsindiriwge múmkinshilik beredi. Meyli, sıdırıw kórsetkishleri n_1 menen n_2 bolǵan eki zattıń arasındıǵı shegaraǵa tegis AB tolqın frontı kelip túsken bolsın (24-súwret); bul tolqın frontına AN normalı menen i_1 múyeshin jasaytuǵın parallel nurlardıń dástesi sáykes keledi. Gyuygens principı boyınsha tolqın frontı jetip keletuǵın ajıratıp turatuǵın shegaranıń barlıq noqatları jańa sferalıq tolqınlardıń derekleri bolıp tabıladı

³ Kerr qutısınıń járdeminde jaqtılıqtıń tezligin anıqlawdıń usılı 294-paragrafta táriyiplengen.

⁴ Házirgi waqıtları qabıl etilgen mánisi $299\,792\,458 \text{ m/s}$ shamasına teń (Awdarıwshılar).



23-súwret. Ekinshi tolqınlardıń payda bolıwı.



24-súwret. Eki móldir zattıń arasındaǵı shegaradaǵı shaǵılısqan hám sınǵan tolqınlardıń payda bolıwı.

Tolqın frontı dáslep ajıratıp turatuǵın shegaradaǵı A noqatına jetip keledi. Fronttıń ekinshi sheti B ajıratıp turǵan shegaradaǵı C noqatına kelip jetemen degenshe A noqatınıń átirapında birinshi zatta keri qaray tarqalatuǵın radiusı $AD = BC$ shamasına teń yarım sferalıq front payda boladı. Shegaranıń aralıqlıq noqatlarınń átiraplarında kishi radiusqa iye yarım sferalıq tolqınlar payda boladı. Elementar yarım sferalıq tolqınlarǵa túsirilgen urınba DC shaǵılısqan tolqınlardıń frontınıń baǵıtın anıqlaydı. Meyli, bul tolqın frontına sáykes keletuǵın nurlar AN normalı menen i_1' múyeshin jasaytuǵın bolsın. Tuwrı múyeshli ABC hám ADC úsh múyeshliklerin qaraymız; Olar ulıwmalıq AC gipotenuzasına hám teńdey $AD = BC$ katetlerine iye. Demek, $\triangle ABC = \triangle ADC$. Bunnan

$$\angle BAC = \angle DCA$$

teńligine iye bolamız. Biraq, $\angle BAC$ túsiw múyeshine, al $\angle DCA$ shaǵılısıw múyeshine teń. Bunnan

$$i_1' = i_1$$

teńligine, yaǵnıy shaǵılısıw nızamınıń orınlanatuǵınlıǵına iye bolamız.

Sınıw nızamın dálillew ushın eki zattaǵı jaqtılıqtıń tezligin esapqa alamız. Meyli, birinshi zatta jaqtılıq v_1 tezligi, al ekinshi zatta v_2 tezligi menen tarqalatuǵın bolsın. Meyli, birinshi zatta fronttıń B sheti B noqatınan C noqatına shekem tarqalaman degenshe ekinshi zatta A noqatınıń átirapında radiusı AE ge teń bolǵan elementar yarım sferalıq tolqın payda boladı. Bunday jaǵdayda urınba EC tegisligi sınǵan tolqınnıń frontın anıqlaydı.

A noqatınıń átirapında payda bolǵan yarım sferalıq tolqınnıń radiusı AE tap sol noqattıń átirapında birinshi zatta payda bolǵan yarım sferalıq tolqınnıń radiusı AD ǵa qatnası eki zattaǵı jaqtılıqtıń tezlikleriniń qatnasınday bolıwı kerek:

$$\frac{AD}{AE} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (1)$$

AEC tuwrı múyeshli úsh múyeshliginen mınaǵan iye bolamız:

$$\sin \angle ACE = \frac{AE}{AC}. \quad (2)$$

Tuwrı múyeshli ADC úsh múyeshliginen bolsa

$$\sin \angle ACD = \frac{AD}{AC} \quad (3)$$

teńligine iye bolamız. (3)- hám (2)-teńliklerdi aǵzama-aǵza bólip mınaǵan iye bolamız:

$$\frac{\sin \angle ACD}{\sin \angle ACE} = \frac{AD}{AE}$$

hám bunnan

$$\frac{\sin \angle ACD}{\sin \angle ACE} = \frac{v_1}{v_2}$$

teńligin alamız. Biraq, ACD múyeshi túsiw múyeshi i_1 ge, al ACE múyeshi bolsa sınıw múyeshi i_2 ge teń. Bunnan tómendegidey qatnas kelip shıǵadı:

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (4)$$

Zatlardıń berilgen jubı ushın jaqtılıqtıń tezlikleriniń qatnası v_1/v_2 turaqlı shama, bunnan (4)-ańlatpanıń sınıw nızamın ańǵartatuǵını kelip shıǵadı.

(4)-qatnastı sınıw nızamınıń ádettegidey túri menen salıstırıp

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

qatnasın, al bul qatnastan

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} \quad (5)$$

qatnasınıń orınlı ekenligine kóz jetkeriwge boladı.

Solay etip, tolqınlıq teoriya tek ǵana sınıw nızamın túsindirip ǵana qoymay, al sınıw kórsetkishleri menen tarqalıw tezlikleriniń arasındaǵı qatnastı da beredi.

(5)-formula boyınsha *eki zattıń sındırıw koefficientleri olardaǵı jaqtılıqtıń tarqalıw tezliklerine kerip proporcional ekenligi* kórinip tur. Optikalıq jaqtan tıǵızraq bolǵan zatta jaqtılıq optikalıq tıǵızlıǵı kemirek bolǵan zatqa salıstırǵanda kishirek tezlik penen tarqaladı.

Boslıq ushın sındırıw koefficienti birge teń. Bunnan qanday da bir zattaǵı jaqtılıqtıń tarqalıw tezligi v nıń jaqtılıqtıń boslıqtaǵı tarqalıw tezligi c menen bılayınsha baylanısqa ekenligi kórinip tur:

$$v = \frac{c}{n}. \quad (6)$$

Bul qatnasta n arqalı berilgen zattıń sındırıw koefficienti belgilengen. Móldir deneler ushın $n > 1$ hám, sonlıqtan, olardaǵı jaqtılıqtıń tarqalıw tezligi boslıqtaǵı tarqalıw tezliginen kishi.

Jaqtılıqtıń korpuskulalıq teoriyası da jaqtılıqtıń shaǵılısıw nızamı sınıw nızamın túsindire aladı, Biraq ol sındırıw koefficientleri menen jaqtılıqtıń tarqalıw tezlikleri arasındaǵı basqa ǵárezlikke alıp keledi.

Eger, jaqtılıq kvantları serpimli deneler sıyaqlı shaǵılıstırıwshı bet penen serpimli soqlıǵısa dep esaplaw jolı menen shaǵılısıw nızamın túsindiriwge boladı. Biz diywalǵa serpimli urılatuǵın shardıń diywaldan kelip túsiw múyeshine teń múyesh penen sekiretuǵınlıǵın bilemiz (I tom, 18-paragraf).

Sınıw nızamın túsindiriw ushın jaqtılıq biz zattan ekinshi zatqa ótkende jaqtılıq bólekshesiniń tezliginiń normal qurawshısı v_n ózgeredi, al tangensiallıq qurawshısı v_t ózgermeydi dep esaplaw kerek. 25-súwretten mınaǵan iye bolamız

$$\sin i_1 = \frac{v_{1t}}{v_1}, \quad \sin i_2 = \frac{v_{2t}}{v_2}.$$

Bul teńliklerde v_1 arqalı bólekshelerdiń birinshi zattaǵı, al v_2 arqalı bólekshelerdiń ekinshi zattaǵı tezligi belgilengen. Joqarıda ayılǵan boyınsha $v_{2t} = v_{1t}$ teńligi orınlı dep esaplap

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{v_2}{v_1} \quad (7)$$

qatnasına iye bolamız.

Zatlardıń berilgen jubı ushın tezliklerdiń qatnası turaqlı shama bolıp tabıladı hám (7)-formula sınıw nızamın ańǵartadı. Biraq, onı ádettegi sınıw nızamı menen salıstırıp

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

hám bunnan

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

qatnasına iye bolamız. Solay etip, korpuskulalıq teoriya boyınsha eki zattıń sındırıw koefficientleri olardaǵı jaqtılıqtıń tezliklerine tuwrı proporcional. Korpuskulalıq teoriya boyınsha jaqtılıq optikalıq jaqtan tıǵızraq bolǵan zatta optikalıq tıǵızlıǵı kem bolǵan zattaǵıǵa qaraǵanda tezirek tarqaladı.

Kórinip turǵanıday, jaqtılıqtıń korpuskulalıq hám tolqınlıq teoriyaları hár qıylı ortalıqlardıń sındırıw koefficientleri menen olardaǵı jaqtılıqtıń tarqalıw koefficientleri arasındǵı hár qıylı ǵárezliklerge alıp keledi. Bul jaǵday eki teoriyanı da eksperimentallıq tekserip kóriwge múmkinshilik beredi. Bunday tekseriw aylanıwshı ayna usılınıń járdeminde kelte bazisti paydalanıp jaqtılıqtıń tezligin anıqlaw múmkin bolǵannan keyin tek 1868-jılı ǵana ótkerildi. Fuko aylanıwshı *A* aynası menen oyıs bolǵan *B* aynasınıń arasına (254-paragraftaǵı 21-súwret) suw menen toltırılǵan trubanı jaylastırdı. Bunday jaǵdayda, suw bolmaǵan jaǵdayda *S'* súwreti kóbirek jılısqan: tájiriybeniń nátiyjeleri tolqınlıq teoriyanıń nátiyjelerine sáykes keldi - optikalıq tıǵızlıǵı úlken bolǵan ortalıqta jaqtılıq optikalıq tıǵızlıǵı kishi bolǵan ortalıqtaǵıǵa salıstırǵanda ásterek tarqaladı eken. Biraq, tolqınlıq teoriya usı waqıtqa shekem de jaqtılıqtıń tolqın ekenligin dálilleytuǵın difrakciya hám interferenciya qubılısların izertlewlerdiń nátiyjesinde bekkem fundamentke iye bolǵan edi.

§ 256. Jaqtılıqtıń interferenciyası. Joqarıda kórsetip ótkenimizdey, XVII ásirdiń ózinde jaqtılıqtıń geometriyalıq saya oblastına aylanıp ótetuǵınlıǵı hám jaqtılıq dásteleriniń qosılıwınıń nátiyjesinde geometriyalıq saya oblastında jaqtılı hám qarańǵı jolaqlardan turatuǵın jolaqlardıń payda bolatuǵınlıǵı belgili boldı. Bul qubılıs *difrakciya qubılısı* atamasına, al jaqtılı hám qarańǵı jolaqlardıń payda bolıwına alıp keletuǵın jaqtılıq dásteleriniń qosılıwı qubılısı *jaqtılıqtıń interferenciyası* atamasına iye boldı. Interferenciya qubılısınan eki jaqtılıq dástesiniń qosılıwınıń saldarınan olardıń bir birin kúsheyttetuǵınlıǵı menen birge bir birin hálsiretetetuǵınlıǵı da kelip shıǵadı. Jaqtılıq aǵsınıń usı qásiyeti onıń tolqınlıq tábiyatqa iye ekenligin kórsetedi: eger bir sistemanıń tolqınlarınıń shoǵırları ekinshi sistemanıń tolqınlarınıń shoǵırlarına sáykes keletuǵın bolsa, onda tolqınlardıń eki sisteması bir birin kúsheytedi, al bir sistemanıń tolqınlarınıń oyıs orınları ekinshi sistemanıń tolqınlarınıń oyıs orınlarına sáykes kelgen jaǵdayda tolqınlardıń hálsirewi orın aladı. Interferenciya qubılısı mexikalıq tolqınlar ushın da belgili (mısalı suwdıń betindegi hám serpipmi akustikalıq tolqınlar ushın, I tom, 116-paragraf). Biraq, joqarıda ayılıp ótilgenindey, Nyuton jaqtılı hám qarańǵı jolaqlardıń payda bolıwın túsindiriwge tırısqa

bolsa da, optika oblastında jaqtılıq dásteleriniń qosılıwınıń nátiyjeleri birinshi ret 1802-jılı YUng tárepinen dál túrde tallandı. Nyuton jaqtılıqtı juqa móldir qatlamlarda shaǵılısıw menen olar arqalı ótkende onıń dáwirli qásiyetiniń bar ekenligin boljadı (jeńil shaǵılısıw hám ótiw "teksheleri"). YUngtıń tolqınlıq ideyaları XIX ásirdeń birinshi yarımında Frenel tárepinen keńnen rawajlandırıldı.

YUng mınaday tájiriybeni isledi: mólır emes ekrandaǵı kishi A tesigi (26-súwret) intensivli derek tárepinen jaqtılandırıladı. Gyuygens principi boyınsha ol yarım sferalıq tolqınlardıń deregi bolıp tabıladı. Bul tolqınlar B_1 hám B_2 kishi tesiklerine (sańlaqlarına) kelip túsedı, olar D oblastında birin biri jabatuǵın tolqınlardıń derekleri xızmetin atqaradı. B_1 hám B_2 sańlaqlarında terbelisler olarǵa kelip túsetuǵın bir tolqın tárepinen payda etiletuǵın bolǵanlıqtan, olar birdey fazada hám birdey amplitudalar menen terbeledi. B_1 hám B_2 sańlaqlarınan shıǵatuǵın tolqınlar D oblastınıń hár bir noqatında olar ótken joldıń uzınlıǵı boyınsha anıqlanatuǵın júrisler ayırması menen qosıladı. Júrislerdiń usınday ayırmasına ǵárezli olar bir birin kúsheytedi yamasa hál siretedi. Solay etip, jaqtılı hám qarańǵı jolaqlardıń izbe-iz jaylasıwı baqlanadı.

I tomnıń 109-paragrafında atap ótilgen jaǵdaylardan kelip shıqqan halda YUng tájiriybesiniń sxemasın tolıǵıraq qaraymız: *birdey dáwirge iye bolǵan tolqınlardıń arasındaǵı júrisler ayırması tolqın uzınlıǵı λ shamasına teń bolǵan jaǵdayda bir birin maksimallıq túrde kúsheytedi:*

$$\Delta = \pm k\lambda. \quad (1)$$

Bul teńlikte k - pútin san. *Júrisler ayırması pútin san eselengen yarım tolqın uzınlıǵına teń bolǵanda tolqınlar bir birin maksimallıq túrde hál siretedi:*

$$\Delta = \pm (2k + 1) \frac{\lambda}{2}. \quad (2)$$

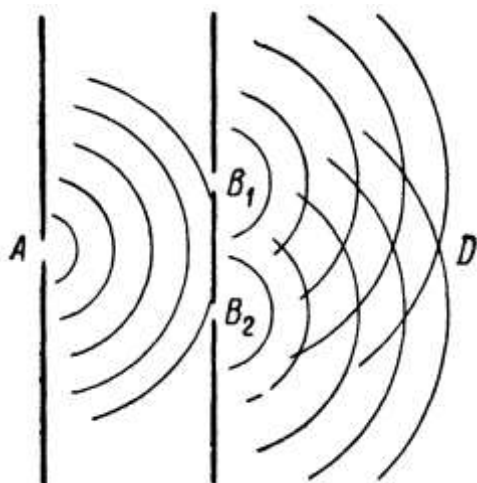
Meyli, tolqınlardıń B_1 hám B_2 noqatlıq derekleri bir birinen t (27-súwret) qashıqlıǵında jaylasqan bolsın. B_1 hám B_2 noqatlarında terbelislerdiń fazaları birdey boladı. Tolqınlardıń interferenciyasınıń nátiyjesin B_1 , B_2 noqatlarınan t qashıqlıǵına salıstırǵanda ádewir úlken bolǵan DD' ekranında baqlayıq. Ekrannıń orayı A noqatınan l qashıqlıǵında jaylasqan C noqatındaǵı tolqınlar ushın júrisler ayırması Δ nı anıqlaymız. t menen l shamaları L den kóp kishi bolǵan jaǵday ushın juwıq túrde

$$\frac{\Delta}{t} = \frac{l}{L}$$

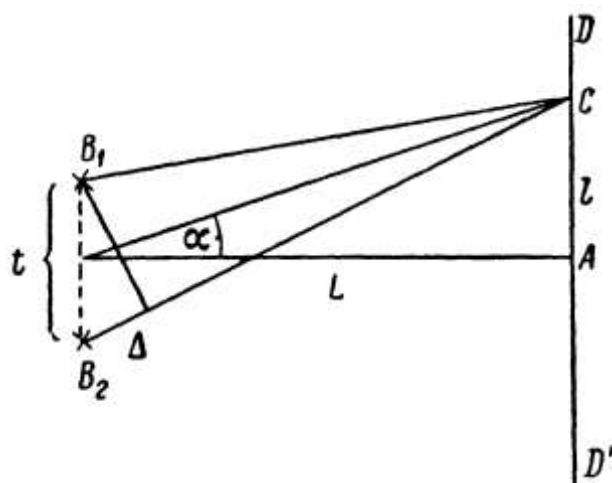
hám bunnan

$$\Delta = \frac{l}{L} t$$

teńliklerin alamız.



26-súwret. YUng tájiriybesiniń sxeması.

27-súwret. B_1C hám B_2C nurlarınıń júrisler ayırmasın esaplawğa.

(1)-shárt boyınsha

$$\Delta = \frac{l}{L} t = \pm k \lambda \quad (3)$$

teńligi orınlanatuǵın bolsa, onda C noqatında jaqtılı jolaqtı, al (2)-shárt boyınsha, eger

$$\Delta = \frac{l}{L} t = \pm (2k + 1) \lambda$$

teńligi orınlanatuǵın bolsa, qarańǵı jolaqtı alamız.

Bunnan ekranniń ortası A dan baslap esaplaǵanda jaqtılı jolaqlar tómendegidey qashıqlıqlarda jaylasadı:

$$\Delta l = \pm k \frac{\lambda}{t} L. \quad (4)$$

Bul teńlikte $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ Qarańǵı jolaqlar jaqtı jolaqlardıń arasında jaylasadı. Qońsıl jaqtı jolaqlardıń arasındaǵı Δl qashıqlıǵı

$$\Delta l = \frac{\lambda}{t} L \quad (4a)$$

shamasına teń.

Jaqtı jolaqlardıń turǵan orınların (3)-ańlatpa boyınsha $\alpha = \frac{l}{L}$ múyeshi menen de anıqlawğa boladı (27-súwret):

$$\alpha = k \frac{\lambda}{t}.$$

Qońsıl jaqtı hám qarańǵı jolaqlardıń arasındaǵı múyeshlik qashıqlıq $\Delta \alpha$ mınaǵan teń:

$$\Delta \alpha = \frac{\lambda}{t}. \quad (4b)$$

(4b) teńliginen jolaqlardıń arasındaǵı múyeshlik qashıqlıqtıń $\frac{\lambda}{t}$ qatnasınıń, yaǵnıy tolqın uzınıǵı λ niń dereklerdiń arasındaǵı qashıqlıq t ǵa qatnasınıń járdeminde anıqlanatuǵınlıǵı kórinip tur. Bul $\frac{\lambda}{t}$ qatnasınıń shamasınıń kishi bolmawı kerek, sebebi bul qatnas kishi bolǵan jaǵdaylarda interferenciyalıq jolaqlar bir birine júdá kishi múyeshlik qashıqlıqlarda jaylasadı. Tájiriybe jolaqlardıń arasındaǵı múyeshlik qashıqlıqtıń sezilerliktey bolıwı ushın B_1 hám B_2 noqatlıq derekleriniń arasındaǵı qashıqlıqtıń júdá kishi bolıwınıń kerek ekenligin kórsetedi. Mısalı, $\Delta \alpha = 10^{-3}$ qashıqlıǵı (bul $L = 1$ m bolǵan jaǵdaydaǵı jolaqlar arasındaǵı 1 mm bolǵan qashıqlıqqa sáykes keledi) B_1 menen B_2 sańlaqları bir birinen $t = 0,5$ mm bolǵan qashıqlıqta jaylasqan jaǵdayǵa sáykes keledi. (4b) boyınsha

$$\lambda = \Delta \alpha \cdot t$$

teńligi orınılı bolǵanlıqtan, jaqtılıqtıń uzınlıǵınıń júdá kishi, shama menen $5 \cdot 10^{-5}$ sm ge teń ekenligin tabamız.

Aq jaqtılıqtı baqlaǵanda $k = 0$ shártı orınılı bolǵan oraylıq jolaqtan basqa barlıq jolaqlar hár qıylı reńlerge iye boladı hám baqlanatuǵın jolaqlardıń sanı úlken emes. Qanday da bir reńdegi jaqtılıqtı baqlaǵanda jolaqlar top sonday reńge iye boladı hám jolaqlardıń sanı kóbeyedi. Qızıl jaqtılıqtı baqlaǵanda jolaqlar bir birinen úlken $\Delta\alpha$ múyeshlik qashıqlıqlarda, al kók jaqtılıq penen ótkerilgen baqlawlarda kishi $\Delta\alpha$ múyeshlik qashıqlıqlarda jaylasadı. *Bunnan hár qıylı reńlerge iye bolatuǵın jaqtılıqlardıń hár qıylı tolqın uzınlıqlarına iye bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı: qızıl nurlar úlken, al kók nurlar bolsa kishi tolqın uzınlıǵına iye; aq jaqtılıq hár qıylı tolqın uzınlıǵına iye bolǵan tolqınlardıń, yaǵnıy hár qıylı reńge iye tolqınlardıń aralaspasınan turadı. Ólshepler hár qıylı reńlerdiń nurlarına II keste de mikronlarda (millimetrdiń mıńnan bir úlesi) keltirilgen tolqın uzınlıqlarınıń shama menen alıńǵan intervalları sáykes keledi.*

Tolqın uzınlıqları 0,76 mkm den úlken hám 0,40 mkm den kishi bolǵan jaqtılıqtı adamnıń kózi qabıl etpeydi. Olardıń birinshilerin *infraqızıl*, al ekinshilerin *ultrafiolet* nurlar dep ataydı. Qanday de bir belgili bolǵan tolqın uzınlıǵına iye jaqtılıqtı *monoxromat jaqtılıq* dep ataydı.

Aq jaqtılıqta úlken k larda hár qıylı reńlerge iye bolǵan jolaqlar bir biriniń ústine túsedi hám teń ólshewli jaqtılandırıwdı beredi. Aq jaqtılıqta interferenciyalıq jolaqlardıń az ekenligi usı jaǵday menen túsindiriledi.

II keste.

Jaqtılıqtıń reńi	Mikronlardaǵı λ tolqın uzınlıqlarınıń shama menen alıńǵan intervalı
Qızıl	0,76 – 0,63
Qızǵılt sarı (oranjeviy)	0,63 – 0,60
Sarı	0,60 – 0,57
Jasıl	0,57 – 0,50
Kók-jasıl	0,50 – 0,45
Kók	0,45 – 0,43
Fiolet	0,43 – 0,40

YUng tájiriyesinde B_1 , B_2 hám A sańlaqlarınıń kishi bolıwınıń kerek ekenligin atap ótiw kerek. A sańlaǵınıń ólshepleri júdá kishi bolǵan jaǵdayda ǵana onnan keyin sferanıń bir bólimi bolıp tabılatuǵın durıs tolqın frontı payda boladı. Al bul jaǵday B_1 , B_2 sańlaqlarındaǵı terbelislerdiń fazasınıń birdey bolıwın támiyinleydi. Usınıń nátiyesinde C ekranınıń qálegen noqatında bir biri menen qosılatuǵın tolqınlardıń belgili bolǵan júrisler ayırması támiyinlenedi. Turaqlı fazalar ayırması bolmaǵan jaǵdayda ekrannıń betindegi belgili bir orında tolqınnıń barlıq waqıtta kúsheyiwi orın almaydı hám soǵan sáykes jolaqlardıń jayılıwı júzege keledi. Ekrandı bir birinen ǵárezsiz bolǵan eki derek penen jaqtılandırǵanda ekrannıń noqatlarında turaqlı júrisler ayırması alınbaydı hám bunday jaǵdayda interferenciyalıq jolaqlar payda bola almaydı. Birdey fazada yamasa fazalar ayırması turaqlı bolıp terbeletuǵın derekler *kogerent derekler* dep ataladı. Tek kogerentli derekler ǵana belgili bolıp jaylasqan interferenciyalıq jolaqlardı beredi.

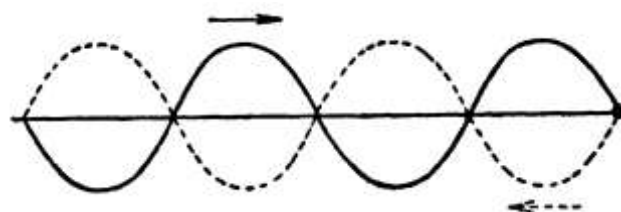
Bir birinen ǵárezsiz bolǵan eki derek, misalı shamlar yamasa elektr lampochkaları kogerentli emes. Olardıń hár biri bir birinen ǵárezsiz elementar nurlandırǵıshlar bolǵan oǵada kóp sanlı atomlar menen molekulalardan turadı. Eki derektiń atomlarınıń terbelisleriniń fazalarınıń arasında hesh qanday turaqlı qatnas joq. Sonlıqtan, eki derektiń barlıq atomlarınan shıǵatuǵın terbelisler bir birine qosılıp, ortasha teń ólshewli jaqtılandırıwdı beredi. Biraq, usınday jaǵdayǵa qaramastan bir derekten shıqqan jaqtılıqtı eki dástege ajratıw jolı menen jasalma túrde kogerent

derekler payda etiletuğın tájiriybelerdiń hár qıylı sxemaların júzege keltiriw múmkin. Usında tájiriybeler keyinirek táriyiplenedi (261-paragraf).

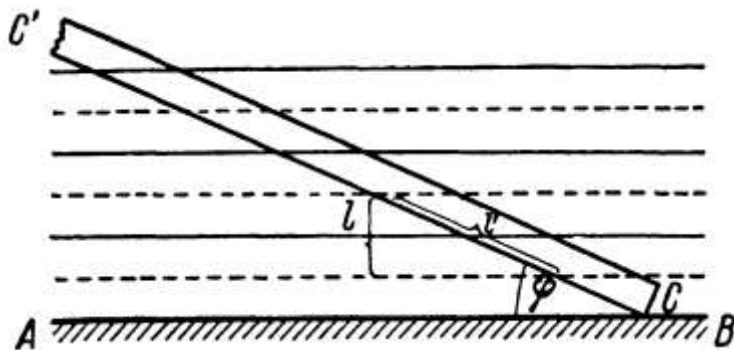
§ 257. Turğın tolqınlardıń payda bolıwı. I tomda tolqınlardıń kinematikasın tallağanda tek bir bağıtta tarqalatuğın tolqınlardıń interferenciyasınıń bolıp ǵana qoymay, bir birine qarama-qarsı tarqalatuğın tolqınlardıń interferenciyasınıń da bolatuğınlǵın kórdik. Birdey jıyılıkke hám birdey amplitudaǵa iye bolǵan ushırasıwshı tolqınlardı qosqanda túyinlerdiń, yaǵnıy terbelisler barlıq waqıtta bir birin kompensaciyalaytuğın orınlardıń bar bolatuğınlǵı menen táriyiplenetuğın *turğın tolqınlar* dep atalatuğın tolqınlar payda boladı (28-súwret). Qońsılas túyinler bir birinen $\lambda/2$ qashıqlıǵında jaylasadı, bir birinen tap usınday qashıqlıqta shoǵırlar dep atalatuğın orınlar da jaylasadı. Túyin menen oǵan eń jaqın shoǵırdıń arasındaǵı qashıqlıq $\lambda/4$ ke teń. Mısalı, mexanikalıq tolqınlar oblastında tardıń boyı menen tarqalatuğın tolqınlardıń onıń ushında shaǵılısıwınıń saldarınan payda boladı. Eger tardıń ushı bekitilgen bolsa, onda bul orında túyin payda boladı (28-súwret). Bul bekitilgen ushtaǵı shaǵılısıwda yarım tolqın uzınlıǵınıń joǵalıwı menen baylanıslı.

28-súwret.

Bir biri menen ushırasatuğın eki tolqınnıń interferenciyasınıń saldarınan turğın tolqınnıń payda bolıwı.



Turğın jaqtılıq tolqınları eksperimentlerde birinshi ret O.Viner tárepinen 1890-jılı baqlandı. Tolqın uzınlıǵı belgili bolǵan tolqın AB metall aynasında shıǵılıstırdı (29-súwret) hám turğın tolqınnıń sisteması payda etilgen. Aynaǵa súyir φ múyeshi menen shiyshe CC' plastinkası jaylastırılǵan hám onıń betinen kollodiyden islengen fotografiyalıq emulsiyanıń júdá juqa qatlamlı jabıstırılǵan (qatlamların kalırılıǵı jaqtılıq tolqınınıń uzınlıǵınıń $1/20$ bólegine teń).



29-súwret. Aynanıń betiniń qasında turğın tolqınlardıń payda bolıwı.

Shoǵırlar payda bolǵan orınlarda (29-súwrette punktir menen belgilengen) fotografiyalıq process bolıp ótedi: ximiyalıq qayta islengennen keyin fotoplastinkanıń usınday orınları qarawıtqan bolıp shıǵadı; túyinler payda bolǵan orınlarda emulsiyanıń qatlamlı ózgerissiz qaladı. Joqarıda ayılǵanlarǵa sáykes, shoǵırlardıń arasındaǵı qashıqlıq bolǵan l diń shaması $\lambda/2$ ge, yaǵnıy jaqtılıq tolqınınıń yarımına teń. Fotoplastinkanıń qarawıtqan orınlarınıń arasındaǵı qashıqlıq l' mınaǵan teń:

$$l' = \frac{l}{\sin \varphi} = \frac{\lambda}{2 \sin \varphi}.$$

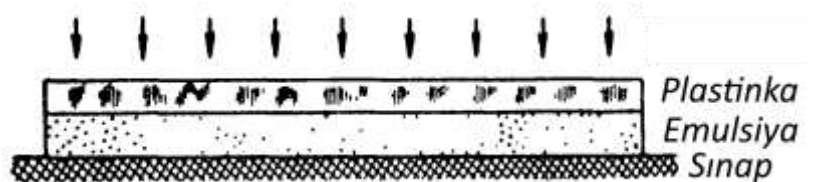
φ múyeshiniń shaması kishi bolǵan jaǵdayda l' qashıqlıǵınıń shaması tolqın uzınlıǵı λ den kóp úlken. Bul jaǵday plastinkada payda bolǵan qara jolaqlardı qıyınshılıqsız baqlawǵa múmkinshilik beredi. Vinerdiń tájiriybelerinde φ múyeshiniń mánisi $1'$ mm shamasına teń etip alındı. Bunday

jaǵdayǵa l' tırnánisi 1 mm shamasında bolǵan. Aynanıń betiniń qasında túyin jaylasadı, al bul jaǵday jaqtılıqtırn aynada shaǵılısında fazasınıń π ge ózgeretuǵınıń kórsetedi.

Turǵın tolqınlarda metall shaǵılastırwshı bettiń qasındaǵı túyinniń payda bolıwın fosforescenciya qubılısın paydalanıp baqlawǵa boladı. Onıń ushın shaǵılastırwshı shıyshe plastinkanıń bir bólimin gúmisleydi. Bunnan keyin barlıq plastinka qalıńlıǵı jaqtılıq tolqınıńnıń uzınıǵınan kishi bolǵan fosforesciyalanıwshı zattıń juqa qatlamı menen qaplaydı. Plastinka fosforescenciyanı júzege keltire alatuǵın uzınıǵı belgili bolǵan jaqtılıq penen jaqtılandırıladı. Bunday jaǵdayda gúmis joq orınlardaǵı fosforesciyalanatuǵın zattıń qatlamınıń jaqtılıqtı shıǵaratuǵını baqlanǵan. Bul qubılıstırn mánisi mınadan ibarat: gúmisten jaqtılıq shıǵılısqanda túyinler shaǵılastırwshı bettiń qasında payda boladı (SHiysheniń betinshe shaǵılısqanda turǵın tolqınlar payda bolmaydı, sebebi shaǵılısqan jaqtılıqtırn amplitudası kelip túsken jaqtılıqtırn amplitudasınan kóp kishi).

Turǵın tolqınlardıńnıń payda bolıwın reńli fotosúwretlerdi alıw ushın paydalanıwǵa boladı. Emulsiyanıń qalıń qatlamına iye Fotografiyalıq plastinka sınap aynaǵa tiyip turadı (30-súwret). Normal baǵıtta túsetuǵın jaqtılıq plastinkanıń qatlamınıń ishinde turǵın tolqınlardı payda etedi. Fotografiyalıq process tek shoǵırlar bar bolǵan orınlarda ǵana júzege keledi. Nátiyjede súwretti shıǵargannan keyin plastinkanıń betine parallel bolǵan ajıralıp shıqqan gúmistıń bir qatar qatlamları payda boladı⁵. Eger fotosúwret túsirilgende plastinka tolqın uzınıǵı λ_1 bolǵan jaqtılıq penen jaqtılandırılǵan bolsa, onda gúmislenge qatlamlardıń arasındaǵı qashıqlıq $\lambda_1/2$ ge teń. Eger keyin bul plastinkanı onıń betine normal baǵıtta túsetuǵın jaqtılıqta baqlasaq, onda jaqtılıq gúmislenge qatlamlardıń izbe-iz qatarında shaǵılısadı hám qońsıl qatlamlarda shaǵılısqan tolqınlardıń júrisler ayırması λ_1 ge teń boladı. Eger túsetuǵın jaqtılıq tolqınıńnıń menshikli uzınıǵı $\lambda = \lambda_1$ bolsa, onda shaǵılısqan tolqınlar interferenciyanı, bir birin kúsheytedi. Tolqın uzınıǵı basqa bolǵan barlıq tolqınlar ushın júrisler ayırması λ_1 den ózgeshe hám, sonlıqtan, olar bir birin kúsheyte almaydı. Haqıyqatında da, meyli, misalı, qońsıl qatlamlarda shıǵılısqan nurlardıń júrisler ayırması $\lambda/4$ ke teń bolsın. Bunday jaǵdayda birinshi hám úshinshi qatlamlarda shaǵılısqan nurlardıń júrisler ayırması $\lambda/2$ ge teń boladı hám olar bir birin sóndiredi; tap sol sıyaqlı ekinshi hám tórtinshi qatlamlarda shaǵılısqan nurlar da bir birin sóndiredi h.t.b.

30-súwret. Turǵın tolqınlardıń járdeminde reńli fotosúwretti alıwdıń usılı.



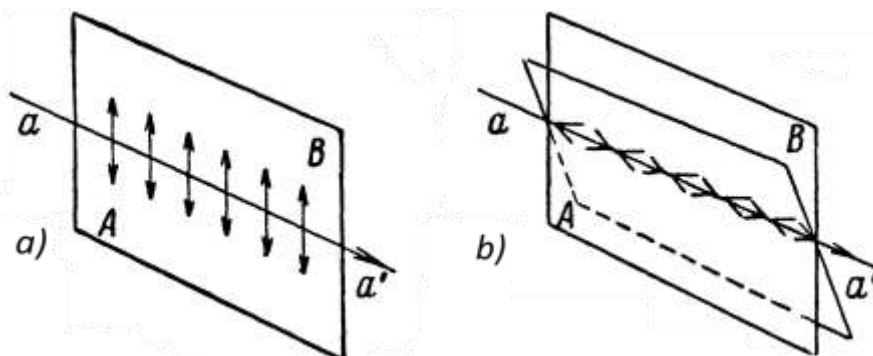
Ulıwma jaǵdayda, qońsıl qatlamlarda shaǵılısqan tolqınlardıń júrisler ayırması $p\lambda$ shamasına teń bolǵan (bul kóbeymede $p < 1$) ulıwma jaǵdayda birinshi hám k -qatlamlarda, ekinshi qatlam menen $(k + 1)$ -qatlamlarda shaǵılısqan nurlar bir birin hásiretedi h.t.b. Bul jaǵdayda k shaması mınaday shártti qanaatlandıradı $k - 1 = \frac{1}{2p}$.

Eger plastinkanı aq jaqtılıq penen jaqtılandıratuǵın bolsa, onda usı aq jaqtılıqtı payda etetuǵın barlıq tolqın uzınlıqlarınıń ishinde $\lambda = \lambda_1$ shártin qanaatlandıratuǵın tolqınlar ǵana kúsheyedi. Solay etip, shaǵılısqan jaqtılıqta plastinkanıń reńli fotosúwret túsirilgen jaqtılıqtırn reńine sáykes keledi.

§ 258. Jaqtılıqtırn polarizaciya. Bunnan burınǵı paragraflarda táriyiplengen interferenciya qubılısın jaqtılıq nurları kóldeneń dep te, boylıq dep te túsindiriwge boladı. Biraq kóldeneń hám

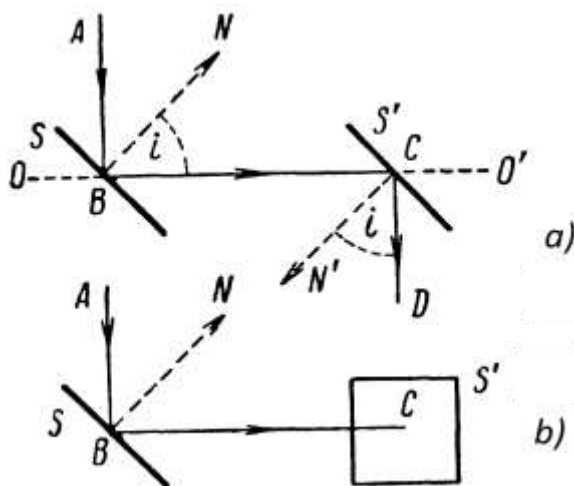
⁵ Fotoplastinkada payda bolǵan jasırın súwrettiń kórinıwı ushın usı fotoplastinkanı ximiyalıq jaqtan qayta isleydi. Bunday qayta islewdi rus tilinde "proyavlenie fotoplastinki" dep ataydı. Sonlıqtan "proyavlenie" sózin qaraqalpaq tiline awdarǵanda "shıǵarıw" ("súwretti shıǵarıw") sózin paydalanamız. Bunday jaǵdayda "proyavlenie fotoplastinki" sózi qaraqalpaq tilinde "súwretti shıǵarıw" sózi menen almasıdırıladı.

boyliq toʻlqinlardir arasindagi ayirma kʻorinetugin processler de bar. aa' baʻgıtında tarqalatuʻin kʻoldeneʻn toʻlqında (31a sʻúwret) zattir barliq noqatları belgili bolʻgan AB tegisliginde terbeledi. Demek, kʻoldeneʻn toʻlqin usı toʻlqinnir tarqaliw baʻgıtı arqalı ʻotetuʻin hár qiyli tegisliklerge qatnası boyınsha hár qiyli qásiyetlerge iye boladı. Boyliq toʻlqında bolsa terbelisler toʻlqinnir tarqaliw baʻgıtı bolʻgan aa' baʻgıtında terbeledi hám onir qásiyetleri onir tarqaliw baʻgıtı arqalı ʻotetuʻin qálegen AB tegisligine qatnası boyınsha birdey.



31-súwret. a) kʻoldeneʻn toʻlqındaǵı hám b) boyliq toʻlqındaǵı terbelislerdir sxeması.

Jaqtılıqtır kʻópshilik derekleri, misalı qızdırılǵan deneler tárepinen shıǵarılatuǵın jaqtılıqta onir terbelislerini kʻoldeneʻn xarakterge iye ekenligin kʻórsetetuǵın qásiyetlerge iye emes. Jaqtılıq terbelislerini kʻoldeneʻnligin jaqtılıq bazı bir ʻózgerislerge ushıraǵannan keyin, misalı móldir deneni shegarasınan shaǵılısqannan keyin tabıwdır sáti túsedı. Meyli, AB nurı (32-súwret) tegis S betini B noqatında i múyeshi menen shaǵılısatuǵın, al bunnan keyin S' betindeǵı C noqatında tap sonday i múyeshi menen ekinshi ret shaǵılısatuǵın bolsın.



32-súwret. Eki shiyshe betten shaǵılısqandaǵı jaqtılıqtır polarizaciyanı baqlaw.

S' kósherini túsiwshi BC nurını baʻgıtına sáykes keletuǵın OO' kósheriniń dógereginde turǵanda túsiw múyeshi i diń mánisi ʻózgermeydi, al S túsiw betine salıstırǵandaǵı S' betindeǵı túsiw tegisliginiń ornı ʻózgeredi. Tájiriýbeler CD nurınıń intensivliginiń eki túsiw múyeshleriniń bir birindeǵı salıstırǵandaǵı orınlarınan ǵárezli ekenligin kʻórsetedi: túsiw tegislikleri bir birine parallel bolʻgan jaǵdayda CD nurı maksimallıq (32a sʻúwret) hám olar bir birine perpendikulyar bolʻanda minimallıq intensivlikke iye (32b sʻúwret).

Solay etip, birinshi shaǵılısqannan keyin jaqtılıqta shaǵılısqan nurlardıń intensivliginiń túsiw múyeshiniń orientaciyanı ǵárezligi baqlana baslaydı. Usınday qásiyetke iye jaqtılıqtı polarizaciyalanǵan jaqtılıq dep ataydı.

i túsiw múyeshiniń belgili bir mánislerinde hám eki plastinkağa túsiw tegislikleri óz-ara perpendikulyar bolǵan jaǵdayda nur ekinshi plastinkada pútkilley shaǵılıspaydı. Bunday jaǵdayda jaqtılıqtı *polyarizaciyalanǵan* dep ataladı. *Bryuster tárepinen ashılǵan nızam boyınsha*

$$\operatorname{tg} i = n \quad (1)$$

shárti orınlanǵanda jaqtılıq tolıǵı menen polyarizaciyalanadı. Bul teńlikte n arqalı shaǵılısıw orın alatuǵın zattıń sındırıw koefficienti belgilengen⁶. Bryuster nızamın qanaatlandıratuǵın múyesh penen móldir betten shaǵılısqan jaqtılıqtı *túsiw tegisliginde polyarizaciyalanǵan* dep ataydı. Polyarizaciya tegisligi haqqında usınday túsinikti kirgizip mınaday gápti aytıwǵa boladı: polyarizaciya tegisligi túsiw tegisligine sáykes kelgende polyarizaciyalanǵan nurlar maksimallıq intensivlikte shaǵılısadı; polyarizaciya tegisligi túsiw tegisligine perpendikulyar bolǵan jaǵdayda nurlar pútkilley shaǵılıspaydı.

Eger jaqtılıq tolqınlarınıń kóldeneń ekenligin esapqa alatuǵın bolsaq, onda joqarıda keltirilgen faktlerdi ańsat tallawǵa boladı. Jaqtılıqtıń derekleriniń kópshiligi tárepinen shıǵarılatuǵın jaqtılıq tolqınlarına terbelisler tártipke túspegen - hár qıylı tegisliklerdegi terbelisler orın aladı. Usınday bolıp terbeliske sáykes keletuǵın jaqtılıqtı *tábiyiy jaqtılıq* dep ataydı. Toliq emes polyarizaciyalanǵan jaqtılıqta terbelislerdiń kópshiligi bir tegislikte, al tolıq polyarizaciyalanǵan jaqtılıqta bolsa, 31a súwrette kórsetilgende, terbelisler belgili bolǵan tegislikte júzege keledi. Móldir zattıń shagarasınan shaǵılısatuǵın jaqtılıqtıń intensivligi terbelisler tegisliginiń túsiw tegisligi menen qanday múyesh jasaytuǵınlıǵınan gárezli.

Terbelisler tegisliginiń joqarıda shártli túrde kirgizilgen polyarizaciya tegisligi menen sáykes keletuǵınlıǵı yamasa sáykes kelmeytuǵınlıǵı ayqın emes bolǵanlıqtan terbelisler tegisligi menen túsiw tegisligi arasındagı múyeshtiń qanday mánisinde tolqınlardıń maksimallıq intensivlik penen shaǵılısatuǵınlıǵı ózinen-ózi ayqın emes. Bul mäseleni 259- hám 277-paragraflarda gáp etilgen jaqtılıqtıń elektromagnitlik teoriasınıń tiykarında sheshiwge boladı.

Bryuster nızamı haqqında gáp etkende jaqtılıqtı boslıq penen shegaralasatuǵın móldir zattıń shegarasına túsedı dep esapladiq hám tek shaǵılısqan nurǵa itibar berdik. Endi jaqtılıqtıń sındırıw kórsetkishleri n_1 hám n_2 bolǵan eki zattıń arasındagı shegara arqalı jaqtılıqtıń ótiwin tolıǵıraq qaraymız. AB nurı eki zattıń shegarasına i_1 múyeshi menen kelip túskende eki nur payda boladı (33-súwret): shaǵılısqan BC hám sınǵan BD nurları. Sınǵan nur menen normaldıń arasındagı i_2 múyeshi sınıw nızamı tiykarında mınaǵan teń:

$$\sin i_1 = \frac{n_1}{n_2} \sin i_2. \quad (2)$$

Meyli, túsiwshi AB nurı tábiyiy, yaǵnıy onda qálegen baǵıttaǵı terbelisler bolatuǵın bolsın. Eger túsiw múyeshi endi

$$\operatorname{tg} i_1 = \frac{n_1}{n_2} \quad (1a)$$

túrine iye bolatuǵın Bryuster nızamın qanaatlandıratuǵın bolsa, onda bunday jaǵdayda sınǵan BD nurı *túsiw tegisligine perpendikulyar bolǵan tegislikte tolıq emes polyarizaciyalanǵan boladı.* Túsiwshi tábiyiy nurda sınǵan nur hesh waqıtta da tolıq polyarizaciyalanǵan bolmaydı. i_1 túsiw múyeshi Bryuster múyeshine teń bolsa, onda onıń polyarizaciyasınıń dárejesi maksimallıq mánisine jetedi.

Bryuster nızamı orınlanǵanda (1a) formulasınan mınaǵan iye bolamız:

$$\sin i_1 = \frac{n_1}{n_2} \cos i_1.$$

$\sin i_1$ diń bul mánisin (2)-ańlatpaǵa qoyıp, mınanı alamız:

$$\cos i_1 = \sin i_2.$$

⁶ Haqıyqatında, Bryuster múyeshi menen shaǵılısqanda jaqtılıq ellipslik polyarizaciyanıń islerine iye boladı hám bul bette bir tekli plenkanıń bar bolıwı menen túsindiriledi.

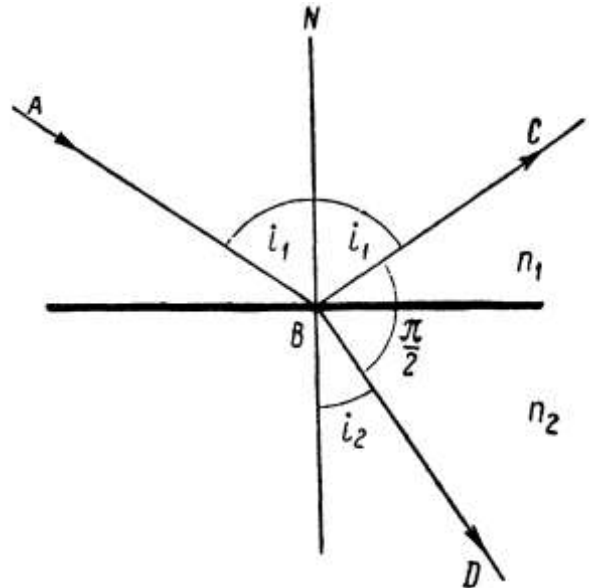
i_1 múyeshi de, i_2 múyeshi de súyir bolǵanlıqtan, sońǵı teńlikten

$$i_1 + i_2 = \frac{\pi}{2} \quad (3)$$

teńligi kelip shıǵadı. Bunnan birinshi gezekte jaqtılıq Bryuster múyeshi menen eki móldir zattıń shegarasına kelip túskende shaǵılısqan hám sınǵan nurlardıń óz-ara perpendikulyar bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı.

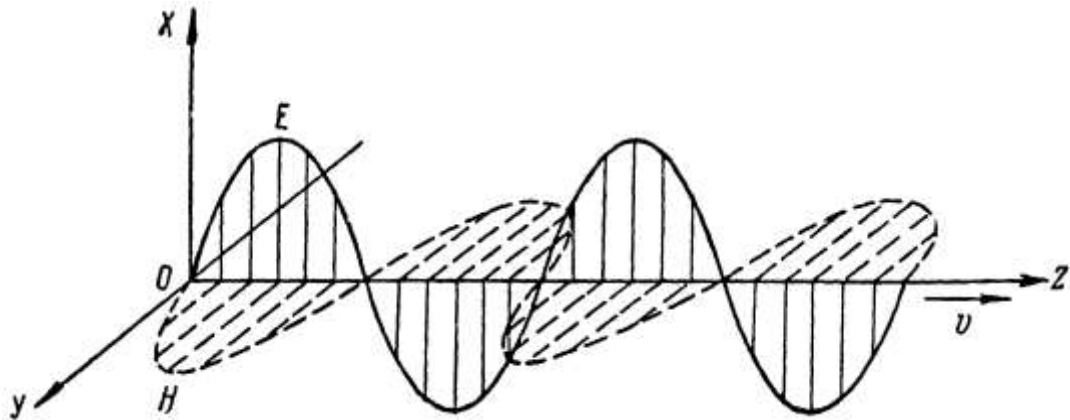
33-súwret.

Jaqtılıq Bryuster múyeshi menen kelip túsetuǵın jaǵdayda BC shaǵılısqan nuri sınǵan BD nurına perpendikulyar.



§ 259. Jaqtılıqtıń elektromagnitlik teoriiyası. XIX ásirdeń jetpisinshi jılları Maksvell elektromagnit tolqınlarınıń payda bolıwına alıp kelgen elektromagnit qubılıslarınıń teoriiyasın rawajlandırdı (II tom, 246-paragraf). Elektromagnit tolqınları olar ushın móldir bolǵan zatlardıń shegarasında shaǵılısadı hám sinadı, difrakciya menen interferenciya, polarizaciya qubılısların júzege keltiredi. Elektromagnit tolqınları kóldeneń. Barlıq qásiyetleri boyınsha olar jaqtılıq tolqınlarına uqsas. Elektromagnit tolqınları menen jaqtılıq tolqınlarınıń bir ekenligin túpkilikli túrde dálillew ushın olardıń boslıqta birdey tezlik penen tarqalatuǵınlıǵın kórsetiw zárúr boldı. Maksvell teoriiyası elektromagnitlik tolqınlardıń boslıqtaǵı tarqalıw tezligin esaplawǵa múmkinshilik berdi. Onıń shaması toq kúshiniń elektromagnit birliginiń elektrostatikalıq birligine qatnasına teń bolıp shıqtı. Bunnan jaqtılıqtıń boslıqtaǵı tezligin teoriya boyınsha elektromagnit tolqınları tarqalıwı kerek bolǵan tezlik penen salıstırıwdıń múmkinshiligi kelip shıǵadı. Bunday salıstırıwdıń múmkin ekenligine birinshi ret toqtıń elektromagnitlik hám elektrostatikalıq birliklerin salıstırıwdıń dál usılın islep shıqqan A.G.Stoletov itibar berdi. Óziniń aldın-ala ótkergen ólshewleriniń nátiyjelerin A.G.Stoletov 1876-jılı rus tábiyat izertlewshileriniń sezinde bayanladı. Házirgi waqıtları toqtıń kúshiniń elektromagnitlik hám elektrostatikalıq birlikleriniń qatnası joqarı dálilikte ólshengen: onıń ushın $(2,9978 \pm 0,0001) \cdot 10^{10}$ sm/sek mánisi alınǵan. Bul shama ólshewlerdiń qátelikleriniń sheklerinde $(2,99776 \pm 0,00004) \cdot 10^{10}$ sm/sek shamasına teń bolǵan boslıqtaǵı jaqtılıqtıń tezligine teń. Usınday jollar menen jaqtılıqtıń elektromagnitlik teoriiyası payda boldı hám bul keyinirek kóp sanlı faktlerde tastıyıqlandı. Olardıń bir qatarın bizler aldımızda kórsetemiz. Elektr vibratorlarınıń qasında payda bolatuǵın elektromagnit tolqınları menen jaqtılıq tolqınları tek tolqın uzınlıǵı menen ǵana ayrıladı: elektromagnit tolqınlarıdıń tolqın uzınlıǵınıń shaması metrler, al jaqtılıq tolqınları ushın tolqın uzınlıǵı $5 \cdot 10^{-5}$ sm shamasında. Úlken uzınlıqqa iye elektromagnit tolqınları makroskopiyalıq denelerdegi elektr zaryadlarınıń terbelisleriniń, al jaqtılıq tolqınları bolsa atomlar menen molekulalardıń ishindegi elektronlardıń terbelisleriniń saldarınan payda boladı.

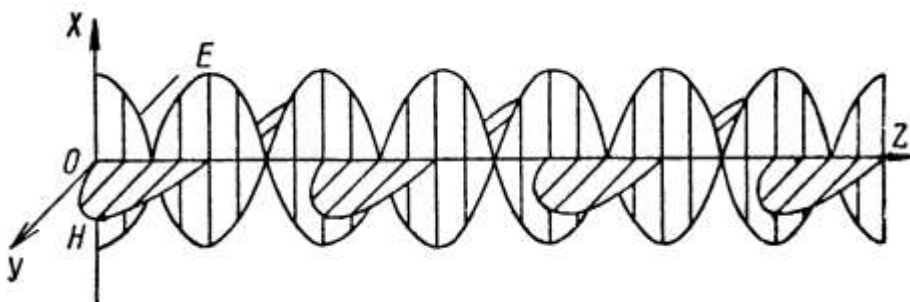
Elektromagnit tolqın eki vektordıń terbelisi menen táriyiplenedi: elektr kernewligi vektorı E hám magnit kernewligi vektorı H (II tom, 246-paragraf). Eki vektor da bir birine perpendikulyar tegisliklerde hám birdey fazada terbeledi. Tolqınń tarqalıw tezligi v sol eki E hám H vektorlarınń baǵıtlarına perpendikulyar.



34-súwret. Elektromagnit tolqın.

34-súwrette tutas sızıq penen kórsetilgen E vektorınıń terbelisleri XOZ tegisliginde, al punktir sızıq penen kórsetilgen H vektorınıń terbelisleri YOZ tegisliginde júzege keledi, tolqın OZ kósheriniń oń baǵıtına qaray tarqaladı.

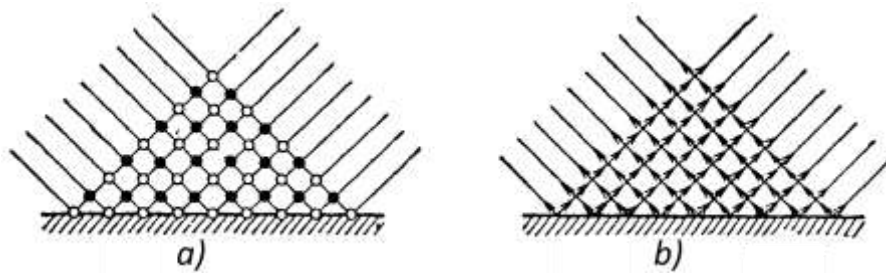
Jaqtılıqtı efirdegi serpimli tenbelislerdiń tarqalıwı dep qaraǵan Gyuygens-Frenel teoriyası efirdiń bóleksheleriniń teń salmaqlıq ornınan awısıwın anıqlaytuǵın tek bir vektor menen is alıp baradı. Eki móldir deneniń arasında shaǵılısqan, sıǵan hám polarizaciyalanǵan nurlardıń intensivligin anıqlawda úlken qıyınshılıqlarǵa ushırastı. Jaqtılıqtıń eki móldir deneniń arasındaqı shegara arqalı ótiwi menen baylanıslı bolǵan qubılıslardı táriyiplegende túsiwshi jaqtılıqtıń qanday bóliminiń shaǵılısatuǵınlıǵın, qanday bóliminiń sınatuǵınlıǵın hám shaǵılısqan jáne sıǵan nurlardıń polarizaciyalarınń qanday halda bolatuǵınlıǵın kórsetiw kerek. 251-paragrafta shaǵılısqan hám sıǵan nurlardıń úlesleriniń bir biri menen shegaralasatuǵın zatlardıń berilgen jubı ushın túsiw múyeshinen ǵárezli ekenligi kórsetilgen edi. Tap usınday bolıp, nurlardıń polarizaciya halı da jaqtılıq túsetuǵın hám sınatuǵın múyeshlerden ǵárezli boladı.



35-súwret. Turǵın elektromagnit tolqın.

Joqarıda keltirilgen ǵárezliklerdiń barlıǵın XIX ásirdiń basında Frenel birinshi bolıp taptı. Frenel serpimli efir teoriyasın paydalandı. Biraq, eki serpimli zattıń arasındaqı ajıratıp turatuǵın bettegi zárúrli bolǵan shegaralıq shártlerdi orınlaǵanda jaqtılıq terbelisleriniń tolıq emes boylıq xarakterge iye bolıwınıń kerek ekenligi kelip shıǵadı. Nátiyjede shaǵılısqan nurdıń túsiw múyeshiniń hesh bir mánisinde tolıq polarizaciyalanǵan bolıwı múmkin emes ekenligi kórinedi. Biraq, bul jaǵday tájiriybelerdıń nátiyjelerine qayshı keledi. Payda bolǵan qıyınshılıqtan qutılıw ushın Frenelge hár qıylı zatlardaǵı efirdiń serpimligin birdey, al onıń tıǵızlıǵı hár qıylı dep esaplawǵa tuwrı keldi. Biraq bul gipoteza teoriyanı kristallar ushın ulıwmalastırıwlarda bir qatar

qiyinshılıqlar menen ushırası. Qarama-qarsılıqlarğa iye bolmağan Frenel formulaların tek jaqtılıqtıń elektromagnitlik teoriyasınıń tiykarında keltirip shıǵarıldı (277-paragrafqa qarańız). Bunday jaǵdayda elektromagnit teoriya nurlardıń Bryuster múyeshi menen shaǵılısqanda shaǵılısqan nurda $\mathbf{E}$ vektorınıń túsiw tegisligine perpendikulyar tegislikte, al magnit maydanı bolsa túsiw tegisliginde terbeletuǵınlıǵın kórsetedi. 258-paragrafta Bryuster múyeshi menen shaǵılısqan nurdıń túsiw tegisliginde polarizaciyalanǵanlıǵı kórsetildi. Solay etip, polarizaciyalanǵan tolqında elektr vektorı $\mathbf{E}$ niń polarizaciya tegisligine perpendikulyar baǵıtta terbeletuǵınlıǵın, al magnit vektorı $\mathbf{H}$ tıń polarizaciya tegisliginde terbeletuǵınlıǵı kelip shıǵadı.



36-súwret. Polarizaciyalanǵan jaqtılıqtaǵı turǵın tolqınlar menen ótkerilgen tájiriýbeniń sxeması.

Eki zattıń arasındadı shegarada elektrlik hám magnitlik vektorları hár qıylı shegaralıq shártlerge baǵınadı. Bul mınaday jaǵdayǵa alıp keledi: metall aynanıń betinshe shaǵılısqandın saldarınan turǵın tolqınlar payda bolǵanda elektrlik vektordıń shoǵırları magnitlik vektordıń túyinlerine sáykes keletuǵınlıǵı, tap sol sıyaqlı magnitlik vektordıń shoǵırlarınıń elektrlik vektordıń túyinlerine sáykes keletuǵınlıǵı kelip shıǵadı (35-súwret). Aynanıń betinde elektrlik $\mathbf{E}$ vektorı shoǵırǵa, al magnitlik $\mathbf{H}$ vektorı túyinge iye. 257-paragrafta biz jaqtılıqtıń tegis aynada shıǵılısqandında payda bolǵan turǵın tolqınlardıń fotosúwretin túsiriw boyınsha islengen Vinerdiń tájiriýbelerin táriyiplegen edik. Bunday jaǵdayda aynanıń tikkeley betinde túyin jaylasqan edi. Bunnan elektrlik vektordıń terbelisleriniń fotografiyalıq qatlamdaǵı fitoximiyalıq tásirdi payda etetuǵınlıǵı kelip shıǵadı; tap usınday jaǵday jaqtılıqtıń basqa da tásirlerine - lyuminescenciyaǵa da, fotoeffektke de, fiziologiyalıq tásirlerge de tiyisli.

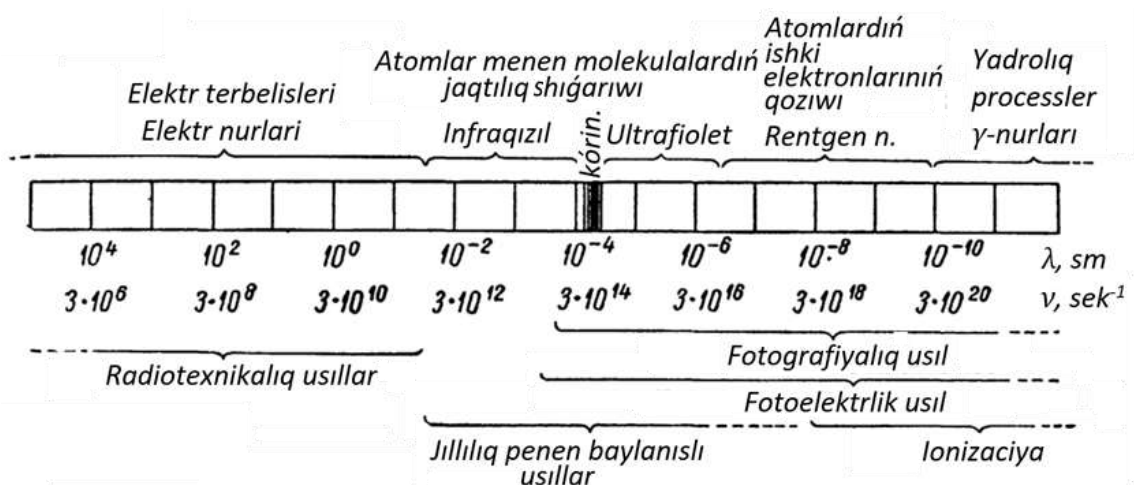
Polarizaciyalıq jaqtılıqtaǵı turǵın tolqınlar menen ótkerilgen tájiriýbeler jaqtılıq tolqınındaǵı elektrlik vektordıń polarizaciya tegisligine perpendikulyar bolǵan tegislikte terbeletuǵınlıǵı tikkeley kórsetedi. Bul tájiriýbelerdiń mánisi mınadan ibarat: túsiw tegisliginde polarizaciyalanǵan jaqtılıq metall aynada 45° múyesh penen shaǵılısadı. Bunday jaǵdayda elektrlik vektor túsiw tegisligine perpendikulyar tegislikte terbeletuǵın bolǵanlıqtan, túsiwshi hám shaǵılısqan tolqınlarda elektrlik vektorlardıń terbelisleri bir birine parallel boladı (36a súwret). Sonlıqtan olar interferenciyanadı hám haqıyqatında da tájiriýbelerde baqlanadı. Eger elektrlik vektor polarizaciya tegisliginde terbeletuǵın bolsa, onda túsiwshi hám shaǵılısqan tolqınlardaǵı terbelislerdiń baǵıtları óz-ara perpendikulyar bolǵan (36b súwret) hám interferenciya orın almaǵan hám turǵın tolqınlar payda bolmaǵan bolar edi.

Atomlar menen molekularlar tárepinen shıǵarılatuǵın tolqın uzınlıqları adamnıń kózine tásir etip subektiv kóriw sezimin payda etetuǵın $0,76 \text{ mkm}$ den $0,4 \text{ mkm}$ ge shekemgi interval menen shegaralanıp qalmaydı. Elektr razryadınıń tásirinde jaqtılıq shıǵaratuǵın qızdırılǵan deneler, gazler hám basqa da derekler tolqın uzınlıqları $0,76 \text{ mkm}$ den úlken hám $0,4 \text{ mkm}$ den kishi bolǵan tolqınlardı da shıǵaradı. Usınıń menen bir qatarda makroskopiyalıq vibratorlardıń járdeminde házirgi zaman qozdırıw (generaciyalaw) usılları júdá úlken bolǵan diapazonda jatatuǵın elektromagnit tolqınların alıwǵa múmkinshilik beredi. Sonday-aq, jaqtılıq tolqınlarına salıstırǵanda ádewir kishi tolqın uzınlıqlarına iye elektromagnit tolqınların qozdırıw usılları da bar.

37-súwrette elektromagnit tolqınların shkalası berilgen. Orta bóliminde santimetrlerdegi λ tolqın uzunlıqları, hám sek^{-1} lerdegi (gerclerdegi) ν jıyılıqlar berilgen. Joqarıda qozdırıw, al tómende registraciyalaw usılları kórsetilgen. $\lambda = 7,6 \cdot 10^{-5}$ sm den $\lambda = 4 \cdot 10^{-5}$ sm ge shekemgi interval kózge tásir etetuǵın jaqtılıq tolqınlarına sáykes keledi. Kózge kórinetuǵın nurlardı hár qıylı obektivlik usıllar menen registraciyalawǵa boladı: fotografiyalıq, fotoelektrlik hám jıllılıqtı paydalanatuǵın usıllar menen. Kózge kórinetuǵın nurlardan úlken tolqın uzunlıqları tárepinde kózge tásir etpeytuǵın infraqızıl nurlar jaylasadı. Olar jaqtılıq nurların shıǵaratuǵın derekler tárepinen shıǵarıladı: qızǵan deneler, elektr razryadlarında jaqtılıq shıǵaratuǵın gazlar h.t.b. Shama menen $\lambda = 1,2 \cdot 10^{-4}$ sm ge shekemgi oblastta olardı fotografiyalıq, al $\lambda = 2,4 \cdot 10^{-4}$ sm ge shekemgi oblastta fotoelektrlik usıllardıń járdeminde tabıwǵa boladı. Universallıq qásiyeti joqarıraq bolǵan jıllılıq penen baylanıslı bolǵan usıllardıń járdeminde tolqın uzunlıǵı $1,5 \cdot 10^{-1}$ sm ge, yaǵnıy 1,5 mm ge shekemgi infraqızıl nurlardı registraciyalaw múmkin.

Katod lampalarınń járdeminde elektromagnit tolqınları qozdırıwdıń házirgi zaman usılları (II tom, 241-paragraf) tolqın uzunlıǵı bir neshe kilometrden bir neshe santimetrge shekemgi elektromagnit tolqınların alıwǵa múmkinshilik beredi. Bunday tolqınlar radiotexnikada paydalanıladı. 1906-jılı P.N.Lebedev miniatyuralıq vibratorlardıń járdeminde tolqın uzunlıǵı $\lambda = 4$ mm bolǵan elektromagnit tolqınların aldı. M.A.Levitskaya da miniatyuralıq vibratorlardı paydalanıp tolqın uzunlıǵı millimetrdiń onnan bir úlesin quraytuǵın elektromagnit tolqınların ala aldı. 1924-jılı V.K.Arkadev penen A.A.Glagoleva-Arkadeva tolqın uzunlıǵı shama menen 0,1 mm bolǵan elektromagnit tolqınların aldı. Generator sıpatında olar mayda júzip júrgen temirdiń untaǵınıń bóleksheleriniń arasındaǵı ushqındı paydalandı. Solay etip, tolqın uzunlıǵı millimetrdiń onnan bir úlesine teń elektromagnit tolqınların hár qıylı bolǵan eki usıldıń járdeminde registraciyalawǵa boladı eken: ultraqısqa elektr nurları hám uzun tolqın uzunlıǵına iye bolǵan infraqızıl nurlar.

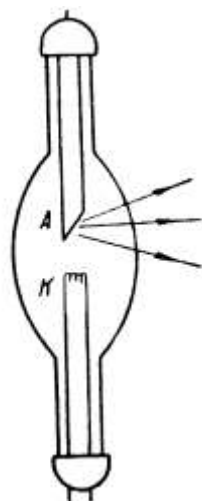
Kózge kórinetuǵın nurlardan baslap esaplaǵanda qısqa tolqınlar tárepinde ultrafiolet nurlar jatadı. $\lambda = 1,8 \cdot 10^{-5}$ sm bolǵanǵa shekem olardı jaqtılıq nurların úyrenetuǵın usıllardıń járdeminde úyreniwge boladı. $\lambda = 1,8 \cdot 10^{-5}$ sm den kishi tolqın uzunlıqları oblastında bunday tolqınlardıń derlik barlıq zatlarda, solardıń ishinde hawada jutilatuǵınlıǵına baylanıslı ádewir úlken qıyınshılıqlar ushırasadı. Bul qıyınshılıqlar arnawlı vakuumlıq apparaturanı (vakuum-spektrografları dep atalatuǵın) hám jelatina paydalanılmaytuǵın ayrıqsha fotografiyalıq plastinkalardı paydalanıw jolı menen saplastırıladı. Házirgi waqıtları vakuum-spektrograflardıń járdeminde ultrafiolet nurlar shama menen $6 \cdot 10^{-7}$ sm bolǵan tolqın uzunlıqlarına shekem úyrenilgen



37-súwret. Elektromagnit tolqınların shkalası.

1895-jılı Rentgen qattı deneler tárepinen olarǵa tez ushatuǵın elektronlardıń aǵısı kelip túskende shıǵarılatuǵın nurlardıń jańa túrin ashtı. Kózge kórinbeytuǵın bunday nurlar kóp sanlı qattı denelerde kózge kórinetuǵın fluorescenciyanı (platinosinerodistlik bariy⁷, cink sulfatı h.b.) júzege keltire aladı, fotografiyalıq plastinkaǵa tásir etedi hám hawanı ionlastıra aladı. Házirgi waqıtları rentgen nurların qozdırıw ushın vakuumlıq trubkalar qollanıladı hám olardaǵı elektronlardıń dereǵı bolıp qızdırılǵan *K katodı* xızmet etedi (38-súwret). Katodqa qarama-qarsı tárepte elektronlar kelip urılatuǵın *antikatod* dep atalatuǵın massası úlken qattı dene jaylastırıladı. Elektronlarǵa zárúrli bolǵan tezlikti beriw ushın *K katodı* menen *A anodınıń* arasına shama menen bir neshe onlaǵan mıń volt shamasındaǵı $V_1 - V_2$ potenciallar ayırması túsiriledi. Rentgen nurlarınıń dereǵı bolıp antikatodtıń beti xızmet etedi. Rentgen nurları joqarı ótiw qásiyetke iye boladı, mısalı jaqtılıq ushın móldir bolmaǵan kóp deneler arqalı ótedi (mısalı, qaǵaz, aǵash h.t.b.).

Rentgen nurları atomlardaǵı ishki elektronlıq qatlamlar tárepinen, al kózge kórinetuǵın, infraqızıl, ultrafiolet nurlar bolsa atomlar menen molekulalardıń sırtqı elektronlıq qabıqları tárepinen nurlandırıladı. Házirgi waqıtları úyrenilgen rentgen nurlarınıń oblastı $\lambda = 10^{-6}$ sm den $\lambda = 10^{-10}$ sm ge shekem hám onnan da tómen. Uzun tolqınlı rentgen nurlarınıń oblastı ultrafiolet nurlar oblastı menen betlesedi hám zatlar tárepinen intensivli túrde jutılatuǵın oblastqa kiredi. Joqarıda aytılp ótilgenindey, kishi tolqın uzınlıǵına iye rentgen nurları, kerisinshe, ázzi jutıladı.



38-súwret.
Rentgen trubkası.

Eń sońında atom yadrolarınıń ishinde júretuǵın processlerde hám júdá úlken tezlik penen qozǵalatuǵın elektronlar tormozlanǵanda *γ -nurları* dep atalatuǵın tolqın uzınlıǵı 10^{-9} sm hám onnan da kishi elektromagnit nurlarınıń shıǵarılatuǵınlıǵın atap ótemiz.

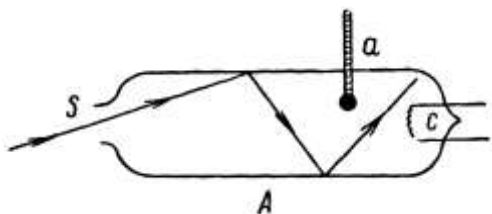
Solay etip, házirgi zaman fizikası óziniń ishine júdá keń oblasttı qamtıytuǵın elektromagnit tolqınlarınıń shkalası menen jumıs alıp baradı. Bul tolqınlar júdá hár qıylı bolǵan vibartorlar tárepinen nurlandırıladı, júdá hár qıylı bolǵan usıllardıń járdeminde registraciyalanadı. Biraq olardıń barlıǵı da elektromagnitlik tábiyatqa iye, boslıqta birdey tezlik penen tarqaladı hám interferenciya menen difrakciyaǵa ushıraydı. Biraq, tolqın uzınlıǵınıń ózgeriwi menen sapalıq ózgerisler de payda boladı: kirisiwde atap ótilgenindey, kishi tolqın uzınlıǵına iye tolqınlardıń tolqınlıq qásiyetleri menen birge korpuskulalıq qásiyetleri de ayqın túrde kórinedi.

§ 260. Jaqtılıq aǵısınıń energiyası menen qozǵalıw muǵdarı. Jaqtılıqtıń basımı. Jaqtılıq tolqınları ózleri menen birge energiyanı alıp júredi, bul energiya jaqtılıq dereǵinen alınadı hám

⁷ Bariy tetracianoplatinatı - bariy, platina hám sinil kislotasınıń kompleksli duzı $\text{Ba}[\text{Pt}(\text{CN})_4]$ formulasına iye hám ol eki valentli platinanıń eń ornıqlı kompleksli birikpeleriniń biri bolıp tabıladı (Awdarıwshılar).

jaqtılıqtı jutqan denegе beriledi. Qanday da bir maydan arqalı ótip atırǵan jaqtılıq energiyasınıń aǵısı dep jaqtılıqtıń usı maydan arqalı waqıt birliginde alıp ótetuǵın energiyasına aytamız. Solay etip, energiyanıń aǵısı quwattıń birligine iye hám bir sekundaǵı erglerde, vattlarda h.t.b. birliklerde ólshenedi. Jaqtılıq energiyasınıń absolyut ólshemde ólshew sxema túrinde bilayınsha ámelge asırıladı. Jaqtılıq energiyası S sańlaǵı arqalı (39-súwret) jutiwshı diywallarǵa iye derlik tuyıq bolǵan A ıdısınıń ishine kelip túsedi. S sańlaǵı kishi bolǵanda jaqtılıq tolqın uzınlıǵınıń shamasınan ǵárezsiz, A ıdısınıń ishinde derlik tolıǵı menen jutıladı. Sebebi usı A ıdısınan S sańlaǵı arqalı onıń tek esapqa almawǵa bolatuǵın oǵada kishi bolǵan bóleginiń ǵana shıǵıwı múmkin. Jaqtılıq energiyasınıń jutılıwınıń nátiyjesinde ıdıs tıń diywalları qıza baslaydı. Jıllılıqtıń beriliwiniń turaqlı sharayatında eń aqırında jıllılıq teń salmaqıǵı ornaydı. Bul teń salmaqıǵıǵa α termometriniń járdeminde ólshenetuǵın T temperaturası sáykes keledi. T temperaturası ólshengennen keyin A ıdısına keletuǵın jaqtılıq energiyası toqtaydı hám jıllılıqtıń beriliwiniń tap sonday bolǵan sharayatlarında ıdıs C spiralı boyınsha aǵıp atırǵan elektr toǵınıń járdeminde qızdırıladı. Toqtıń kúshi T temperaturasınıń ózgermey qalatuǵında etip saylap alınadı. Álbette, bunday sharayattıń júzege keliwi ushın elektr toǵı ótip turǵan spiraldıǵı quwatlıqtıń shaması jaqtılıq aǵısınıń quwatına teń bolıwı kerek. Elektr toǵınıń quwatınıń shaması toqtıń kúshi menen sımınıń qarsılıǵı boyınsha absolyut ólshemde ólshenetuǵın bolǵanlıqtan, jaqtılıq energiyasınıń aǵısınıń shaması da tap sonday etip absolyut ólshemde ólshenedi.

Adamnıń kózi júdá kishi bolǵan quwattı seziwge qábiletli. Adamnıń kóziniń sezgirliǵı maksimalıq bolǵan sharayatlarda kózde kóriw seziminiń payda bolıwı ushın kózdiń qarashıǵına quwatı $2 \cdot 10^{-9}$ erg/sek aǵıstıń kelip túsiwi jetkilikli⁸. Joqarıda táriyiplengen jaqtılıqtıń quwatın payda etken jıllılıǵı boyınsha ólshew usılınıń dáliligi júdá kishi hám sonlıqtan quwatlıǵı júdá joqarı bolǵan aǵıslardı ólshewge ǵana múmkinshilik beredi. Jaqtılıq aǵısın registraciyalaw menen ólshewdiń ádewir sezgir bolǵan usılları da bar (307-paragrafqa qarańız), Biraq joqarıda táriyiplengen usıldıń artıqmashlıǵı absolyut ólshewdi ámelge asırıwdan hám onıń qálegen tolqın uzınlıǵındaǵı jaqtılıq ushın paydalanıwınıń múmkin ekenligi menen baylanıslı.



39-súwret.
Jaqtılıq aǵısınıń energiyasınıń absolyut ólshewdiń usılı.

Jaqtılıqtıń elektromagnitlik teoriiyası jaqtılıqtıń onı shaǵılıstıratuǵın yamasa jutatuǵın betke basım túsiretuǵın da kórsetedi. Eger jaqtılıq aǵısı tek energiyaǵa ǵana emes, al qozǵalısh muǵdarına da iye boladı dep esaplasaq, onda usınday juwmaqqa kele alamız. Eger, boslıqta belgili bolǵan baǵıtta jaqtılıq aǵısı tarqalatuǵın bolsa hám kólem birligine sáykes keletuǵın energiyanıń muǵdarı w bolsa, onda kólem birligine sáykes keletuǵın qozǵalısh muǵdarı $k = w/c$ ǵa teń boladı. Bul teńlikte c arqalı boslıqtaǵı jaqtılıqtıń tezligi belgilengen (335-paragraftı qarańız). Qozǵalısh muǵdarı vektorı $\mathbf{K}$ jaqtılıqtıń tarqalıw baǵıtı menen baǵıtlas.

Eger jaqtılıq penen qanday da bir dene arasında óz-ara tásirlesiw júzege keliwiniń nátiyjesinde (mısalı, shaǵılısıw yamasa jutiwdıń nátiyjesinde) qozǵalısh muǵdarı $\mathbf{K}$ nıń ózgeriwi júzege keletuǵın bolsa, onda qozǵalısh muǵdarınıń $\Delta \mathbf{K}$ shamasına ózgeriwiniń saldarınan denegе $\mathbf{f} \Delta t$ kúsh impulsı tásir etedi hám onıń shaması ápiwayı túrdegi

$$\mathbf{f} \Delta t = \Delta \mathbf{K}$$

⁸ Demek, sarı jaqtılıq ushın 1 sekunda shama menen 550-600 fotonnıń kelip túsiwi kerek (Awdarıwshılar).

qatnasınıń járdeminde anıqlanadı. Bul qatnasta Δt arqalı qozǵalıstırń muǵdarı ΔK shamasına ózgeretuǵın waqıt belgilengen. Solay etip, jaqtılıqtı shaǵılıstıratuǵın yamasa jutatuǵın denegge belgili bolǵan f kúshi tásir etedi. Deneniń betiniń maydanınıń bir birligine tásir etetuǵın kústiriń normal qurawshısınıń shaması oǵan tásir etetuǵın *jaqtılıqtıń basımı* p nı beredi. Bul basım p nıń mánisin esaplaw ushın ΔS betine normal baǵıtta energiyasınıń kólemlik tıǵızlıǵı w bolǵan jaqtılıq aǵısı túsedı dep boljayıq. Meyli, ΔS beti túsken nurlardı tolıǵı menen jutadı dep esaplayıq. Bunday jaǵdayda, jaqtılıqtıń jutılıwınıń nátiyjesinde onıń qozǵalıstırń muǵdarı nolge teń boladı. Demek, Δt waqtınıń ishinde qozǵalıstırń muǵdarı san mánisi kese-kesiminiń shaması ΔS hám uzınlıǵı $l = c\Delta t$ shamasına teń bolǵan parallelopipedtiń kólemine sáykes keletuǵın qozǵalıstırń muǵdarınıń shamasına ózgeredi (40-súwret). Bul parallelopipedtiń kólemi $c\Delta t\Delta S$ ke teń, usı kólemge sáykes keletuǵın qozǵalıstırń muǵdarı mınaǵan teń:

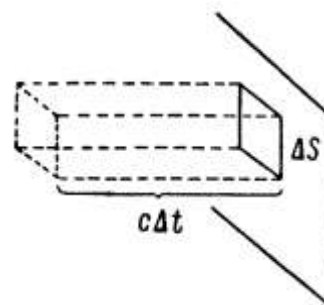
$$K = \frac{w}{c} c\Delta t\Delta S = w\Delta t\Delta S.$$

Bunnan, ΔS maydanına túsetuǵın bası p ushın

$$p = \frac{K}{\Delta t\Delta S} = w$$

ańlatpasına iye bolamız. Solay etip, jutatuǵın maydan ushın basım san mánisi boyınsha jaqtılıq aǵısınıń energiyasınıń kólemlik tıǵızlıǵına teń eken.

40-súwret.
Jaqtılıqtıń basımın esaplawǵa.



Shaǵılıstıratuǵın bet bolǵan jaǵdayda jaqtılıq normal baǵıtta túskende óziniń tarqalıw baǵıtın qarama-qarsı baǵıtqa ózgetedi. Eger bet absolyut shaǵılıstıratuǵın bolsa, onda shaǵılısqan hám kelip túsken jaqtılıq aǵıslarınıń energiyaları bir birine teń. Sonlıqtan, qozǵalıstırń muǵdarınıń ózgerisi $2K$ ǵa, al jaqtılıqtıń basımı $p = 2w$ shamasına teń, yaǵnıy jutıwdaǵıǵa salıstırǵanda eki ese úlken boladı. Sońında, eger bet absolyut shaǵılıstırıwshı bolmasa, al $\rho < 1$ shaǵılıstırıw koefficientine iye bolsa, onda energiyanıń $(1 - \rho)w$ shamasına teń bólimi jutıladı, al ρw ǵa teń bólimi shaǵılısadı. Nátiyjede, bul jaǵdayda jaqtılıqtıń basımı

$$p = (1 - \rho)w + 2\rho w = (1 + \rho)w \quad (1)$$

ańlatpasına iye bolamız.

Eger jaqtılıq energiyasınıń aǵısınıń tıǵızlıǵı u energiyanıń tıǵızlıǵı w menen

$$u = wc$$

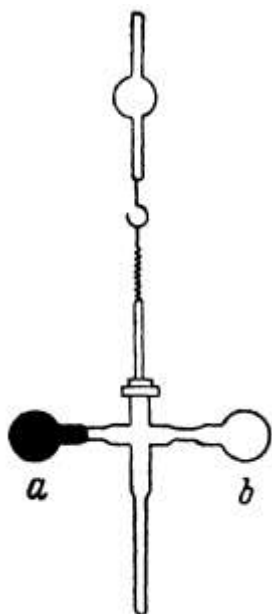
túrinde baylanısqan bolǵanlıqtan sońǵı ańlatpanı túrlendiriwge boladı (I tomdaǵı 112-paragraf). Bul teńlikte c arqalı jaqtılıqtıń tezligi belgilengen. (1)-formuladaǵı w shamasın u/c qatnası menen alıstırıw, mınanı alamız:

$$p = \frac{u}{c}(1 + \rho). \quad (2)$$

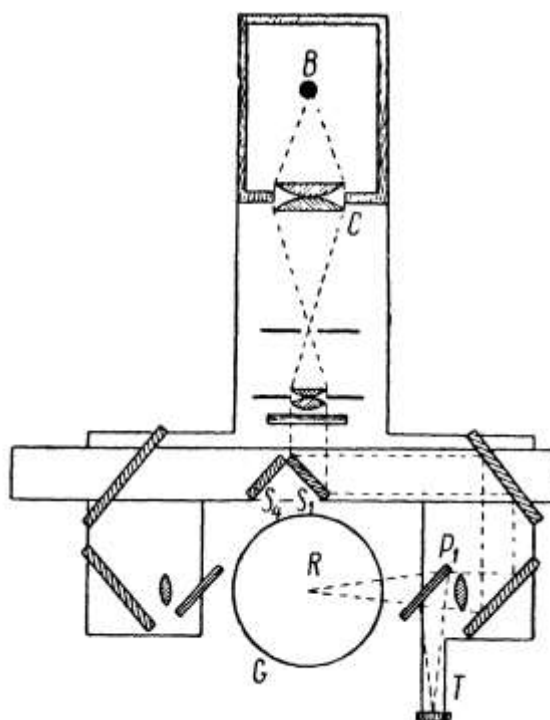
(2)-ańlatpanıń jaqtılıqtıń elektromagnitlik teoriyasınıń tuwrıdan-tuwrı nátiyjesi túrinde de alınıwı múmkin.

Jaqtılıqtıń tarqalıw tezligi júdá úlken bolǵanlıqtan, is júzinde jaqtılıq aǵımınıń alınıwı múmkin bolǵan mánislerindegi jaqtılıqtıń basımı kishi boladı. Mısalı, ashıq kúnde tuwrı kelip túsetuǵın Quyash nurları tolıq jutıw orın alǵanda 1 m^2 maydanǵa $0,4 \text{ mg}$ kúsh penen tásir etedi. Jaqtılıqtıń basımınıń shaması usınday oǵada kishi bolǵanlıqtan, onı baqlaw júdá qıyın. 1901-jılı Moskva

universitetiniń professorı P.N.Lebedev birinshi ret jaqtılıqtıń basımınıń bar ekenligin birinshi ret eksperimentlerde taptı hám onıń shamasın ólshedi. P.N.Lebedevtiń áspabınıń tiykargı bólimi jıńışke sabaq penen ildirilip qoyılğan aspa bolıp, onıń ushlarına a hám b qanatları ildirilgen (41-súwret). Olardıń biri (mısalı odno iz kotorix (mısalı, a) qara boyaw menen boyalğan, al ekinshisi jıltır etip tayarlanğan. Aspa hawası sorıp alınğan G idısında jaylastırılğan (42-súwret). Doǵalıq B lampasınan shıqqan jaqtılıq linzalar menen aynalardıń sistemasınıń járdeminde qanatlardıń birine qaray baǵdarlanğan (42-súwrettegi R noqatına). Qanatqa túsirilgen jaqtılıqtıń basımınıń tásirinde aspa burıladı hám ol ildirilip qoyılğan sabaq buraladı. Aynanıń járdeminde qanattıń dáslep birinshi tárepi, bunnan keyin ekinshi tárepi jaqtılandırıladı hám solay etip sabaqtıń buralıw baǵıtın ózgertiwdiń múmkinshiligi tuwıladı. Sabaqtıń buralıwı usı sabaqqa jabıstırılğan kishkene aynanıń jáne trubanıń járdeminde baqlanğan. Qaraǵa boyalğan jáne jıltır betlerdiń jaqtılandırılıwınıń saldarınan payda bolğan buralıwları salıstırıp, P.N.Lebedev teoriyaǵa sáykes qara qanatqa túsirilgen basımınıń jıltır qanatqa túsirilgen basımnan eki ese kishi ekenligin anıqlay aldı.



41-súwret. Jaqtılıqtıń basımın baqlaw ushın soǵılğan a hám b qanatları.



42-súwret. Jaqtılıqtıń basımın ólshew ushın arnalğan P.N.Lebedevtiń paydalanǵan dúzilisiniń sxeması.

P_1 plastinkasınıń járdeminde jaqtılıq aǵısınıń belgili bolğan bólegin T termoelementine baǵıtlap túsiwshi jaqtılıq aǵısınıń energiyasın ólshewge hám teoriyanı sanlıq jaqtan tekserip kóriwge boladı. P.N.Lebedevtiń ólshewleri boyınsha jaqtılıq basımınıń shaması (2)-formula boyınsha esaplanǵan basımınıń shaması menen baqlawlardıń qátelikleriniń sheklerinde sáykes kelgen.

Jaqtılıqtıń basımın tabıw hám onıń ústine onıń shamasın ólshew úlken eksperimentallıq qıyınshılıqlardı payda etedi. Sebebi aspa sistemasınıń burılıwı kóp sanlı janapay sebeplerdiń tásirinde júzege keliwi múmkin. Bunday sebeplerdiń qatarına birinshi gezekte qanattıń qasındaǵı gazdıń qızıwı menen baylanıslı bolğan radiometrik tásir dep atalatuǵın tásir kiredi.

Keyinirek (1908-jılı) P.N.Lebedev onnan da qıyınraq eksperimentallıq máseleleni sheshti. Ol jaqtılıqtıń basımınıń gazlerge túsetuǵının da taptı hám onıń shamasın ólshedi. Bul jumıs F.A.Bredixinniń Quyashtan shıqqan jaqtılıqtıń bólekshelerdi iyteriwiń sebebinen kometalardıń

quyıqlarınıń payda bolatuǵınlıǵın haqqındaǵı gipotezasınıń durıs ekenligin tastıyıqladı. Bul kúshler Quyash nurları tárepinen bólekshelergen túsiriletuǵın basım menen baylanıslı.

XXIII BAP

JAQTILIQTIŇ INTERFERENCIYASI MENEN DIFRAKCIYASI

§ 261. Jaqtılıqtıń interferenciya baqlaw usılları. Bunnan aldırǵı bapta jaqtılıqtıń elektromagnit terbelisleri ekenligi kórsetildi. Biraq, jaqtılıqtıń interferenciya qubılısın baqlaw usılları jaqtılıqtıń tarqalıwınıń tolqınlıq xarakterge iye ekenligi kóz-qarası tolıq jetkilikli. Sonlıqtan, bunnan keyingi paragraflarda biz tek amplitudasın, fazasın, tolqın uzınlıǵın hám onıń tarqalıwın táriyiplegen halda jaqtılıq tolqınların qaraymız hám jaqtılıq tolqınların dál táriyiplew ushın eki vektordı - elektr kernewligi E menen magnit kernewligi H vektorların bar ekenligin esapqa alıwdıń zárúr ekenligine itibar bermeymiz.

256-paragrafta bir birinen gárezsiz bolǵan eki jaqtılıq dereginıń (mısalı, eki lampochkaniń) kogerentli emes ekenligin hám sonlıqtan interferenciya qubılısın baqlaw ushın jaramaytuǵınlıǵı kórsetildi. Endi jasalma túrde kogerentli derekler payda etiletuǵın bir qatar tájiriybelerdı tallaymız.

1. Frenel aynaları. Frenel eki kogerentli derek sıpatında bir haqıyqıy derektiń eki tegis aynadaǵı eki súwretin paydalanıwdı usındı. Frenel tájiriybesiniń sxeması 43-súwrette keltirilgen. Bul súwrette A_1O menen A_2O - bir birine salıstırǵanda φ múyeshine burılǵan eki tegis ayna; S — aynalardıń bir birine tiyip turǵan O noqatınan r qashıqlıǵında jaylasqan jaqtılıqtıń deregi. Eki aynadaǵı S jaqtılıq dereginıń súwretin payda etiw ushın tegis ayna beretuǵın jormal súwrettiń aynanıń bergi tárepinde derek aynadan qanday qashıqlıqta jaylasqan bolsa aynanıń arǵı tárepinde tap sonday qashıqlıqta payda bolatuǵınlıǵın esapqa alamız (251-paragrafqa qarańız). O noqatınan radiusı $r = OS$ bolǵan sheńber júrgizemiz hám S noqatınan OA_1 tuwrısınıń dawamına perpendikulyar júrgizemiz; Bul perpendikulyardıń dawamınıń sheńber menen kesilisiw noqatı S dereginıń birinshi OA_1 aynasındaǵı súwretin beredi. Tap usınday jollar menen ekinshi OA_2 aynasındaǵı BA_2 súwretti quramız. Ekinshi tárepten, B_2 súwreti birinshi OA_1 aynasın φ múyeshine burǵan jaǵdayda B_1 súwreti barıp turatuǵın noqatta payda boladı. Sonlıqtan $\angle B_1OB_2 = 2\varphi$ (251-paragrafqa qarańız) hám B_1 menen B_2 arasındaǵı sıızqlı qashıqlıq juwıq túrde $2\varphi r$ ge teń boladı:

$$t = 2\varphi r. \quad (1)$$

Jaqtılıq B_1 menen B_2 súwretlerdiń ekewinen de aynalardan L_0 qashıqlıǵında jaylasqan DD' ekranına kelip túsedı. Móldir bolmaǵan E ekranı S dereginen shıqqan jaqtılıqtıń tuwrıdan-tuwrı DD' ekranına kelip túsiwge kesent beredi. B_1 súwreti de, B_2 súwreti de bir haqıyqıy derektiń terbelislerin beretuǵın bolǵanlıqtan, olar kogerentli boladı hám DD' ekranında interferenciya qubılısı jolaqlar payda boladı. 256-paragrafta (4a) formulası boyınsha jolaqlardıń arasındaǵı qashıqlıq Δl mınaǵan teń:

$$\Delta l = \frac{\lambda}{t} \cdot L.$$

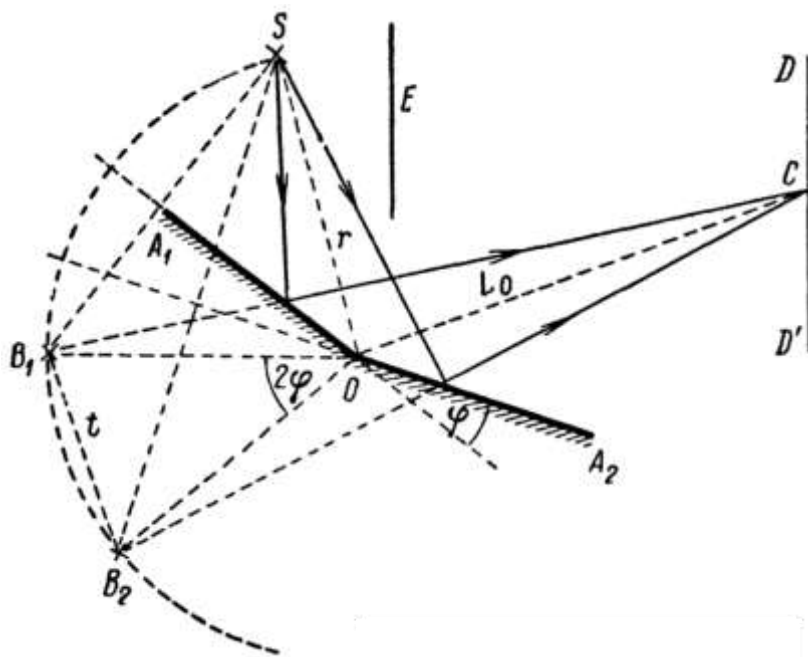
Bul teńlikte L - dereklerden jolaqlar baqlanatuǵın orınǵa shekemgi qashıqlıq. Bul ańlatpadaǵı t nıń ornına onıń (1)-teńlik boyınsha mánisin qoysaq hám juwıq túrde $L = L_0 + r$ teńliginiń orınlanatuǵınlıǵın esapqa alsaq, onda

$$\Delta l = \frac{L_0 + r}{2\varphi r} \cdot \lambda$$

yamasa, bunnan

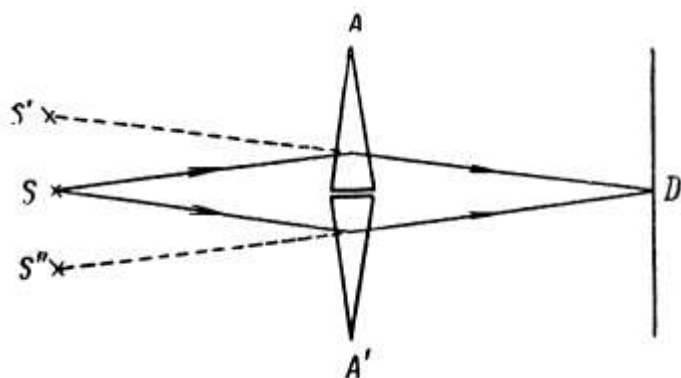
$$\lambda = \frac{2\varphi r}{L_0 + r} \Delta l$$

a'latpasın alamız. So'ngı formulanıń oń tárepinde qatnasatuǵın barlıq shamalardı ólsheuge bolatuǵın bolǵanlıqtan, onnan Frenel aynalarınıń járdeminde jaqtılıq tolqınlarınıń uzınlıǵı λ ni ólsheuge bolatuǵınlıǵı kórinip tur.



43-súwret.
Frenel aynaları.

Frenel tájiriybesinde aynalardı bir birine júdá kishi φ múyeshi menen jayǵastırıwǵa tuwrı keledi, bunday bolmaǵan jaǵdayda júdá jıńshke bolǵan jolaqlar alınadı. Jaqtılıq deregin aynalar tárepinen payda etilgen O qabırǵasına parallel túrdegi ensiz sańlaq túrinde aladı. Bunday jaǵdayda interferenciyalıq jolaqlar bir birine parallel bolǵan tuwrı jolaqlar túrinde alınadı. Aq jaqtılıqta ótkerilgen baqlawlarda oraylıq jolaq aq reńge iye ($k = 0$, barlıq λ tolqın uzınlıqları kúsheydi), al qalǵanları boyalǵan boladı.



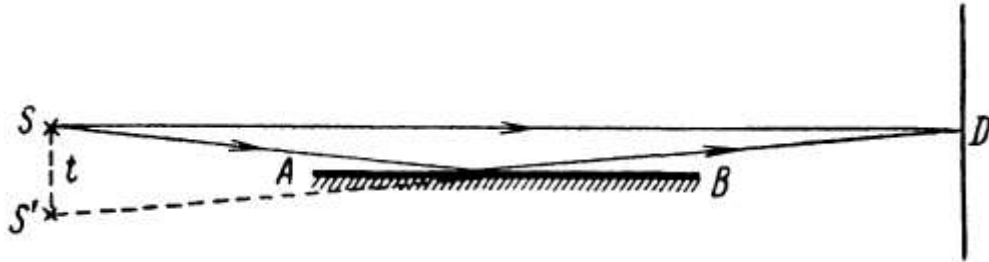
44-súwret.
Frenel biprizması.

2. Frenel biprizması. Bul tájiriybe bunnan aldınǵı tájiriybeniń ápiwayı variantı bolıp tabıladı. S dereginen shıqqan jaqtılıq kishi sındırıwshı múyeshlerine iye bolǵan eki hám tiykarları bir birine tiyip turǵan A hám A' prizmalarında sınadı (44-súwret). Prizmalar nurlardı qarama-qarsı baǵıtlarda buradı hám, solay etip, jaqtılıqtıń eki kogerentlik derekleri S' penen S'' lar payda boladı. Bul dereklerden shıqqan nurlar D oblastında qabatlasıp, interferenciyalıq jolaqlardı beredi.

3. Lloyd aynası. Lloyd tárepinen usınılǵan tájiriybede S dereginen (45-súwret) hám AB aynasınıń betinshe shaǵılısqan nurlar interferenciyanadı. AB aynasında shaǵılısqan nurlar S penen kogerentlik bolǵan jormal S' dereginen shıqqanday bolıp xızmet etedi. S penen S' lerdıń

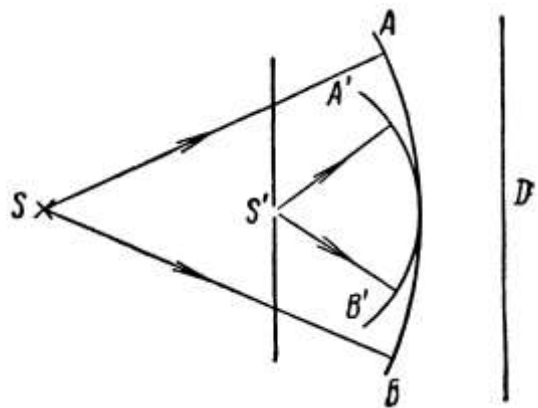
arasındaғы qashıqlıq t nıń jetkilikli dárejede kishi bolıwı ushın nurlar aynada 90° qa jaqın múyesh penen shaǵılısqan bolıwı kerek. Jaqtılıqtıń deregi sıpatında aynanıń betine parallel bolǵan sańlaq xızmet ete aladı.

Lloyd aynasınıń járdeminde baqlanatuǵın interferenciyalıq súwrettiń ózgesheligi oraylıq jolaqtıń jaqtılı bolıp emes, al qarańǵı bolıp alınıwınan ibarat. Bul Lloyd tájiriybesinde birdey geometriyalıq jollardı ótetuǵın nurlardıń $\lambda/2$ shamasına teń fazalar ayırmasına iye bolatuǵınlıǵın kórsetedi. *Yarım tolqın uzınlıǵınıń tap usınday "joǵalıwı" (yamasa, basqa sóz benen aytqanda fazanıń π ge ózgeriwı) sındırıw koefficienti hawanıń sındırıw koefficientinen úlken bolǵan shiysheniń betindegi shaǵılısıwdıń saldarınan júzege keledi.* Keyinirek biz qanday jaǵdayda móldir ortalıqta shaǵılısqanında jaqtılıqtıń yarım tolqın uzınlıǵınıń joǵalatuǵınlıǵın kóremiz.



45-súwret. Lloyd tájiriybesiniń sxeması.

46-súwret.
V.P.Linniktiń tájiriybesiniń sxeması.



4. V.A.Linniktiń tájiriybesi. Interferenciya boyınsha joqarıda táriyiplengen barlıq tájiriybelerde eki kogerentli derek jaqtılıqtıń tarqalıw baǵıtlarınıń orta baǵıtına perpendikulyar bolǵan tuwrınıń boyınsha jaylasqan. Kogerent S hám S' derekleri jaqtılıq tarqalatuǵın baǵıttıń boyında jaylaspaǵan tájiriybeni birinshi ret 1935-jılı sovet fizigi V.P.Linnik tárepinen usınıldı. Linniktiń tájiriybesiniń sxeması mınaday: S noqatlıq dereginen shıqqan jaqtılıq (46-súwret) AB sferalıq tolqınıń beredi. Usı AB sferalıq tolqınıń jolında tegis-parallel yarım móldir plastinka jaylasqan bolıp, ol AB tolqınıń betin mayıstırmay biraz hálsiretedi. Plastinkada kishi S' sańlaǵı tesilgen. Gyuygens principi boyınsha, ol orayı S' noqatında jaylasqan jańa $A'B'$ sferalıq tolqınıń deregi bolıp tabıladı. AB hám $A'B'$ sferalıq tolqınları kogerentli hám D ekranında saǵıyna túrindegi interferenciyalıq jolaqlardı beredi.

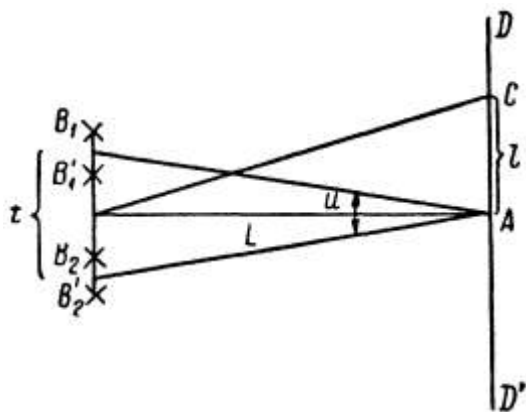
S deregin ensiz jolaq túrinde (móldir bolmaǵan ekrandaǵı sańlaq) hám S' tesigin oǵan parallel bolǵan sańlaq túrinde alıwǵa boladı. Bunday jaǵdayda D ekranındaǵı interferenciyalıq jolaqlar tuwrı sızıqlar túrine iye boladı.

Joqarıda keltirilgen barlıq tallawlarda biz jaqtılıq dereklerin noqatlıq dep esapladıq. Tek usınday jaǵdaylarda ǵana interferenciyalıq jolaqlar jetkilikli dárejede keskin túrde alınadı. Dereklerdiń shekli ólshemleri interferenciyalıq jolaqlardıń jayılıwına yamasa hátte tolıq joǵalıwına alıp keledi. Dereklerdiń paydalanılıwı múmkin bolǵan ólshemlerin anıqlaw ushın 47-súwretke sáykes keletuǵın interferenciyalıq tájiriybeniń ápiwayı sxemasın qaraymız. Tek endi ǵana $B_1B'_1$ hám $B_2B'_2$ dereklerin shekli d uzınlıǵına iye

bolğan kogerentli derekler dep atay alamız (47-súwret). Dereklerdiń hár birin uzınlıǵı $d/2$ shamasındaǵı birdey bolğan eki yarımǵa bólemiz hám bul yarımardı jaqtılıqtıń noqatlıq derekleri dep esaplaymız. Usınday noqatlıq dereklerdiń hár bir jubı óziniń interferenciyalıq jolaqlarınıń sistemasın beredi. Eki sistema bir birine salıstırǵanda $B_1B'_1$ hám $B_2B'_2$ derekleriniń hár biriniń yarımına teń qashıqlıqqa, yaǵnıy

$$\delta l = \frac{d}{2} \quad (2)$$

shamasına jılsıqan bolıp shıǵadı.



47-súwret.
Dereklerdiń múmkin bolğan ólshemlerin esaplawǵa.

Bul sistemalardıń hár qaysısındaǵı jaqtılı jolaqlar 256-paragraftaǵı (4a) formulası boyınsha

$$\Delta l = \frac{\lambda}{t} L \quad (3)$$

shamasına jılsıqan boladı. Bul teńlikte t - dereklerdiń arasındaǵı qashıqlıq, L - dereklerden ekranǵa shekemgi qashıqlıq, λ - interferenciyalanatuǵın jaqtılıqtıń tolqın uzınlıǵı.

Eger eki interferenciyalıq súwrettiń bir birine salıstırǵandaǵı awısıwı δl shamasınıń mánisi $\frac{1}{2}\Delta l$ shamasına teń bolsa, onda bir sistemaniń jaqtılı jolaqları ekinshi sistemaniń qarańǵı jolaqlarınıń ústine túsedi hám interferenciyalıq súwret tolıǵı menen jayıladı. Ádette, eger bir interferenciyalıq súwretke salıstırǵanda ekinshi interferenciyalıq súwrettiń awısıwı $\frac{1}{4}\Delta l$ shamasına teń bolsa, onda jolaqlar jetkilikli dárejede keskin boladı dep esaplanadı. Bunnan (2)- hám (3)-ańlatpalardan interferenciyalıq jolaqlardıń ele de baqlawǵa bolatuǵın bolıwı ushın mınaday shártti alamız:

$$d \leq \frac{1}{2} \frac{\lambda}{t} L. \quad (4)$$

Dereklerdiń múmkin bolğan ólshemlerin bahalaw ushın $t = 5 \text{ mm}$ hám $L = 1 \text{ m}$ dep boljaymız. Bunday jaǵdayda $\lambda = 5 \cdot 10^{-5} \text{ sm}$ ushın mınaǵan iye bolamız:

$$d \leq \frac{1}{2} \cdot \frac{5 \cdot 10^{-5}}{5 \cdot 10^{-1}} \cdot 10^2 \text{ sm} = 0,05 \text{ mm}.$$

Eger ekranniń orayı bolğan A noqatınan qaraǵanda dereklerdiń arasındaǵı qashıqlıq t niń shaması kórinetuǵın u múyeshin kirgiziw jolı menen (4)-ańlatpanı túrlendiremiz (47-súwret). Bunday jaǵdayda

$$\operatorname{tg} \frac{u}{2} = \frac{t/2}{L}.$$

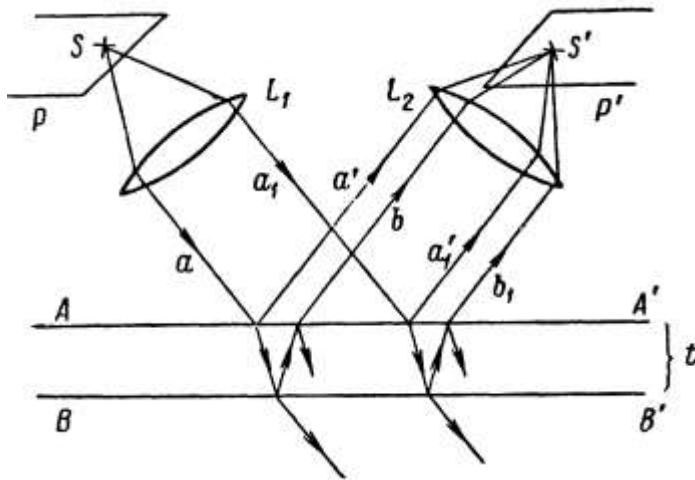
u múyeshin kishi dep esaplap, juwıq túrde $u = t/L$ teńligin jazıwǵa boladı. Al bunnan (4)-formulanı bılayınsha jazıwǵa bolatuǵınlıǵın kóremiz:

$$d \leq \frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda}{u}. \quad (4a)$$

(4a)-formuladan u múyeshi qansha kishi bolsa interferenciyalıq súwrette ele baqlaw ushın dereklerdiń ólshemleriniń de kishi bolıwınıń kerek ekenligi kelip shıǵadı.

§ 262. Móldir plastinkada shaǵılısqandaǵı interferenciya. Móldir plastinkanıń eki betinde shaǵılısqan dástelerdiń interferenciyası interferenciyanıń eń kóp tarqalǵan túri bolıp tabıladı. Eki jaǵdaydı óz aldına qaraymız: tegis parallel plastinkanıń betlerinen shaǵılısqan parallel nurlardıń interferenciyasın hám qalıńlıǵı bir orınnan ekinshi orıńǵa kóshkende ózgeretuǵın plastinkanıń betlerindegi shaǵılısqanıń saldarınan payda bolatuǵın interferenciyanı. Birinshi jaǵdayda *teńdey*

қыялықтардағы интерференциялық жолалары деп аталуы, ал екінші жағдайда *теңдей қалыңлықтардың* интерференциялық жолалары деп аталуы интерференциялық жолалар пайда болады.



48-сұwрет.

Тегis параллель пластинка шағылсқанда
жүзеге келтуғи дәстелердiң
интерференциясы.

1. Теңдей қыялықтардың интерференциялық жолалары. Қалыңлығы t болған мөдiр, бир текли пластинкани қарамыз (48-сұwрет), онiң тегis болған AA' һәм BB' тегislikleri бир бирине параллель. Meyli, S нoқатлық дерегинен линзаниң jәрдемiнде нurlардiң aa_1 параллель дәстеси алынған болсин. Бул дәстениң бир бөлими мөдiр пластинка арқалы өтетуғи, ал және бир бөлими пластинкада шағылсатуғи болсин. Дәсте AA' һәм BB' тегislikleriniң екewinde де шағылсатуғи болғанлықтан, белгил бир жүрислер айыrmасина иye $a'a'_1$ һәм $b'b'_1$ шағылсқан нurlары пайда болады. Бул дәстелер L_2 линзасиниң бас фoкaллық тегisligиниң S' нoқатında жыналaды. Усы нoқаттағы олaрдiң интерференциясиниң нәтиьесин қарамыз. Жүрислер айыrmасиниң мәнисинен гәрезли еки дәстениң тербелisлери бир бирин кұsheytedи yamasa һәлсiretedи.

Жүрислер айыrmасин есaплaw ushың дәстеден биринши бетке A нoқатında i_1 мұьyeshi менен түсетуғи айырым a нурин айырып аламыз (49-сұwрет). Бул нурдiң бир бөлими шағылсип, a' нурин пайда etedi, ал және бир бөлими пластинканиң екiнши бетине B нoқатına түседи. Бул opında онiң бир бөлими синады, бир бөлими шағылсaды. Tap сондай жағдай C нoқатında да opың aлады, бул нoқатта a' нурına параллель болған b' сiңған нуры пайда болады. C нoқатınан a' нуриниң бағитına перпендикуляр бағитта CE перпендикулярın жүргиземиз. Бундай жағдайда пластинканиң синадыw коэффициентин n ге тең, ал пластинканиң сirtındaғы орталықтың (hawаниң) синадыw коэффициентин бирге тең деп есaплap, a' һәм b' нurlариниң жүрислер айыrmасы Δ ushың

$$\Delta = (AB + BC)n - (AE + \frac{1}{2}\lambda) \quad (1)$$

аңлатпасын аламыз. Бул теңликте λ арқалы биз қарap атырған жақтылықтың толқын узинлығы белгиленген. $\lambda/2$ шамасы a нуры hawa менен пластинканиң apасында шағылсқанда пайда болатуғи qosымsha жүрислер айыrmасын береди (261-параграфта айтылғанларға байланысly): eгер пластинканиң сirtındaғы орталық пластинканиң синадыw коэффициентинен ұлкен синадыw коэффициентине иye болғанда yарым толқын узинлығынiң жоғалыwы B нoқатındaғы шағылсыwда да opың алған бolar edi.

49-сұwреттен минаған иye боламыз:

$$AB = BC = \frac{t}{\cos i_2}. \quad (2)$$

Бул теңликте t - пластинканиң қалыңлығы һәм i_2 - синадыw мұьyeshi. Сонiң менен бир қатарда, сұwреттен

$$AE = AC \sin i_2 = 2t \cdot \tan i_2 \sin i_1$$

теңлигине де иye боламыз.

$$\sin i_1 = n \sin i_2$$

теңлигін пайдаланып, AE ushың жазылған аңлатпаны былайынша кóshirip жазамыз:

$$AE = 2tn \frac{\sin^2 i_2}{\cos i_2}. \quad (3)$$

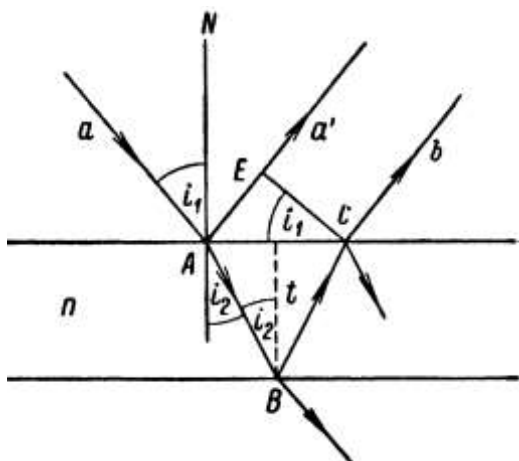
Júrisler ayırması ushın jazılğan (1)-ańlatpaǵa AB, BC hám AE lerdiń ornına olardıń (2)- hám (3)-teńlikler boyınsha alınğan mánislerin qoyıp,

$$\Delta = 2tn \frac{1 - \sin^2 i_2}{\cos i_2} - \frac{1}{2}\lambda$$

yamasa

$$\Delta = 2tn \cos i_2 - \frac{1}{2}\lambda \quad (4)$$

teńliklerin tabamız.



49-súwret.

Tegis parallel tegislikte shaǵılısqan nurlardıń arasındaǵı júrisler ayırmasın esaplawǵa.

Sınıw múyeshi i_2 niń ornına túsiw múyeshi i_1 di qoyıw jolı menen bul ańlatpanı bir qansha túrlendiriwge boladı.

Sınıw nızamın paydalanıp,

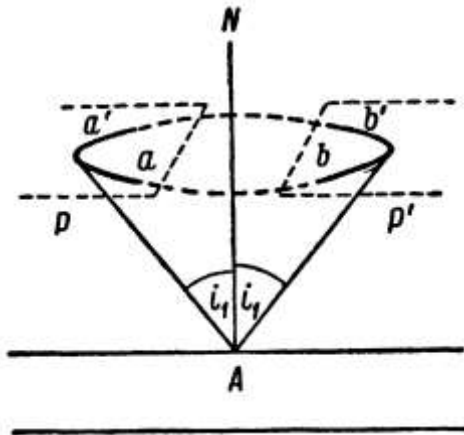
$$\cos i_2 = \sqrt{1 - \sin^2 i_2} = \sqrt{1 - \frac{1}{n^2} \sin^2 i_1}$$

teńligine iye bolamız. Bunnan keyin (4)-ańlatpa mınaday túrge enedi:

$$\Delta = 2t\sqrt{n^2 - \sin^2 i_1} - \frac{1}{2}\lambda. \quad (4a)$$

Linza hesh qanday júrisler ayırmasın bermeytuǵın bolǵanlıqtan (253-paragrafqa qarańız), Δ shaması S' noqatına jetip kelgen nurlardıń arasındaǵı júrisler ayırması bolıp tabıladı. Eger $\Delta = k\lambda$ teńligi orınlanatuǵın bolsa ($k = 0, 1, 2, \dots$), onda S' noqatında maksimum, al $\Delta = (2k + 1)\lambda/2$ teńligi orınlanatuǵın bolsa, S' noqatında minimum alınadı. Solay etip, AA' hám BB' betlerinde shıǵılısqan nurlardıń interferenciyasınıń nátiyjesinde júrisler ayırmasına baylanıslı noqattıń kemirek yamasa kóbirek jarqın bolǵan súwreti alınadı⁹.

⁹ $\Delta = (2k + 1)\lambda/2$ shártı orınlanganda S' súwretiniń intensivligi nolge teń bolmaydı. Sebebi nurlardıń AA' hám BB' tegisliklerinde shaǵılıswınıń saldarınan alınğan interferenciyalıq tolqınlardıń amplitudaları bir birine teń emes.



50-súwret.

Teńdey qıyalıqlar jolaqlarınıń payda bolıwı.

Endi jaqtılıqtıń deregi sıpatında ayırım S noqatı emes, al jaqtılıq shıǵarıp turǵan P bettiń bir uchastkası xızmet etetuǵın bolsın (48-súwret). Interferenciya bolmaǵan jaǵdayda (mısalı, eger $AA'BB'$ plastinkası tegis metall ayna menen almasırlıǵan bolsa) linzaniń bas fokallıq tegisliginde P noqtatınıń P' beti túrindegi súwreti alınǵan bolar edi. Plastinkada shaǵılısqan dástelerdiń intenferenciyasınıń saldarınan $\Delta = k\lambda$ shárti orınlanatuǵın [Δ shaması (4a) ańlatpasında beriledi] P betiniń noqtatlarınıń jıynaǵı ǵana jarqın bolıp kórinedi. k pütün sanı *interferenciyanıń tártibi* dep ataladı. Berilgen $k = k_0$ shamalarında noqtatlarǵı usınday jıynaǵı (4a) ańlatpası boyınsha $i_1 = \text{const}$ shártin qanaatlandırıwı kerek; noqtatlarǵı bul jıynaǵı P betiniń kósheri AN normalı bolǵan, ashılıw múyeshi $2i_1$ shamasına teń konus penen kesilisiwinde payda bolǵan aa' iymekliginde jatadı (50-súwret). Bul iymeklikke P' tegisligindegi bb' jaqtılı jolaq sáykes keledi. k nıń k_0 ge teń bolmaǵan mánislerinde basqa jaqtılı jolaqlar alınadı. Olardıń arasında qarańǵıraq jolaqlar jaylasadı. Solay etip, linzaniń bas fokallıq tegisligi L_2 de interferenciyalıq jolaqlardıń sisteması payda boladı. Hár bir jolaq i_1 múyeshiniń turaqlı mánisine, yaǵnıy AN normalına qatnası boyınsha nurlardıń teńdey qıyalıǵına sáykes keledi. Bunnan qarap ótilgen interferenciyalıq jolaqlardıń ataması - *teńdey qıyalıqlar jolaqları* ataması payda bolǵan. Joqarıda ayılǵanlardan teńdey qıyalıqlar jolaqları linzaniń bas fokallıq tegisligi L_2 de payda bolatuǵınlıǵı hám onı baqlaw ushın jaqtılıqtıń keń dereginıń alınatuǵınlıǵı kelip shıǵadı (jaqtılıq shıǵarıp turǵan P beti túrindegi).

Interferenciya plastinka arqalı ótken nurda da alınadı, Biraq bul jaǵdayda alınǵan súwrettiń anıqlıǵı (keskinligi) tómén boladı. Sebebi, plastinka arqalı ótken dásteniń intensivligi BB' hám AA' betlerinde eki ret shaǵılısqan nurdıń intensivliginen ádewir úlken [ótken jaqtılıqtaǵı ayqın (keskin) túrdegi interferenciyalıq jolaqlardıń alınıwınıń múmkin ekenligi 272-paragrafta kórsetiledi]. Biz qarap ótken interferenciyalıq súwret belgili tolqın uzınlıǵı λ ge iye monoxromat jaqtılıqta payda boladı. Eger jaqtılıq monoxromat bolmasa hám tolqın uzınlıǵınıń bazı bir intervalına tiyisli bolsa, onda berilgen i_1 túsiw múyeshinde

$$\Delta = k\lambda_1 = (k+1)\lambda_2 = (k+2)\lambda_3 = \dots \quad (5)$$

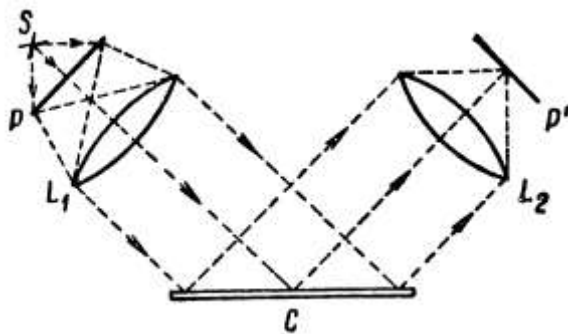
shártin qanaatlandıratuǵın barlıq $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$ ushın maksimumlar payda boladı.

Nátiyjede hár qıylı tolqın uzınlıqları ushın jolaqlardıń bir biriniń ústine túsiwi orın aladı. Plastinaniń qalınlıǵı t qanshama úlken bolsa k pütün sanınıń shaması da úlken hám, usıǵan sáykes, (5)-ańlatpa boyınsha jolaqları bir biriniń ústine túsetuǵın $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$ tolqın uzınlıqlarınıń arasındaǵı ayırmalar kishi boladı. Usınıń menen birge, plastinkanıń qalınlıǵı qanshama úlken bolsa birdey bolǵan λ tolqın uzınlıǵı ushın hár qıylı tártiptegi jolaqlar bir birine tıǵız jaylasadı. Sonlıqtan, joqarıda ayılǵanlar tiykarında mınaday juwmaqqa kelemiz: plastinka qansha qalıń bolsa jolaqlar tıǵız jaylasadı hám hár qıylı tolqın uzınlıqlarınıń jolaqlarınıń bir biriniń ústine túsiwi kúshlierek júzege keledi. Usınday betlesiwlerdiń nátiyjesinde qalıń plastinkanı aq jaqtılıq penen jaqtılandırǵanda L_2 linzasınıń fokallıq tegisliginde kóbirek yamasa kemirek jaqtılandırıw payda boladı hám jolaqlar kórinbey qaladı. Solay etip, qalıń plastinkada payda bolatuǵın teńdey

qıyılıqlar interferenciyalıq jolaqların baqlaw ushın jetkilikli dárejedegi monoxromat jaqtılıq kerek boladı. Usınıń menen birge, qalın plastinkanıń ulıwmalıq ólshemleri úlken hám bul jaǵday usı plastinkanıń betiniń tegis parallel halǵa hám bir tekli bolıwına (sındırıw koefficientiniń turaqlı bolıwı) alıp keliniwin qıyınlastıradı. Shaǵılısqanda payda bolatuǵın interferenciyalıq jolaqlardı plastinka juqa bolǵanda baqlaw ádewir ańsat. Júdá juqa plastinka ushın interferenciyanıń tártibi úlken emes hám aq jaqtılıq penen jaqtılandırǵanda da jolaqlar kórinedi; bunday jaǵdayda olar boyalǵan bolıp kórinedi.

Kishi ólshemlerge iye eki derektiń (Frenel aynaları h.t.b.) bolıwınıń sebebinen payda bolatuǵın interferenciyalıq qubılıslarda eki derekten shıqqan tolqınlar bir biri menen betlesetuǵın barlıq oblastta terbelislerdiń maksimumları menen minimumlarınıń orınları baqlanadı. Bul interferenciyalıq jolaqlardı qanday da bir linzalardıń járdeminen paydalanbay-aq ekranda tikkeley baqlawǵa múmkinshilik beredi. Biz teńdey qıyalıq jolaqların baqlaw ushın jaqtılıqtıń keń dereginiń kerek ekenligin kórdik. Nátiyjede, tegis parallel plastinkanıń eki betinen shaǵılısqan nurlar betlesetuǵın oblasttaǵı hár bir noqatta jaqtılıq dereginiń hár qıylı noqatlarınan shıqqan tolqınlar qosıladı hám interferenciyalıq jolaqlar tikkeley baqlanbaydı. Bizler interferenciyalıq jolaqlardıń tek ǵana linzanıń bas fokallıq tegisligi L_2 de payda bolatuǵınlıǵın kórdik. Basqa sóz benen aytqanda "linzanıń sheksizlikke fokuslanǵan" bolıwı kerek. Sonlıqtan teńdey qıyılıqlar jolaqları sheksizlikte jaylasqan dep aytadı.

Teńdey qıyılıqlar interferenciyalıq jolaqların demonstraciyalaw ushın bir tekli bolǵan slyudanıń juqa japıraǵın qollanıwǵa boladı. Usınday slyuda japıraqtıń betin jetkilikli dárejede tegis hám bir biri menen parallel dep esaplawǵa boladı. Dúzilistiń ulıwmalıq sxeması 51-súwrette keltirilgen. Jaqtılıq deregi sıpatında S sinap lampası alınadı. Bunday lampanıń jaqtılıǵı keskin túrdegi interferenciyalıq jolaqlardı payda etetuǵın tolqın uzınlıqları belgili bolǵan az sandaǵı spektrallıq sızıqlardan turadı. Sinap lampa menen jaqtılandırılǵan P gúńgirt shiyshesi jaqtılıqtıń keń deregi bolıp tabıladı. Linza slyuda bolǵan C japıraǵına túsetuǵın jaqtılıqtıń parallel dástelerin payda etedi. L_2 linzasınıń bas fokallıq tegisligine P' ekranın jaylastırıp, onda teńdey qıyalıq jolaqların kóriwge boladı. Ekrandaǵı interferenciyalıq jolaqlardıń jaqsı kórinıwı ushın, joqarıda ayılǵanınday, ol L_2 linzasınıń bas fokallıq tegisliginde jaylasqan bolıwı kerek.



51-súwret.

Nurlar slyuda japıraqtıń betlerinde shaǵılısqanda teńdey qıyılıqlar jolaqların baqlawdıń sxeması.

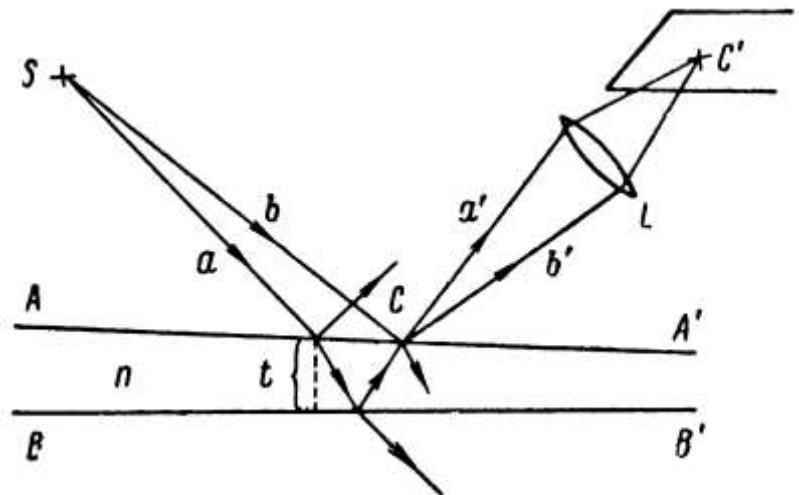
L_2 linza menen ekrandı tikkeley kóz benen almasırwǵa boladı. Bunday jaǵdayda L_2 linzasınıń ornın kózdiń sındırıwshı sisteması atqaradı (xrustalik, móldir qabıq). Eger kóz akkomodaciyalanbaǵan bolsa, yaǵnıy onıń fokusında sheksiz qashıqlatılǵan predmetler alınatuǵın bolsa, onda teńdey qıyılıqlar jolaqları qanday da bir linzanı paydalanbasa da kórinip turadı.

2. Teńdey qalırılıqlar interferenciyalıq jolaqları. Endi betleri bir birine parallel bolmaǵan móldir plastinkanı qaraymız. Bunday jaǵdayda da AA' hám BB' betleriniń ekewinen shaǵılısqan nurlar payda boladı. Meyli, S noqatlıq dereginiń a nurı (52-súwret) BB' betinen shaǵılısqandıń hám AA' betiniń qasında eki ret sınıwdıń saldarınan C noqatı arqalı ótetuǵın hám L linzasına barıp túsetuǵın a' nurınıń payda bolıwına alıp kelsin. S dereginen shıqqan nurlar hár qıylı baǵıtlarda tarqalatuǵın bolǵanlıqtan, sol nurlardıń arasınan AA' betiniń C noqatına kelip

túsetuǵın b nurı tabıladı. Bul noqatta onıń bir bólimi shaǵılısadı (hám nurdıń bir bólimi sınadı, Biraq sıǵan nur bizdi házir qızıqtırmaydı) hám a' nurına salıstırǵanda baǵı bir múyeshke burılǵan b' nurın payda etedi. a' hám b' nurları L linza arqalı ótip, C noqatınıń súwreti bolǵan C' noqatında kesilisedi. a' hám b' nurlarınıń ekewi de bir S dereginde payda bolǵanlıqtan olar kogerentli boladı hám interferenciyalanadı. a' hám b' nurlarınıń arasındadı Δ nıń jup yamasa tak san eselengen yarım tolqın uzınlıǵına teń bolıwına baylanıslı, C' noqatında maksimum yamasa minimum payda boladı.

Eger AA' hám BB' betleriniń arasındadı múyesh kishi hám S deregi plastinkadan alısta jaylasqan bolsa, onda Δ júrisler ayırması juwıq túrde (4a) formulanıń járdeminde anıqlanadı. Jaqtılıqtıń deregi plastinkadan alısta jaylasqan jaǵdayda nurlar plastinkaǵa shama menen birdey múyesh penen túsedı hám bunday jaǵdayda Δ júrisler ayırması plastinkanıń qalınlıǵı t nıń ózgerisi menen baylanıslı boladı. Eger C noqatına plastinkanıń L linzalıń AA' beti menen túyinles bolǵan fokallıq tegisliginde jaylasqan C' noqatında maksimum sáykes keletuǵın bolsa, onda maksimum birdey qalınlıqqa iye orındadı plastinkanıń AA' tegisliginde jatqan barlıq C_i noqatlarınıń barlıǵına sáykes keledi. Solay etip, L linzalıń fokallıq tegisliginde payda bolatuǵın interferenciyalıq jolaqlar plastinkanıń birdey qalınlıqqa iye bolǵan orınlarına sáykes keledi. Bunnan birdey qalınlıqlardadı jolaqlar ataması kelip shıqqan. Álbette, eger sına tárizli formaǵa iye bolatuǵın bolsa, onda teńdey qalınlıqlar interferenciyalıq jolaqları sınanıń qabırǵasına parallel bolǵan tuwrılar túrine iye boladı.

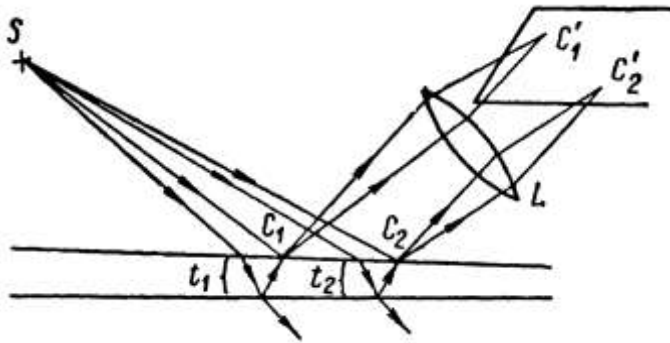
52-súwret.
Dástelerdiń betleri parallel
bolmaǵan plastinkada
shaǵılısqandadı
interferenciyası.



Joqarıda aytılp ótilgenindey, birdey qalınlıqlar jolaqları plastinkanıń AA' beti menen túyinles bolǵan L linzasınıń fokallıq tegisliginde baqlanadı. Basqa sóz benen aytqanda, ekranda keskin túrdegi (anıq kórinetuǵın) interferenciyalıq jolaqlardı baqlaw ushın L linzası AA' plastinkasınıń betine fokuslanǵan bolıwı kerek.

Teńdey qalınlıqlar interferenciyalıq jolaqları shaǵılıstıratuǵın plastinkanıń betinde lokalizaciyanǵan.

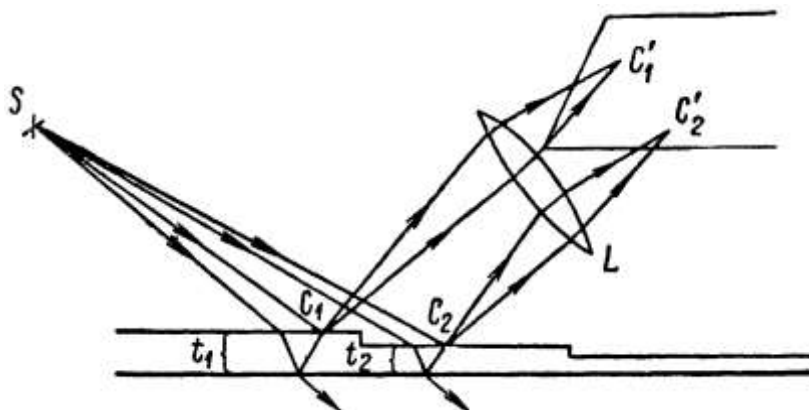
Teńdey qalınlıqlar jolaqların L linzası bolmaǵan jaǵdayda da kóz benen tikkeley baqlawǵa boladı. Bunday jaǵdayda linzalıń ornın kózdiń sıdırıwshı sisteması iyeleydi. Bunday jaǵdayda kózdi plastinkanıń betine fokuslaw kerek.



53-súwret.
Plastinkanıń hár qıylı bolǵan t_1 hám t_2 qalıńlıqlarına sáykes keletuǵın maksimumlardıń payda bolıwı.

Monoxromat emes bolǵan jaqtılıqta hár qıylı tolqın uzınlıqlarına sáykes keletuǵın jolaqlar teńdey qıyalıqlar jolaqlarındaǵıday bolıp bir biriniń ústine túsedı. Sonlıqtan birdey qalıńlıqqa iye bolmaǵan qalıń plastinka bolǵan jaǵdayda interferenciyalıq jolaqlar tek monoxromat jaqtılıqta ǵana payda boladı. Plastinkanıń betleriniń parallellikten ózgesheliginiń úlken bolmawı kerek, bunday bolmaǵan jaǵdayda teńdey qalıńlıqlar jolaqları bir birine dım jaqın jaylasadı. Júdá juqa plastinkalarda jolaqlardıń aq jaqtılıqta da baqlanıwı múmkin. Bunday jaǵdayda reńli jolaqlar payda boladı. Meyli, baǵı bir orında plastinkanıń qalıńlıǵı C_1 noqatı ushın, júrisler ayırması Δ nıń shaması, misalı, tolqın uzınlıǵı 0,70 mkm bolǵan qızıl nur ushın tolqın uzınlıǵına teń bolsın (53-súwret). Demek, bunday nurlar ushın interferenciyalıq maksimum sáykes keledi. Bunday jaǵdayda tap sol C_1 noqatında tolqın uzınlıǵı 0,35 mkm bolǵan ultrafiolet nurlar bir birin azı-kópki háliretedi. Solay etip, plastinkanıń sol noqatı ushın qızılǵa boyalǵan maksimum payda boladı. Tap sol sıyaqlı, plastinkanıń basqa júrisler ayırmasın beretuǵın basqa noqatlarında basqa reńli maksimumlar payda boladı (misalı, C_2 noqatınan).

Baǵı bir juqa plastinka bir uchastkada turaqlı t_1 qalıńlıǵına, al basqa uchastkada da turaqlı t_2 qalıńlıǵına iye dep boljayıq (53-súwret). Bunday jaǵdayda barlıq birinshi uchastkada (turaqlı t_1 túsiw múyeshinde) plenka Δ_1 júrisler ayırmasın, al ekinshi uchastkanıń barlıǵında Δ_2 júrisler ayırmasın beredi. Joqarıda ayılǵanlarǵa sáykes, eki bólim hár qıylı tolqın uzınlıqları ushın maksimumdı beredi hám hár qıylı reńlerge iye bolıp kórinedi. Shaǵılısqan nurlardıń interferenciyasınıń nátiyjesinde payda bolǵan usınday hár qıylı reńlerge iye bolıw *juqa plastinkalardıń reńleri* atamasına iye. Álbette, túsiw múyeshi t_1 diń ózgerisi menen júrisler ayırması da, demek, plastinkanıń reńi de ózgeredi.



54-súwret.
Juqa plastinkalardıń reńleriniń payda bolıwı.

Juqa plastinkalardıń reńlerin sabın kóbiklerin, suwdıń betindegi maydıń juqa plenkasın, hár qıylı plastinkalardıń arasındaǵı juqa hawa qatlamın baqlaǵanda ańsat kóriwge boladı.

Teńdey qalıńlıqlar jolaqları ushın bir qansha dara jaǵdaylardı qaraymız.

1-mısal. SHıyshe ($n = 1,5$) sınanıń betleriniń arasındaǵı múyesh $\alpha = 0,1'$ shamasına teń. Sınaǵa onıń betine normal baǵıtta tolqın uzınlıǵı $\lambda = 0,5$ mkm bolǵan monoxromat nurlardıń dástesi kelip túsedı (55-súwret). Jolaqlardıń arasındaǵı sıızıqlı qashıqlıqtı tabırıń.

Sheshimi. Bul jaǵdayda $i_1 = 0$ hám (4a) formula boyınsha júrisler ayırması Δ juwıq túrde mınaǵan teń

$$\Delta = 2tn - \frac{1}{2}\lambda.$$

Meyli, C_1 hám C_2 noqatlarına eki qorısılás jaqtılı jolaqlar sáykes keletuǵın bolsın, bunday jaǵdayda bul noqatlardaǵı júrisler ayırması Δ_1 hám Δ_2 ushın mınalargá iye bolamız:

$$\Delta_1 = 2nt_1 - \frac{1}{2}\lambda = k\lambda,$$

$$\Delta_2 = 2nt_2 - \frac{1}{2}\lambda = (k-1)\lambda.$$

Bul teńliklerdegi t_1 menen t_2 arqalı C_1 hám C_2 noqatlarındaǵı sınanıń qalınlıǵı belgilengen ($t_2 < t_1$ teńsizligi orınlanadı dep esaplaymız). Bul eki teńlikten aǵzama-aǵza alıp

$$2n(t_1 - t_2) = \lambda$$

teńliginiń orınlı ekenligin hám bunnan

$$t_1 - t_2 = \lambda/2n \quad (6)$$

qatnasın tabamız. Eger l arqalı biz izlep atırǵan jolaqlardıń arasındaǵı qashıqlıqtı belgilesek, onda 55-súwrette kórinip turǵanıday,

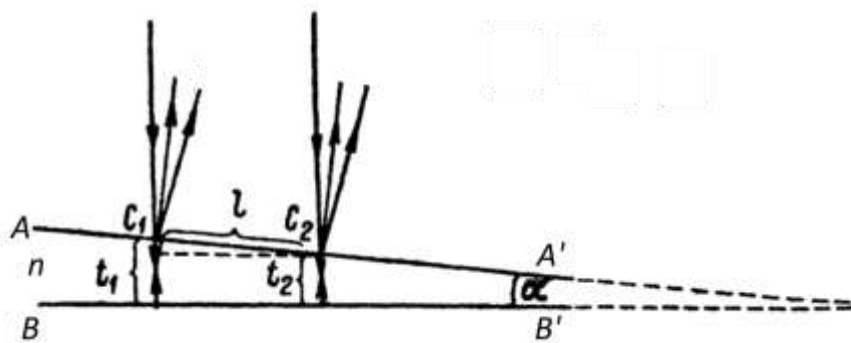
$$l \cong \frac{t_1 - t_2}{\alpha}$$

teńligine iye bolamız. Bul teńlikte α múyeshi radianlarda ańlatılǵan bolıwı kerek. Bul teńlikke $t_1 - t_2$ ayırmasınıń ornına onıń (6)-ańlatpa boyınsha mánisin qoysaq, onda

$$l \cong \frac{\lambda}{2n\alpha} = \frac{5 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 1,5 \cdot 2,9 \cdot 10^{-5}} = 0,56 \text{ sm}$$

shamasına iye bolamız.

Solay etip, jolaqlar sınanıń betinde bir birine 5,5 mm qashıqlıqta jaylasadı eken. Máseleni keri baǵıtta sheshiwge de boladı: teńdey qalınlıqlar interferenciyalıq jolaqlarınıń arasındaǵı qashıqlıq boyınsha sınanıń α múyeshin de tabıwǵa boladı. Bul usıl múyeshtiń shaması júdá kishi bolǵan jaǵdaylarda sınanıń múyeshlerin tabıw ushın ámelde jiyi qullanıladı.



55-súwret.
Sınaǵı interferenciya.

2-mısal. Tegis shıysheńıń BB' betinde (56-súwret) AA' tegis-dóńes linza qoyılǵan. Onıń iymeklik radiusı R ge teń. Linza menen tegisliktiń arasında hawa qatlamı payda boladı. Hawa qatlamın sheklep turǵan betlerdegi shaǵılısıwlarda payda bolatuǵın teńdey qalınlıqlar iymeklikleriniń túrin anıqlańız. Jaqtılıqtı linzaǵa normal baǵıtta kelip túsedı dep esaplańız.

Sheshimi. Hawa qatlamınıń teńdey qalınlıqlar orınları orayı BB' tegisligi menen tiyisetuǵın O noqatında jaylasqan radiusı r bolǵan sheńber bolıp tabıladı. $r < R$ teńsizligi orınlanganda hám jaqtılıq normal baǵıtta túskende júrisler ayırması Δ nıń mánisi (4a) formulası menen juwıq túrde ańlatıladı. Hawanıń sıdırıw koefficienti $n = 1$ dep esaplap, mınanı alamız:

$$\Delta = 2t + \frac{\lambda}{2}.$$

$\lambda/2$ shamasınıń aldındaǵı belgi endi plus etip alınağı, sebebi yarım tolqın uzınlıǵınıń joǵalıwı hawa qatlamı menen BB' tegisliginiń arasındaǵı shegarada shaǵılısıwınıń saldarınan júzege keledi. Jaqtılıq interferenciyalıq jolaqlardıń payda bolıw shárti bılayınsha jazıladı:

$$\Delta = 2t + \frac{\lambda}{2} + k\lambda. \quad (7)$$

Bul ańlatpada k - pútin san.

Súwretten $r \ll R$ bolǵan jaǵdayda juwıq túrde

$$t = \frac{r^2}{2R}$$

teńsizliginiń orınlı ekenligi kelip shıǵadı.

t nıń bul mánisin (7)-ańlatpaǵa qoyıp

$$\frac{r^2}{R} = (k + \frac{1}{2})\lambda$$

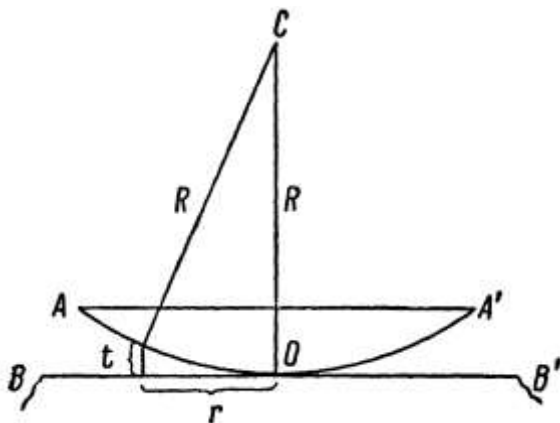
teńliginiń orınlı ekenligin tabamız hám bunnan keyin r ushın mınaday ańlatpanı alamız:

$$r = \sqrt{(k + \frac{1}{2})\lambda R}$$

formulasın alamız.

Solay etip, bul jaǵdayda teńdey qalıqlıqlar interferenciyaq jolaqları koncentrik saqıynalar túrine iye boladı eken hám olardıń radiusı (8)-formulasınń járdeminde anıqlanadı. Linza menen tegisliktiń tiyisip turǵan ornında qalırlıǵı tolqın uzınlıǵınan ádewir kishi bolǵan júdá juqa hawa qatlamı payda boladı. Sonlıqtan bul noqatta nurlardıń arasında payda bolǵan júrisler ayırması tek BB' tegisliginde shashıradıń nátiyjesinde júzege keletuǵın yarım tolqın uzınlıǵınıń joǵalıwı menen ǵana anıqlanadı. Usınıń saldarınan Δ shaması $\lambda/2$ ge teń boladı hám interferenciyaq súwrettiń orayı O bolǵan noqatında qarańǵı daq payda boladı.

Aq jaqtılıq penen jaqtılandırılǵanda interferenciyaq saqıynalar boyalǵan hám baqlanatuǵın saqıynalardıń sanı úlken emes boladı. Sebebi k nıń úlken mánislerinde hár qıylı uzınlıqlarǵa iye bolǵan tolqınlardıń interferenciyaq saqıynaları bir biriniń ústine túsedi hám sonlıqtan olar jayıladı.



56-súwret.

Nyuton saqıynalarınıń payda bolıwı.

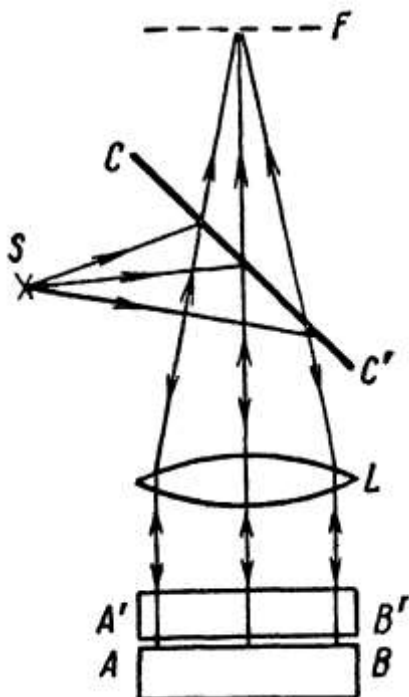
Joqarıda kórsetilgen teńdey qalırlıqlar jolaqları Nyuton tárepinen birinshi baqlandı hám táriyiplendi. Sonlıqtan, olardı *Nyuton saqıynaları* dep ataydı. Tolqınlardıń interferenciasın ele bilmegenlikten, Nyuton ózi baqlaǵan qubılıstı túsindire almadı hám "jaqtılıqtıń jeńil shaǵılısıw menen jeńil ótiwi" qubılısı orın aladı dep boljadı (250-paragraf).

§ 263. Interferenciya qubılıslarınıń qollanıwı. Bunnan aldırǵı paragrafta jaqtılıqtıń interferenciasınıń járdeminde eki tegisliktiń arasında payda bolǵan kishi múyeshlerdi ólsheuge bolatuǵınlıǵı qaraldı. Usınıń menen bir qatarda interferenciya qubılısın basqa da bir qatar dál ólshewlerdi ótkeriw ushın qollanıwǵa boladı; interferenciya qubılıslarınıń fizikalıq eksperimentlerdegi hám óndiristegi qollanıw oblastı tez keńeymekte. Bul paragrafta biz interferenciyanıń bazı bir ápiwayı qollanıwın qaraymız.

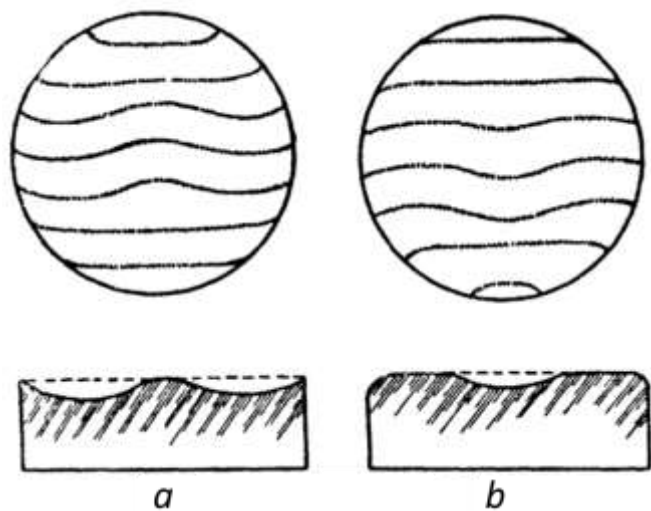
1. Betlerdiń sapasın izertlew. Optikalıq ásbaplardıń betlerin soqqanda júdá úlken dálilik talap etiledi. Joqarıda aytılıp ótilgendey, aynalardıń tegis betleri yamasa linzalardıń sferalıq betleri sáykes ideal bolǵan geometriyalıq betlerden jaqtılıq tolqınıń tolqın uzınlıǵınıń úlken bolmaǵan

úlesine ғана ayırmaға iye bolıwı kerek (tolqın uzınlıǵınıń $\frac{1}{4}$ bólegi hám onnan da kishi). Betlerdiń usınday joqarı sapası interferometrlik jol menen ámelge asırıladı.

SHiyshe plastinkanıń betiniń ideal bolǵan betke jaqınlıǵınıń dárejesin anıqlaw boyınsha ápiwayı máseleni qaraymız. Bunday sıraw jumısları joqarı sapaǵa iye bolǵan "sıraw ótkeriw aynasınıń" járdeminde ótkeriledi. Bunday aynanıń betleriniń biri ideal bolǵan geometriyalıq betten ádette tolqın uzınlıǵınıń jigirmadan birine teń shamadan úlken bolmaǵan ayrıladı. Sınap kóriletuǵın bet juqa hawa qatlamı payda bolatuǵınday etip "sıraw ótkeriw aynasına" qısıladı. Usınday hawa qatlamı arqalı jaqtılıqtı ótkergende teńdey qalınlıqlardaǵı interferenciyalıq jolaqlar payda boladı. Bunday jolaqlardı baqlaw ushın 57-súwrette kórsetilgendey ápiwayı dúzilis paydalanıladı. Bul súwrette S - jaqtılıqtıń deregi, CC' - yarım gúmislegen ayna, L — "sıraw ótkeriw aynasına" qısıp qoyılǵan sınap kóriletuǵın plastinkaǵa kelip túsetuǵın parallel dásteni alıw ushın qollanılatuǵın linza. "Sınap kóriletuǵın aynanıń" AB beti menen izertlenetuǵın $A'B'$ betinen shaǵılısqan nurlar CC' yarım gúmislegen bet arqalı ótedi hám L linzasınıń F fokallıq tegisliginde teńdey qalınlıqlar jolaqları payda boladı. Eger AB beti menen izertlenetuǵın $A'B'$ betiniń arasındǵı hawa qatlamı sınanıń formasına iye payda bolatuǵın bolsa bul jolaqlar ápiwayı túrge iye boladı. Eger plastinkalardıń betine muqiyatlı túrde shańdı úrlese hám olardı bir biriniń ústine qoyǵanda bir tárepın qıssa, usınday tájiriybeni júzege keltiriwge boladı. Eger betlerdiń ekewi de ideal túrde tegis bolsa, onda olardıń arasında sına túrindegi hawa qatlamı payda boladı hám payda bolǵan teńdey qalınlıqlar jolaqları sınanıń qabırǵasına parallel bolǵan tuwrılar túrine iye boladı. Tegisliklikten qálegen awıtqıw interferenciyalıq jolaqlardıń qıysayıwına alıp keledi. 58a hám 58b súwretlerde izertlenip atırǵan bette dóńes orın menen oyıslıq bar bolǵan jaǵdayda jolaqlardıń túrleri kórsetilgen. Plastinkalardıń dáslep bir tárepın, al keyin ekinshi tárepın qısıw arqalı sınanıń qabırǵalarınń orınların ózgertiwge boladı hám usınday usıldıń járdeminde barlıq baǵıtlardaǵı bettiń sapasın izertlewdiń múmkinshiligi tuwıladı.



57-súwret. Betlerdiń sapasın tekserip kóriw ushın arnalǵan ásbap.



58-súwret. Dóńes (a) hám oyıs (b) orın bar jaǵdayda payda bolǵan interferenciyalıq jolaqlardıń sırtqı túri.

Keskin túrdegi interferenciyalıq jolaqlardıń alınıwı ushın monoxromat jaqtılıqtı paydalanıw kerek. Onıń ushın S jaqtılıq deregi sıpatında kózge kórinetuǵın oblastta az sandaǵı keń spektrallıq

sızıqlarğa iye bolğan sınap doǵası alınadı (57-súwret). Bul spektrallıq sızıqlardıń biriniń jaqtılıǵı filtrdiń járdeminde ajratıp alınadı.

2. Tolqın uzınlıǵınıń kishi ózgerislerin ólshew. Joqarıda qarap ótilgen birdey qalıńlıqlar jolaqları qanday da bir qatlamnıń qalıńlıǵınıń júdá kishi ózgerisin ólshew ushın da qollanıladı. Eger, qanday da eki bet bir biri menen sınanı payda etetuǵın bolsa, onda shaǵılısqan jaqtılıqta bir birine parallel bolğan tuwrılar túrindegi teńdey qalıńlıqlar jolaqları payda bolatuǵınıń biz kórdik. Jaqtılı jolaq payda bolğan orındaǵı júrisler ayırması

$$\Delta_1 = 2d_1n - \frac{1}{2}\lambda = k\lambda$$

shamasına teń boladı. Eger betler arasındaǵı α múyeshin saqlap, bir birine salıstırǵanda jılıyıtıǵın bolsa, onda sınanıń berilgen noqatındaǵı sınanıń qalıńlıǵı d_1 úlkeye baslaydı hám júrisler ayırması $k\lambda$ shamasına teń bolmay qaladı. Álbette, bunday jaǵdayda sınanıń qabırǵasına jaqın bolğan noqatta júrisler ayırması Δ_1 shamasına teń boladı. Usınıń nátiyjesinde jolaq sınanıń qabırǵası tárepke qaray jılısadı. d qalıńlıǵınıń shaması júrisler ayırması Δ nıń mánisi $(k+1)\lambda$ shamasına teń bolatuǵınday shamaǵa jetkende, onda biz qarap atırǵan orında qaytadan jaqtılı jolaq payda boladı. Bunday jaǵdayda mınaday teńlik orınlanadı:

$$\Delta_2 = 2d_2n - \frac{1}{2}\lambda = (k+1)\lambda.$$

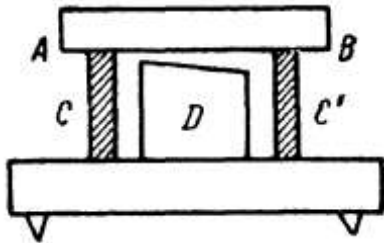
Sońǵı eki teńlikten mınaday jaǵdaydı kóremiz: interferenciyalıq súwret bir jolaqqa jılısqanda usı orındaǵı sınanıń qalıńlıǵı

$$d_2 - d_1 = \frac{\lambda}{2n}.$$

Interferenciyalıq súwret κ jolaqqa jılısqanda, qalıqlıqtıń ózgerisi mınaǵan teń boladı:

$$d_{\kappa+1} - d_1 = \kappa \frac{\lambda}{2n}.$$

Tolqın uzınlıǵı λ nıń mánisi $5 \cdot 10^{-5}$ sm shamasında bolǵanlıqtan, interferenciyalıq jolaqtıń jılısıwı boyınsha qalıqlıqtıń 10^{-5} sm ge ózgerisin ólshew múmkinshilik tuwıladı.



59-súwret.
Interferenciyalıq dilatometr.

Mısalı, usınday usıldı ólshemleri úlken bolmaǵan úlgerler túrindegi qattı denelerdiń jılılıq keńeyiwı coefficientlerin dál ólshewge boladı. Onıń ushın 59-súwrette kórsetilgen interferenciyalıq dilatometr dep atalatuǵın dúzilis paydalanıladı. Ásbap ádette ádettegidey balqıtılǵan kvarctan tayarlanǵan hám jılılıq keńeyiwı coefficienti muqiyatlı túrde ólshengen CC' saqıynasınan turadı. Saqıynanıń ústinde tegis betlerge iye shıyshe plastinka jatadı. Saqıynanıń ishine astırǵı hám ústingi betleri jaqsı polirovkalanǵan izertlenetuǵın D denesi jaylastırıladı. D denesi onıń joqarı beti menen shıyshe plastinkanıń AB betiniń arasında hawanıń sına tárizli juqa qatlamı payda bolatuǵınday etip jaylastırıladı. Ásbaptı joqarıdan jaqtılandırǵanda teńdey qalıńlıqlar jolaqları payda boladı. Ástaptı qızdırǵanda D denesi menen CC' saqıynasınıń jılılıq coefficientleriniń hár qıylı bolatuǵınıń baylanıslı hawa qatlamınıń qalıńlıǵı ózgeredi hám usıǵan sáykes interferenciyalıq jolaqlar jılısadı. Jolaqlardıń jılısıwı boyınsha denelerdiń ólshemleriniń ózgerisin hám sońan sáykes jılılıq keńeyiwı coefficientin esaplawǵa boladı.

Interferenciyalıq usıldı hár qıylı sebeplerge baylanıslı (mexanikalıq sozıw, iyiw h.t.b.) uzınlıqlardıń ózgerislerin ólshew ushın da paydalanadı. V.P.Linnik mikrointerferometr dep

atalatúgın polirovkalánan betlerdegi tırnalánan orınlardıń tereńligin, basqa da defektlerin ólsheytuǵın arnawlı ásbaptı konstruksiyaladı.

§ 264. Interferometrler hám olardıń qollanıluwı. Interferometrler dep atalatúgın hám kópshilik jaǵdaylarda sınıw koefficientlerin ólshew ushın qollanılatúgın bir qatar ásbaplardı qaraymız. Usınday tiptegi ásbaptıń eń ápiwayı túri sxeması 60-súwrette kórsetilgen Jamen interferometri bolıp tabıladı. Interferometr birdey t qalıńlıqtaǵı eki dana qalıń tegis-parallel $ABB'A'$ hám $CDD'C'$ plastinkalarınan turadı. Nur jaqtılıqtıń S dereginen plastinkanıń AB qaptalına túsedi, bul qaptalda jaqtılıqtıń bir bólimi shaǵılısadı, al ekinshi bólimi sınıp, artqı $A'B'$ qaptalında shaǵılısadı. Nátiyjede 1 hám 2 nurları payda bolıp, olardıń bir bólimi ekinshi plastinkanıń CD qaptalınan, al ekinshi bólimi artqı $C'D'$ qaptalında shaǵılısadı. Bul shaǵılısıwlarıń saldarınan tórt dana $1'$, 1 , 2 hám $2'$ nurları payda boladı, olar bir biri menen betlesip, interferenciyalanadı.

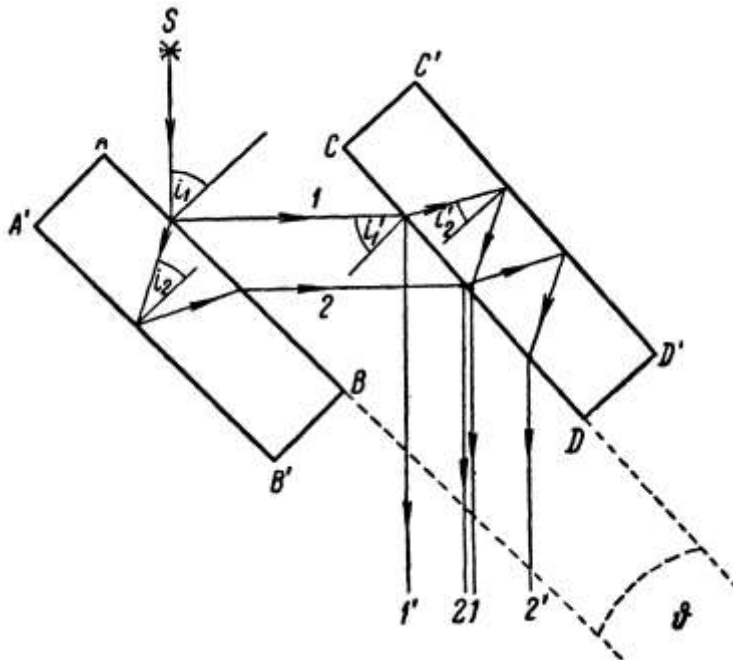
$ABB'A'$ plastinkasında shaǵılısqanda 2 hám 1 nurlarınıń arasında

$$\Delta_1 = 2tn \cos i_2 - \frac{1}{2} \lambda$$

shamasına teń Δ_1 júrisler ayırması payda boladı [262-paragraftaǵı (4)-formulaǵa qarańız]. Bul teńlikte i_2 - plastinkanıń $A'B'$ qaptalına nurdıń túsiw múyeshi hám n - plastinka soǵılǵan materialdıń sındırıw koefficienti. Nurlardıń ekinshi plastinkada shaǵılısıwınıń nátiyjesinde 1 hám 2 nurlarınıń arasında mınaday júrisler ayırması payda boladı:

$$\Delta_2 = 2tn \cos i'_2 - \frac{1}{2} \lambda.$$

Bul teńlikte i'_2 - ekinshi plastinkanıń $C'D'$ qaptalına túsiw múyeshi.



60-súwret.
Jamen interferetriniń
sxeması.

Eki plastinkada shaǵılısqannan keyin nurlardıń arasında payda bolǵan júrisler ayırması Δ mınaǵan teń boladı:

$$\Delta = \Delta_2 - \Delta_1 = 2tn(\cos i'_2 - \cos i_2). \quad (1)$$

Eger plastinkalardıń ekewi de bir birine qatań túrde parallel bolsa, onda $i'_2 = i_2$ hám $\Delta = 0$, yaǵnıy 1 hám 2 nurlarınıń arasında hesh qanday júrisler ayırması payda bolmaydı hám olar bir birin kúsheytedi.

Eger plastinkalardıń arasındaǵı ϑ múyeshiniń shaması nolge teń bolmasa, onda 1 hám 2 nurları ϑ múyeshinen jáne jaqtılıqtıń AB betine túsiw múyeshi i_1 den ǵárezli bolǵan Δ júrisler ayırmasına iye boladı.

(1)-formuladan mınaǵan iye bolamız:

$$\Delta = 4tn \sin \frac{i_2 + i'_2}{2} \sin \frac{i_2 - i'_2}{2}.$$

Plastinkalardıń arasındaǵı múyesh ϑ kishi bolǵanda i'_2 penen i_2 arasındaǵı ayırma júdá kishi boladı hám sońǵı formuladan juwıq túrde mınanı alamız:

$$\Delta = 4tn \sin i_2 \cdot \delta i_2. \quad (2)$$

Bul formulada δi_2 arqalı $i_2 - i'_2$ ayırması belgilengen.

δi_2 shamasın plastinkalardıń arasındaǵı múyesh ϑ menen bılayınsha baylanıstırıwǵa boladı. Meyli, i_1 menen i'_1 jaqtılıqtıń $ABB'A$ hám $CDD'C$ plastinkalarına túsiw múyeshi bolsın. Bunday jaǵdayda $i'_1 = i_1 - \vartheta$. Sınıw nızamı boyınsha mınaǵan iye bolamız:

$$\begin{aligned} \sin i_1 &= n \sin i_2, \\ \sin i'_1 &= \sin(i_1 - \vartheta) = \sin i'_2. \end{aligned}$$

Bul eki teńlikti bir birinen aǵzama-aǵza alıp

$$\sin i_1 - \sin(i_1 - \vartheta) = n(\sin i_2 - \sin i'_2).$$

ϑ múyeshi kishi bolǵanda bul teńlikten juwıq túrdegi

$$\cos i_1 \cdot \vartheta = n \cos i_2 \cdot \delta i_2$$

teńligin alıwǵa boladı. Bunnan

$$\delta i_2 = \frac{1}{n} \frac{\cos i_1}{\cos i_2} \cdot \vartheta \quad (3)$$

formulasına iye bolamız. Eger

$$\frac{\cos i_1}{\cos i_2} = \frac{\sqrt{1 - \sin^2 i_1}}{\sqrt{1 - \sin^2 i_2}} = n \frac{\sqrt{1 - \sin^2 i_1}}{\sqrt{n^2 - \sin^2 i_1}}$$

teńliginiń orınlı ekenligin ańǵarsaq, sońǵı δi_2 ushın jazılǵan ańlatpanı túrlendiriwge boladı: $\cos i_1 / \cos i_2$ qatnası ushın alıńǵan mánisti (3)-formulaǵa qoyıp

$$\delta i_2 = \frac{\sqrt{1 - \sin^2 i_1}}{\sqrt{n^2 - \sin^2 i_1}} \cdot \vartheta \quad (4)$$

formulasın tabamız.

Ádette interferometrdegi túsiw múyeshi $i_1 = 45^\circ$ hám shiysheniń sıdırıw koefficienti 1,55 ke jaqın. i_1 menen n niń usınday sanlı mánisleri ushın juwıq túrde

$$\delta i_2 = \frac{1}{2} \vartheta \quad (4a)$$

mánisi sáykes keledi. δi_2 niń tabılǵan mánisin (2)-formulaǵa qoysaq, onda nurlardıń arasındaǵı Δ júrisler ayırması ushın mınaday juwıq ańlatpanı alamız:

$$\Delta = tn \sin i_2 \cdot \vartheta. \quad (5)$$

Interferometrdiń birinshi plastinkasın monoxromat jaqtılıqtıń parallel dástesi menen jaqtılandırǵanda nurlardıń qálegen jubı ushın birdey júrisler ayırması payda boladı. Nurlar eki plastinkada da shaǵılısqannan keyin bir tekli jaqtılandırılǵan maydan payda boladı hám onıń jarqınlıǵı Δ niń mánisinen ǵárezli boladı. Eger júrisler ayırması Δ pútin san eselengen tolqın uzınlıǵına teń bolsa maksimallıq jarıqlıq, al júrisler ayırması Δ niń shaması taq san eselengen $\lambda/2$ shamasına teń bolǵanda minimallıq jarıqlıq alınadı. Eger birinshi plastinkaǵı tarqalatuǵın dáste kelip tússe, onda bul nurlardıń hár qıylı juplarına i_2 múyeshiniń hár qıylı mánisleri hám (5)-formula boyınsha hár qıylı Δ lar sáykes keledi. Nátiyjede interferenciyalıq jolaqlardıń sisteması payda boladı, olardıń hár qaysısı i_2 múyeshiniń belgili mánisine sáykes keledi, yaǵnıy teńdey qıyalıqlar jolaqları bolıp tabıladı.

Jamen interferometriniń plastinkaların olardıń arasındaǵı 1 hám 2 nurlarınıń keń túrde ajralǵanlıǵın támiyinlew ushın qalıń etip isleydi. Usınıń saldarınan dásteleriniń birine qanday da bir sıdırıwshı zattıń qatlamın jaylastırıwǵa hám bul jaǵday dástelerdiń arasına qosımsha Δ' júrisler ayırmasın payda etiwge múmkinshilik beredi. Meyli, misalı, dástelerdiń birine qalınlıǵı l

hám sındırıw koefficienti n_2 bolğan zattır qatlamı jaylastırılğan bolsın. Bunday jaǵdayda mınaday qosımsha júrisler ayırması payda boladı:

$$\Delta' = l(n_2 - n_1). \quad (6)$$

Bul teńlikte n_1 arqalı hawanıń sındırıw koefficienti belgilengen. Eger usı Δ' júrisler ayırması ushın $\Delta' = k\lambda$ teńligi orınlanatuǵın bolsa, onda barlıq interferenciyalıq súwret k jolaqqa jıladı. Demek k shamasınıń bólshek bolıwı da múmkin. k nı anıqlap hám plastinkanıń qalıńlıǵı l di bilip, (6)-teńlik boyınsha sındırıw koefficientleriniń ayırması $n_2 - n_1$ di anıqlawǵa boladı. Bul usıl sındırıw koefficientleriniń júdá kishi bolğan ayırmaların anıqlawǵa múmkinshilik beredi. Mısalı, interferenciyalıq súwret 1/5 jolaqqa jılsqan jaǵdayda $l = 10$ sm hám $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$ sm bolğan jaǵdayda mınaǵan iye bolamız:

$$n_2 - n_1 = \frac{k\lambda}{l} = \frac{5 \cdot 10^{-5}}{5 \cdot 10} = 10^{-6}.$$

Interferometrdiń joqarı sezgirlikke iye bolıwına baylanıslı onı 1 den azmaz ayırmaǵa iye bolğan gazlerdiń sındırıw koefficientlerin ólshew ushın paydalanadı. Onıń ushın interferometrdiń eki dástesine eki tárepi de birdey tegis-parallel ayna menen jabılğan birdey kyuvetalardı jaylastıradı. Kyuvetalardıń biri izertlenetuǵın gaz benen toltırıladı, al ekinshisindegi hawa sorıp alınadı. Bunday jaǵdayda (6)-formuladaǵı n_1 di 1 ge teń esaplaw kerek, al biz izertlep atırğan gazdiń sındırıw koefficienti n_2 ushın mınanı alamız:

$$n_2 = \frac{\Delta'}{l}.$$

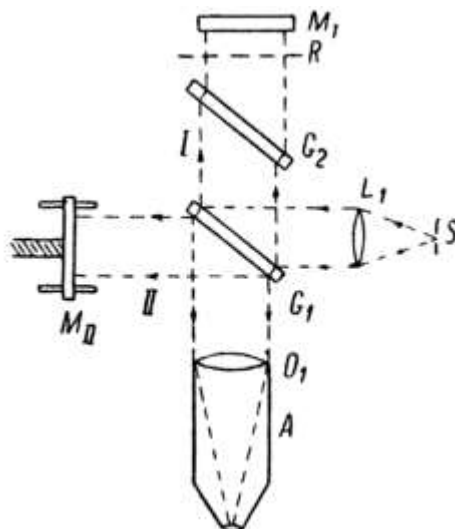
Bul teńlikte l arqalı kyuvetaniń uzunlıǵı belgilengen.

Ekinshi interferometr sıpatında *Maykelson interferometrini* qaraymız.

Bul ásbapta S dereginen shıqqan jaqtılıqtıń G_1 yarım móldir aynasında shaǵılıswdıń saldarınan payda bolatuǵın I hám II dásleleri interferenciyalanadı (61-súwret). I dástesine normal baǵıtta tegis, qozǵalmaytuǵın M_I aynasına kelip túsedı hám keri baǵıtta shıǵılısadı hám yarım móldir ayna arqalı ótip A kóriw trubasına kelip túsedı. II dástesine normal baǵıtta M_{II} aynasına kelip túsedı. Jılistırıwshılar menen vinttiń járdeminde bul aynanı ózine parallel qalğan halda dásteniń baǵıtında jılistırıwǵa boladı. M_{II} aynasında hám onnan keyin yarım móldir G_1 aynasında shaǵılısıp, bul dáste de A kóriw trubasına kelip túsedı. II dástesine G_1 plastinkası arqalı úsh ret, al I dástesine bolsa bir ret ótedi (yarım gúmislenegen aynada gúmislenegen qaptaldı S deregi tárepinde dep esaplaymız). Usıǵan baylanıslı dástelerdiń arasında payda bolğan júrisler ayırmasın kompensaciyalaw ushın I dástesiniń jolına qalıńlıǵı G_1 plastinkasınıń qalıńlıǵınday ekinshi tegis-parallel hám móldir bolğan G plastinkasını jaylastıramız.

61-súwret.

Maykelson interferometriniń sxeması.



Eger R arqalı G_1 aynasında M_{II} aynasınıń súwretin belgilesek, onda A kóriw trubasında jaqtılıqtıń R hám M_I tegisliklerinde shashırawınıń sebebinen interferenciyalıq súwret payda boladı. Sonlıqtan baqlanatuǵın súwret móldir plastinkadaǵı jaqtılıqtıń shaǵılısında payda bolǵan súwretke sáykes keledi (262-paragraf). Eger R hám M_I tegislikleri bir birine qatań túrde parallel bolsa, onda interferometrde saqıynalar túrine iye bolatuǵın teńdey qıyalıqlar jolaqları payda boladı I hám II dásleriniń arasındaǵı júrisler ayırması $\Delta = 2t \cos \varphi$ ge teń, bul teńlikte t arqalı R hám M_I tegislikleriniń arasındaǵı qashıqlıq belgilengen, al φ bolsa M_I tegisligine túsiw múyeshi. Jaqtılı jolaqlar φ dıń $2t \cos \varphi = k\lambda$ (k - pútin san) shártin qanaatlandıratuǵın mánislerinde payda boladı. Eger R hám M_I tegislikleri bir birine súyir múyesh jasaytuǵınday bolıp jaylasqan bolsa, onda olardıń tásiiri sinanıń tásirine sáykes keledi hám interferometrde sinanıń qabırǵasına parallel bolǵan tuwrı jolaqlar túrindegi teńdey qalıńlıqlar jolaqları payda boladı.

Linzalardıń (obektivlerdiń) betlerin izertlewdi Maykelson interferometri tipindegi interferometrlerdiń járdeminde ótkeriwge boladı. Onıń ushın izertlenetuǵın obektiv interferometrdiń shaqalarınıń birine jaylastırıladı hám tegis ayna obektivtiń fokusu F ke sáykes keletuǵın dóńes ayna menen almasırladı. Bunday jaǵdayda nurlardıń parallel dástesi obektiv arqalı ótip hám dóńes aynada shıǵılısıp, obektiv arqalı ekinshi ret ótedi hám qaytadan parallel dástegge aylanadı. Eger obektivte aberraciýalar bolmasa, onda interferometrdiń eki shaqasınıń dásteleri bir biri menen qosılıp, bir tekli jaqtılandırılǵan maydandı payda etedi. Aberraciýalar bar bolǵan jaǵdaylarda obektiv qosımsha júrisler ayırmasın beretuǵın orınlarda qarańǵı saqıynalar kórinedi. Bul usıl tek obektivtiń linzaların talap etiletuǵın formaǵa sáykes kelmewin ǵana emes, al shıyshedegi bir tekli bolmaǵan orınlardı tabıwǵa múmkinshilik beredi.

Obektivlerdi tap usınday sıńıp kóriwdi V.P.Linnik usılınıń (261-paragraf) járdeminde eki tolqın frontınıń interferenciýasın júzege keltiriw jolı menen ámelge asırıwǵa boladı. Onıń ushın jaqtılıqtıń S deregi menen tesigi bar S' plastinkasınıń arasına (46-súwret) sınap kóriletuǵın L linzasın jaylastıradı. Noqatlıq S' dereginiń qasında payda bolǵan tolqın frontı durıs sfera formasına iye, al aberraciýalar bar bolǵan jaǵdayda L linzası tárepinen payda etilgen tolqın frontı mayısqan boladı. Tolqın frontınıń bunday mayısıwların payda bolǵan interferenciyalıq jolaqlardıń túri boyınsha anıqlawǵa boladı.

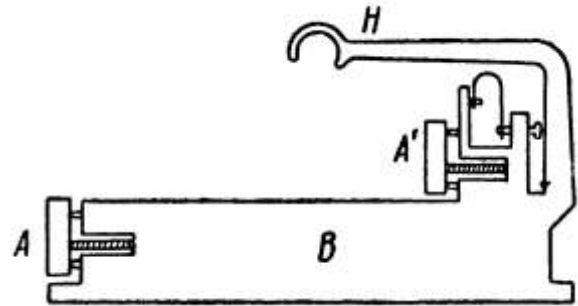
§ 265. Interferenciyalıq metrologiya. Ilim menen texnikanıń rawajlanıwı metrologiyanıń aldına oǵada joqarı bolǵan dáliliktegi ólshewlerdi ótkeriw máselesin qoydı. Detallardı bir biri menen almasırwı áhmiyetli bolǵan kóp sanlı seriyalıq óndiriste ónimlerdiń ólshemleriniń mikronlarǵa shekemgi shamalarda birdey bolıwı talap etiledi. Bul, óz gezeginde, fizikalıq shamalardıń, solardıń ishinde, misalı, uzınlıqtıń dál etalonın dóreتيw máselesin qoyadı.

"Absolyut" dep atalatuǵın birliklerdiń CGS-sistemasın dúzgende waqıttıń ótiwi menen ózgermeytuǵın hám joǵalıwı múmkin bolmaǵan uzınlıqtıń "tábiyiy" birligin saylap alıwǵa tırıstı. Usınday etalon ushın Jer meridianınıń uzınlıǵınıń belgili bolǵan úlesin alıw usınıldı. Biraq, ámelde qollanıw múmkin bolǵan etalonlıq uzınlıqlardı Jerdiń meridianınıń uzınlıǵı menen salıstırıw júdá qıyın másele bolıp tabıladı hám bul máseleli zárúrli bolǵan dálilikte sheshiwdiń múmkinshiligi joq. Sonlıqtan, bunnan keyin eń birinshi etalon sıpatında Ólshemler menen salmaqlardıń Xalıq aralıq byurosında saqlanıp turǵan iridiy menen platinanıń quymasınan soǵılǵan sızǵıshtıń shtrixlarınıń arasındaǵı qashıqlıqtı alıw qabıl etildi. Bul sızǵış metrdiń birinshi etalonı bolıp tabıladı. Usı birinshi etalon menen bir qatarda metrdiń 32 etalonı tayarlanǵan hám olar hár qıylı ellerge tarqatılǵan. SSSR da usınday etalonlardıń ekewi - 11- hám 28-sanlı etalonlar saqlanıp tur. Waqıttıń ótiwi menen bul etalonlardıń arasında shaması 0,7 mkm ge teń bolǵan ayırma tabıldı. Bunday ayırmanıń payda bolıwınıń sebebi platinanıń iridiy menen quymasınıń strukturasınıń ástelik penen ózgeriwiniń saldarınan payda bolǵan bolsa kerek. Álbette, qattı etalon-sızǵıshtıń hesh qaysısınıń usınday ózgeriske ushıramaytuǵınlıǵına hesh kim kepillik bere almaytuǵın bolǵanlıqtan uzınlıqtıń jańa etalonın saylap alıw máselesin qoyıw maqsetke muwapıq keledi. Jańa etalon sıpatında belgili sharayatlarda qozdırılatuǵın qanday da bir spektrallıq sızıqtıń tolqın uzınlıǵın qabıl etiwge boladı. Jaqtılıq tolqınınıń uzınlıǵı tek tiykarǵı fizikalıq nızamlar boyınsha anıqlanadı.

hám, usı jaǵdayǵa baylanıslı, usı yamasa basqa qálegen materialdıń tosınnan iye bolatuǵın qásiyetinen ǵárezli emes. Eń aqırında, jaqtılıqtıń tolqın uzınlıǵınıń júdá kishi ekenligine qaramastan onıń ámeliy jaqtan qolaylı ekenligin atap ótemiz. Interferenciyalıq usıllar júdá joqarı dálliklerde jaqtılıqtıń tolqın uzınlıǵı menen úlken uzınlıqlardı (metrdiń átirapındaǵı) yamasa olardı bir biri menen salıstırıwǵa múmkinshilik beredi.

Solay etip, interferenciyalıq metrologiya dep atalatuǵın metrologiyanıń jańa bólimi payda boldı. Ol uzınlıqlardı dál ólshew hám salıstırıw ushın jaqtılıqtıń interferenciyasın paydalanadı.

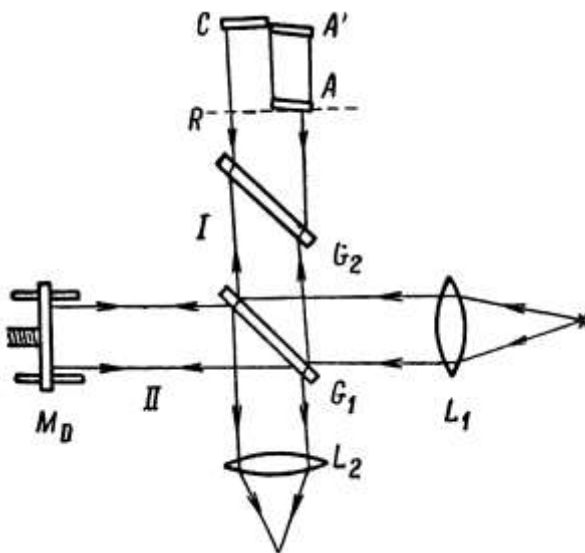
62-súwret.
Uzınlıqtıń etalonı.



Jaqtılıq tolqınıń uzınlıǵı menen normal metrdiń uzınlıǵın birinshi ret Maykelson 1890-1895 jılları salıstırıwdı orınladı. Normal metrdiń uzınlıǵı kadmiydiń qızıl sızıǵınıń uzınlıǵı menen salıstırıldı. Kadmiydiń qızıl sızıǵı onıń keskin ekenligine baylanıslı saylap alındı. Salıstırıw Maykelson interferometriniń járdeminde ámelge asırıldı. Usıldıń ideyası interferometrdiń aynasın etalonıń uzınlıǵına teń aralıqqa jılastırǵandaǵı teńdey qıyalıqlar jolaqları interferenciyalıq sızıqlarınıń jılısqan sakıynaların sanawdan ibarat. Etalonıń uzınlıǵı 0,39 mm etip alındı, sebebi úlken uzınlıqlarda sakıynalardıń sanın sanaǵanda qátelik jiberiw múmkin.

Uzınlıq etalonınıń sırtqı túri 62-súwrette keltirilgen.

Úlken massaǵa iye bolǵan metall prizma B eki A hám A' aynasına iye. Olardı bir birine parallel etip jaylastırıw múmkinshiligi payda etilgen. H tutqası etalonı jılastırıw ushın xızmet etedi. SHashıratıwshı A hám A' aynaların arasındaǵı qashıqlıq etalonıń uzınlıǵın anıqlaydı.



63-súwret.
Jaqtılıqtıń tolqın uzınlıǵı menen etalonıń uzınlıǵın salıstırıp kóriw ushın ótkerilgen tájiriybeniń sxeması.

Interferometrge AA' etalonı qozǵalmaytuǵın aynanıń ornına jaylastırıladı; onıń menen bir qatarda tegis C aynası jaylastırıladı (63-súwret). Interferometrde qanday jaqtılıq penen jaqtılandırıwǵa baylanıslı bolǵan biziń qálewimizge sáykes aq jaqtılıq penen yamasa kadmiy sızıǵınıń qızıl jaqtısı menen jaqtılandırıwǵa boladı. C aynasınıń beti R tegisligine qatań túrde

parallel etip jaylastırıladi. Al, joqarıda aytilip ótilgenindey R tegislige bolsa yarım gúmisengen plastinkanıń járdeminde alınğan qozǵalmaytuǵın M_{II} aynasınıń súwreti bolıp tabıladi. A hám A' etalonınıń aynaları (olar bir birine parallel) R tegislige úlken bolmaǵan múyesh penen, al eń dáslep A aynası R tegisligin vertikal sıziq penen kesip ótetuǵınday etip jaylastırıladi.

R tegislige M_{II} aynasınıń súwreti bolǵanlıqtan, payda bolatuǵın interferenciyalıq súwrettiń túrin anıqlaw ushın I hám II dástelerdiń arasındaǵı júrisler ayırmasın qarawdıń ornına berilgen ayna (A , A' yamasa C) menen R "aynasınıń" arasındaǵı júrisler ayırmasın qaraydı.

R tegisliginiń joqarıda kórsetilgen jaylasıwında A etalonı bolǵan ayna menen R tegisliginiń arasındaǵı júrisler ayırmasınıń bar bolıwınıń saldarınan payda bolǵan teńdey qalınlıqlardıń interferenciyalıq jolaqların yamasa kadmiy sıziqlarınıń jaqtılıǵında R tegislige parallel bolǵan C aynasınan alınatuǵın teńdey qıyalıqlar jolaqları alınadı. Dáslep ásbap aq jaqtılıq penen jaqtılandırıladi hám teńdey qalınlıqlar jolaqları alınadı. Olardıń arasında nollik jolaqtıń bar bolıwı R tegisliginiń A aynasın haqıyqatında da kesip ótetuǵının bildiredi. M_{II} aynasın azmaz jılistırǵanda usı kesilisiwdiń A aynasınıń ortasında júzege keliwine jetisiwge boladı. Bunnan keyin ástep kadmiydiń qızıl sıziǵı menen jaqtılandırıladi hám teńdey qıyalıqlar jolaqları baqlanadı. Bul saqıynalardı baqlap, interferometrdiń qozǵalatuǵın M_{II} aynası R tegislige A etalonı aynasınan onıń ekinshi A' aynası baǵıtına qaray jılistırıladi. Bunday jaǵdayda saqıynalar orayǵa qaray tartıladi hám sol jerde joǵaladı. Joǵalatuǵın hár bir saqıynaǵa R tegisliginiń $\lambda/2$ qashıqlıǵına jılıswı sáykes keledi. Joǵalatuǵın saqıynalardıń sanı sanaladı hám R tegislige A' etalonı ekinshi aynasın kesip ótkenshe jılistırıwdı dawam etedi. Bul jaǵday aq jaqtılıqta baqlanatuǵın teńdey qalınlıqlar interferenciyalıq jolaqları boyınsha tabıladi (R tegislige menen A aynasınıń kesilisiwi tabılǵan jaǵdaydaǵıday). Solay etip, R tegisliginiń etalon A hám A' tegisliginiń arasındaǵı qashıqlıqqa teń aralıqqa jılısqanlıǵı anıqlanadı. Jılıp keletuǵın saqıynalardıń sanı usı qashıqlıqtıń ishinde jaylasatuǵın kadmiydiń qızıl sıziǵınıń tolqın uzınıǵınıń sanın beredi.

Ólshewler R tegisligin uzınıǵı 0,39 mm bolǵan etalonniń A aynasınan A' aynasına shekem jılistırǵanda orayǵa 1212,35 saqıynanıń tartılıp keletuǵınlıǵın kórsetedi. Bunnan bul etalonniń uzınıǵınıń

$$l_1 = \frac{1212,35}{2} \lambda_{cd}$$

shamasına teń ekenligi kelip shıǵadı. Bul teńlikte λ_{cd} arqalı kadmiydiń qızıl sıziǵınıń tolqın uzınıǵı belgilengen.

Jumistıń ekinshi bólimi etalonniń uzınıǵı 0,39 mm di bir birinen juwıq túrde eki ese úlken etip soǵılǵan bunnan keyingi etalonlar menen salıstırıwdan ibarat. Etalonlardıń uzınıǵı interferometriyalıq jollar menen de salıstırıldı. Eń úlken etalonniń uzınıǵı 10 sm ge teń boldı. Bul shama normal metrdiń uzınıǵı menen onıń menshikli uzınıǵına teń bolǵan shamadan on ese úlken bolǵan jılıswıdıń uzınıǵı menen salıstırıldı. Usınday usıldıń járdeminde Maykelson normal metrdiń uzınıǵına qızıl kadmiy sıziǵınıń 1 553 163,5 tolqın uzınıǵınıń jaylasatuǵınlıǵın taptı. Bunnan bul sıziqtıń tolqın uzınıǵı ushın $\lambda_{cd} = 6438,4722 \cdot 10^{-10}$ m shaması alınǵan.

Bir qansha waqıttan keyin jaqtılıq tolqınıń uzınıǵı menen normal metrdiń uzınıǵı Fabri hám Peronıń etalonında payda bolatuǵın keskin túrde kórinetuǵın interferenciyalıq saqıynalardı paydalanıw jolı menen de ótkerildi (272-paragraf). Kadmiydiń qızıl sıziǵınıń tolqın uzınıǵı ushın $\lambda_{cd} = 6438,6496 \cdot 10^{-10}$ m shaması alındı. Bul mánis penen Maykelson ótkergen ólshewlerdiń arasındaǵı ádewir ayırma avtorlardıń ekewiniń de qátelikleri menen baylanıslı emes, al sońǵı sannıń 15°C temperaturadaǵı 760 mm sinap baǵınısınıń basımındaǵı basımdaǵı hawaǵa tiyisli ekenligi menen júzege kelgen. Sol waqıtları Maykelson hawanıń ıǵallıǵına baylanıslı bolǵan dúzetiwdi kirgizbegen. Eger jaqtılıqtıń tolqın uzınıǵın boslıqqa jatqaratuǵın bolsaq, onda normal metrdiń uzınıǵında kadmiydiń qızıl sıziǵınıń 1 552 734,8 tolqın uzınıǵı jaylasadı.

Normal metrdi jaqtılıq tolqınıń tolqın uzınlıǵı menen salıstırıwdıń múmkinshiligi normal metrdiń etalonları haqqındaǵı máseleni basqasha qoyıwǵa alıp keldi. Normal metrdiń shaması bul paragraftıń basında kórsetilgen etalonında iridiylik platinadan soǵılǵan sızǵıshtaǵı *shtrixlardıń arasındaǵı qashıqlıq* penen salıstırıldı. Bunday etalonı *shtrixlı etalon* dep ataydı. Házirgi zaman kóz-qarasları boyınsha qaraǵanda shtrixlı etalonıń kemshiligi ayqın kórinip tur. Interferometrlik usıllardıń járdeminde jaqtılıqtıń tolqın uzınlıǵın tek shashıratıwshı aynalıq betlerdiń arasındaǵı qashıqlıq penen salıstırıwǵa boladı. Bunday jaǵdayda aynalıq betlerdiń arasındaǵı qashıqlıq tolqın uzınlıǵınıń kishi bólimi dáliginde anıqlanadı. Al sızǵıshtaǵı shtrixlar bolsa ádewir turpayı: olardıń keńligi bir neshe mikronǵa teń. Sonlıqtan ótkerilgen barlıq ólshewlerde eń úlken qátelik jumıstıń eń sońǵı etapında, atap aytqanda aralıqlıq etalonlardıń biriniń uzınlıǵın normal metrdiń uzınlıǵı menen salıstırıwda jiberiledi.

Eki ushınıń betleri tegisligi tolqın uzınlıǵınıń úlesine shekemgi dállikte polirovkalanǵan hám bir birine parallel etip islengen metall sterjen túrindegi ólshem bir qansha jetiliske boladı. Usınday ólshemniń uzınlıǵı sıpatında onıń qaptal betleriniń arasındaǵı qashıqlıq alınadı.

Házirgi waqıtları kóp sanlı spektrallıq sızıqlardıń uzınlıǵınıń joqarı dárejedegi dállikte belgili bolǵanlıǵı ushın ólshewler ádewir jeńillesken. Bul berilgen uzınlıqtıń ishinde jaylasqan tolqın uzınlıqların sanap otırıwdan qutqaradı. Misalı, Fabri hám Pero etalonınıń uzınlıǵı (onıń aynalarınń arasındaǵı qashıqlıq) hár qıylı spektrallıq sızıqlarǵa sáykes keliwshi saqıynalardıń bir birine sáykes keliwi boyınsha tolqın uzınlıǵı menen salıstırılıwı múmkin. Ápiwayılıq ushın tolqın uzınlıqları λ hám λ' bolǵan tolqın uzınlıqlarına iye eki sızıqtan alınǵan teńdey qıyalıqlar saqıynaları etalonında eki sızıq ta etalonıń orayında jaqtılı daqtı beredi dep kóz aldımızǵa elesleteyik. Bunday jaǵdayda mınaday qatnaslarǵa iye bolamız:

$$2t = k\lambda, 2t = k'\lambda'. \quad (1)$$

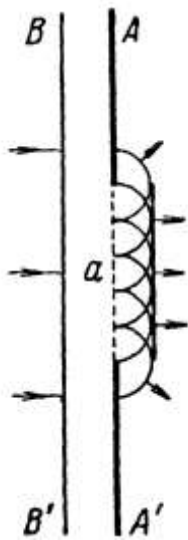
Bul teńliklerde k penen k' lar pútin sanlar bolıp tabıladı. Eger t, k penen k' shamaları aldın ala jetkilikli dállikte belgili bolǵan bolsa, onda (1)-teńlikti qanaatlandıratuǵın k menen k' shamaların bir mánisli saylap alıw qıyınshılıqtı payda etpeydi. Pútin k sanınıń mánisin anıqlap, biz etalonıń uzınlıǵı t nı λ tolqın uzınlıǵında ańǵartamız. Eger qanday da bir sebeplerge baylanıslı pútin san isenimli túrde anıqlanbaǵan bolsa, onda úshinshi sızıqtan paydalanıw kerek boladı. Bul usıldı qaptal betleriniń arasındaǵı qashıqlıqtıń ólshemlerin salıstırıw ushın da qolaylastırıwǵa boladı.

Sáykes keliwler usılı normal metrdiń uzınlıǵı menen jaqtılıq tolqınıń tolqın uzınlıǵın salıstırıw jumısların ádewir ápiwayılastırıwǵa alıp keledi. Bizde (SSSR da) M.F.Romanovanıń basıshılıǵındaǵı xızmetkerlerdiń bir toparı tek bir aralıqlıq etalonıń járdeminde eki qaptal betler ólshemin qadmiydiń qızıl sızǵınıń tolqın uzınlıǵı menen salıstırıw jumısı orınlandı. Bul aralıqlıq etalon trubka tárizli Fabri hám Pero etalonı bolıp tabıladı: ol metal trubadan ibarat bolıp, oǵan eki ushında optikalıq kontaktta yarım gúmisengen aynalar bektilgen. Etalonnan hawanı sorıp alıw múmkinshiligi jaratılǵan. Onıń uzınlıǵı 111,6 mm shemasına teń. Bul etalonıń uzınlıǵı kadmiydiń sızǵınıń tolqın uzınlıǵı menen sáykes keliwler usılı menen salıstırılǵan. Bunday tájiriybede ekinshi sızıq sıpatında $\lambda = 5085,82 \cdot 10^{-10}$ m bolǵan kadmiydiń jasil sızǵı hám qadaǵalaw ushın kriptonnıń úsh sızǵı paydalanılǵan. Ekinshi, trubka tárizli etalon birinshisinen 9 ese uzın bolǵan. Bunday etalonı soǵıwdıń dálligi sonshama joqarı bolıp, ekinshi etalonıń uzınlıǵı birinshi etalonıń toǵız eselengen uzınlıǵınan barlıǵı bolıp 0,5 mkm shamasına ayırmaǵa iye bolǵan. Bul jaǵday aq jaqtılıq dástesi eki etalon arqalı izbe-iz ótkende payda bolatuǵın interferenciyalıq jolaqlardı baqlawǵa múmkinshilik bergen. Jolaqlar kishi etalonındaǵı nurdıń toǵız ret shaǵılısınıń hám úlken etalonındaǵı bir ret shaǵılısınıń saldarınan payda bolǵan. Bul jolaqlardıń payda bolıwı etalonlardıń uzınlıqların salıstırıwǵa múmkinshilik beredi.

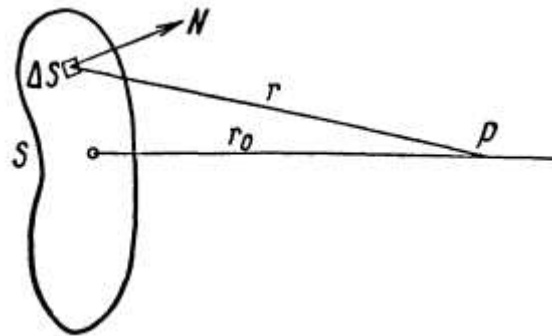
Úlken etalonıń uzınlıǵı metrden azmaz kishi bolǵan. Eki ushın polirovkalanǵan ólshem usı etalonıń ishinde jaylastırılǵan. Ólshemniń ushları menen etalonıń aynalarınń arasında juqa aralıqlar qalǵan bolıp, olar sáykes keliwler usılınıń járdeminde qaytadan ólshengen. Bunnan kadmiydiń qızıl jaqtılıǵınıń tolqın uzınlıǵındaǵı eki ushı polirovkalanǵan ólshemniń uzınlıǵın tapqan

§ 266. Gyuygens-Frenel principi. Qálegen tolqınıń tarqalıwı ushın tán bolǵan nárese onıń tosqańlıqlardı aylanıp óte alıw (difrakciyanı beriw) qábiletligi bolıp tabıladı. Biraq, aylanıp ótiw masshtabı tosqańlıqtıń ólsheminiń tolqın uzınlıǵına qatnasınan ǵárezli boladı. Misalı, suwdıń betinde tarqalatuǵın iri tolqınlar tolıǵı menen aylanadı, al kishi tolqınlar bolsa ayqın túrdegi "sayanı" payda etedi.

Gyuygens principi bunnan burıngı tolqın frontınıń hár bir noqatında payda bolǵan elementar tolqınlardı óziniń ishine qamtıp alatuǵın betti qurıw jolı menen fronttıń jańa awhalın qurıwǵa múmkinshilik beredi. Usınday etip qurılǵan tolqın frontı tosqınlıqlar arqalı ótkende tolqınnıń burılıwın túsindire aladı (I tomdaǵı 107-paragrafta ayılǵanlar menen salıstırıńız). 64-súwrette a sańlaǵı bar AA' tosqınlıǵına kelip túsetuǵın tegis BB' tolqını kórsetilgen. Bul tolqınnıń frontınıń bir bólimi a sańlagına jetip keledi, usınıń saldarınan sańlaqtıń hár bir noqatı elementar yarım sferalıq tolqınlardıń deregine aylanadı. Bul elementar tolqınlardı qorshap alatuǵın bet sańlaqtıń orta bóliminde tegis boladı hám onıń shetlerinde mayısadı. Usı jaǵdayǵa baylanıslı nurlar da (tolqınlıq betlerge normallar) sańlaqtıń shetlerine iyiledi - difrakciyaǵa ushıraydı. Biraq, Gyuygens principi tárepinen beriletuǵın táriyiplew pútkilley tolıq emes: ol hár qıylı baǵıtlarda tarqalatuǵın terbelislerdiń amplitudaların tabıwǵa múmkinshilik bermeydi. Terbelislerdiń amplitudaları amplitudanıń kvadratı boyınsha anıqlanatuǵın bolǵanlıqtan aylanıp ótetuǵın tolqınlardıń intensivligi belgisiz bolıp qaladı. Gyuygens principiniń bul kemshiligi Frenel tárepinen usınılǵan esaplaw usılınıń járdeminde saplastırıladı. Bul usıl terbelishtiń amplitudası menen fazasın esapqa alatuǵın tolqınlıq process haqqındaǵı tereńirek kóz-qarasqa tiykarlangan.



64-súwret. Tegis tolqınnıń AA' tosqınlıǵındaǵı a sańlaǵı arqalı ótkendeǵı difrakciyası.



65-súwret. P noqatındaǵı terbelisler S betiniń elementlerinen jetip keletuǵın terbelislerdi qosıw jolı menen tabıladı.

Meyli, S beti (65-súwret) waqıttıń bazı bir momentindeǵı tolqın frontınıń ornın kórsetetuǵın bolsın. Fronttıń aldında r_0 qashıqlıǵında jaylasqan P noqatındaǵı terbelislerdi anıqlaw ushın Frenel boyınsha P noqatına S betiniń barlıq elementlerinen jetip kelgen barlıq terbelislerdi anıqlaw hám bunnan keyin olardıń amplitudaları menen fazaların esapqa alǵan halda qosıw kerek. P noqatına bettiń ΔS elementinen jetip keletuǵın terbelislerdiń amplitudaları bul elementtiń ólshemine, r qashıqlıǵınan hám usı r baǵıtı menen betke túsirilgen normal N niń arasındaǵı múyeshten ǵárezli boladı. Terbelislerdiń fazası tolqın júrip ótken joldıń uzınlıǵı r den ǵárezli. Usınday elementar terbelislerdi summalaw integrallıq esaptıń máselesi bolıp tabıladı hám, ulıwma aytqanda, júdá quramalı bolıwı múmkin. Biraq, Freneldiń kórsetiwı boyınsha ápiwayı jaǵdaylarda integrallawdı ápiwayı arifmetikalıq yamasa grafikalıq qosıw menen albastırıwǵa boladı eken.

Jaqtılıqtıń dóńgelek tesik arqalı ótiwin qaraymız. Meyli, A arqalı jaqtılıqtıń noqatlıq deregin (66-súwret), $C'C''$ arqalı A dan R qashıqlıǵında jaylasqan móldir emes ekrandaǵı dóńgelek tesik belgilengen bolsın. Bul tesik A dereginen shıqqan sferalıq tolqınnıń tek bir bólegin ǵana ótkeredi. Usı tolqınnıń $C'C''$ tesiginiń orayı arqalı ótetuǵın AA' tuwrısınıń boyındaǵı tesikten r_0

$$r_k^2 - r_0^2 = kr_0\lambda + k^2 \left(\frac{\lambda}{2}\right)^2.$$

Tolqin uzunligi λ niń mánisi r_0 den ádewir kishi dep esaplap, juwıq túrde mınaday teńlikke iye bolamız:

$$r_k^2 - r_0^2 = kr_0\lambda. \quad (3)$$

Bunnan keyin (2)-teńlik mınaday túrge iye boladı:

$$h = k \frac{r_0}{R + r_0} \cdot \frac{\lambda}{2}. \quad (2a)$$

Radiusı ρ_k bolǵan sferalıq segmenttiń betiniń maydanı

$$\Delta S_k = 2\pi R h$$

shamasına teń. Bul teńlikke h tıń ornına onıń (2a) teńlik boyınsha anıqlanǵan shamasın qoyıp

$$\Delta S_k = k \frac{2\pi R r_0}{R + r_0} \cdot \frac{\lambda}{2}$$

formulasın alamız.

Bul segmenttiń sheklerinde k dana saǵıyna tárizli zona boladı. Bunnan bir zonanıń maydanı ΔS bul segment penen $k - 1$ dana zonanı óziniń ishine alatuǵın segmenttiń maydanınıń ayırmasına teń:

$$\Delta S = \Delta S_k - \Delta S_{k-1} = k \frac{2\pi R r_0}{R + r_0} \cdot \frac{\lambda}{2} - (k - 1) \frac{2\pi R r_0}{R + r_0} \cdot \frac{\lambda}{2}.$$

Bunnan

$$\Delta S = \frac{\pi R r_0}{R + r_0} \cdot \lambda$$

ańlatpasın alamız.

Solay etip, joqarıda keltirilgen juwıqlawda zonanıń maydanı onıń nomeri k dan ǵárezli bolmaydı, yaǵnıy barlıq zonalardıń maydanları shama menen birdey. Demek, ayırım zonalardan P noqatına shekem jetip keletuǵın terbelislerdiń amplitudaları tek r_k qashıqlıǵınan hám r_k niń baǵıtı menen zonanıń betine túsirilgen normaldiń arasındaqı múyeshten ǵárezli boladı eken. Zonanıń nomeri k niń ósiwi menen r_k da, qıyalıq múyeshi de ósedı. Sonlıqtan ayırım zonalardan kelip jetetuǵın terbelislerdiń amplitudaları a_k niń mánisi zonanıń nomeri k niń ósiwi menen monotonlı túrde kemeydi:

$$a_1 > a_2 > a_3 > a_4 > \dots > a_k > a_{k+1} > \dots$$

P noqatına qońsılas eki zonadan jetip keletuǵın terbelislerdiń fazaları qarama-qarsı bolǵanlıqtan, k dana zonanıń tásirinde payda bolatuǵın terbelistiń amplitudası A_k mınaǵan teń boladı:

$$A_k = a_1 - a_2 + a_3 - a_4 + a_5 - \dots \pm a_k. \quad (4)$$

Bul teńlikte sońǵı aǵzanıń belgisi taq k da oń hám jup k da teris boladı. Kórinip turǵanıday, P baqlaw noqatında qosındı terbelistiń amplitudası A_k úlken emes; zonalardıń sanı tak bolǵanda zonalardıń biriniń tásiiri hálisiretilmeydi hám bunday jaǵdaydaǵı A_k amplitudasınıń mánisi zonalardıń sanı jup bolǵan jaǵdaydaǵıǵa salıstırǵanda úlken boladı.

Qosındı terbelistiń amplitudası A_k niń dálirek mánisin (4)-summadaǵı barlıq taq aǵzalardı bilayınsha qosılıwshılarga jiklewdiń jolı menen alınadı:

$$a_1 = \frac{a_1}{2} + \frac{a_1}{2}, a_3 = \frac{a_3}{2} + \frac{a_3}{2}$$

h.t.b. Bunday jaǵdayda k niń mánisi taq bolǵanda mınaday ańlatpanı alamız:

$$A_k = \frac{a_1}{2} + \left(\frac{a_1}{2} - a_2 + \frac{a_3}{2}\right) + \left(\frac{a_3}{2} - a_4 + \frac{a_5}{2}\right) + \dots \\ + \left(\frac{a_{k-2}}{2} - a_{k-1} + \frac{a_k}{2}\right) + \frac{a_k}{2}. \quad (4a)$$

k niń mánisi jup bolǵanda mınaǵan iye bolamız:

$$A_k = \frac{a_1}{2} + \left(\frac{a_1}{2} - a_2 + \frac{a_3}{2}\right) + \left(\frac{a_3}{2} - a_4 + \frac{a_5}{2}\right) + \dots \\ + \left(\frac{a_{k-3}}{2} - a_{k-2} + \frac{a_{k-1}}{2}\right) + \frac{a_{k-1}}{2} - a_k. \quad (4b)$$

Joqarıda ayılıp ótilgenindey, amplituda a_k nomer k nıń ósiwi menen monotonlı túrde kemeyedi. Sonlıqtan, qanday da bir k –zona tárepinen payda etilgen amplitudanı $(k - 1)$ - hám $(k + 1)$ -zonalar tárepinen payda etilgen amplitudanıń qosındısıńıń yarımına teń dep boljawğa boladı:

$$a_k = \frac{a_{k-1} + a_{k+1}}{2}.$$

Bunnan (4a) hám (4b) qatarlarındagı qawsıramalardıń ishine alıńǵan qosılıwshılardıń nolge teń bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı hám k taq bolǵan jaǵday ushın

$$A_k = \frac{a_1}{2} + \frac{a_k}{2}, \quad (5)$$

al, k jup bolǵan jaǵday ushın

$$A_k = \frac{a_1}{2} + \frac{a_{k-1}}{2} - a_k \quad (5a)$$

teńliklerin alamız.

Eger zonalardıń sanı k jetkilikli dárejede úlken bolsa, onda $(k - 1)$ -zona menen k -zona tárepinen payda etilgen amplitudalar bir birinen az ayrıladı. Bunnan, juwıq túrde

$$\frac{a_{k-1}}{2} - a_k = -\frac{a_k}{2}$$

teńligin ala alamız. Solay etip, (5)- hám (5a) teńlikleri mınaday túrge enedi:

$$A_k = \frac{a_1}{2} \pm \frac{a_k}{2}.$$

Bul teńliktegi plus belgisi zonalardıń taq sanına, al minus belgisi zonalardıń jup sanına saykes keledi.

Ekran menen jabılmaǵan tolqın frontınıń ishinde jaylasatuǵın zonalardıń sanı tesiktiń ólsheminiń tolqın uzınlıǵı λ ge qatnası hám onıń jaylasqan ornınan ǵárezli. (1a) formulaǵa saykes, k -zonanıń radiusı ρ_k

$$\rho_k^2 = r_k^2 - (r_0 + h)^2 = r_k^2 - r_0^2 - 2r_0h - h^2$$

ańlatpasınıń járdeminde anıqlanadı.

h tı r_0 den ádewir kishi dep esaplap, h^2 shamasın esapqa almawğa boladı. Bunday jaǵdayda

$$\rho_k^2 = r_k^2 - r_0^2 - 2r_0h$$

ańlatpasına iye bolamız. Bul ańlatpaǵa (2a) boyınsha h tıń mánisin qoysaq

$$\rho_k^2 = r_k^2 - r_0^2 - k \frac{r_0^2}{R + r_0} \cdot \lambda$$

formulasın alamız hám eń aqırında (3)-ańlatpa boyınsha $r_k^2 - r_0^2$ ayırmasın $kr_0\lambda$ shaması menen almastırıp, mınaday ańlatpanı tabamız:

$$\rho_k^2 = k \frac{r_0 R}{R + r_0} \cdot \lambda.$$

Bunnan

$$\rho_k = \sqrt{k \frac{r_0 R}{R + r_0} \cdot \lambda}$$

ańlatpası kelip shıǵadı.

Álbette, ρ_k ekrandağı biz qarap atırǵan tesiktiń radiusı bolıp tabıladı. Bunnan radiusı ρ bolǵan tesikte

$$k = \frac{\rho}{\lambda} \cdot \frac{\rho(R + r_0)}{r_0 R} \quad (8)$$

dana zonanıń jaylasatuǵınlıǵın kóremiz.

Ekranga túsetuǵın tegis tolqın ushın ($R = \infty$) (8)-formula

$$k = \frac{\rho}{\lambda} \cdot \frac{\rho}{r_0}$$

yamasa

$$k = \frac{\rho}{\lambda} \cdot \alpha \quad (8a)$$

túrine enedi. Bul teńlikte $\alpha = \frac{\rho}{r_0}$ arqalı P noqatınan qaraǵanda ekrannıń múyeshlik ólshemi belgilengen.

P noqatındağı qosındı terbelistiń amplitudası ashıq bolǵan zonalardıń sanı k dan ǵárezli. Berilgen tolqın uzınlıǵı, ekrannıń ornı hám ondağı tesiktiń ólshemi ushın (k , R hám ρ berilgen) ashıq zonalardıń sanı bolǵan k nıń mánisi P noqatınıń turǵan ornı boyınsha anıqlanadı; hár qıylı P noqatları ushın k nıń mánisi hár qıylı boladı. k nıń mánisi taq bolatuǵın P noqatında qosındı amplituda A_k nıń mánisi úlken, al k nıń mánisi jup bolǵan P noqatında qosındı amplituda A_k nıń mánisi kishi. Amplitudanıń kvadratı terbelislerdiń energiyasın anıqlaydı. Óz gezeginde, jaqtılıq terbelisleriniń energiyası jaqtılandırılǵanlıqtı anıqlaydı. Solay etip, $B_0 A'$ tuwrısı boylap qozǵalǵanda (66-súwret) biz bir orında úlken, al ekinshi orında kishi jaqtılandırılǵanlıqtı kóremiz.

R menen r_0 diń berilgen mánislerinde, yaǵnıy jaqtılıq dereǵiniń, tesigi bar ekrannıń hám baqlaw noqatı P nıń berilgen jaylasıwında P noqatındağı jaqtılandırılǵanlıqtıń tesiktiń ólshemi ρ dan hám onıń tolqın uzınlıǵı λ ge qatnasına ǵárezli ekenligin kóremiz.

Solay etip, biz mınaday juwmaqqa kelemiz: *jaqtılıq tuwrı sızıq boyınsha tarqalmaydı, P noqatındağı jaqtılandırılǵanlıq $C'C''$ tesiginiń ólshemleri jáne onıń jaylasqan ornı menen, jaqtılandırılǵanlıq tolqın frontınıń ashıq bólimindegi barlıq noqatlardıń tásiri menen anıqlanadı eken.*

Eger $C'C''$ tesiginiń ólshemlerin sheksiz úlken etip alsaq, yaǵnıy S tolqın frontınıń betiniń barlıǵın ashıq etsek, onda sońǵı zonanıń tásiri a_k sheksiz kishi boladı hám (6)-ańlatpa boyınsha P noqatındağı qosındı terbelislerdiń amplitudası A_∞ mına shamaǵa teń boladı:

$$A_\infty = \frac{a_1}{2}.$$

Eger $C'C''$ tesiginiń betiniń maydanınıń ólshemleri berilgen P noqatına qatnası boyınsha zonalardıń taq sanı jaylasatuǵın bolsa, onda sol P noqatındağı terbelislerdiń amplitudası

$$A_k = \frac{a_1}{2} + \frac{a_k}{2}$$

shamasına teń, yaǵnıy amplitudanıń shaması *tolıq ashıq fronttaǵıǵa salıstırǵanda úlken boladı*. Tesiktiń maydanına tek bir zona jaylasatuǵın P noqatı ushın A_k nıń maksimallıq mánisi alınadı. Bunday jaǵdayda $A_1 = a_1$ ge, yaǵnıy A_∞ ten eki ese úlken boladı.

Ashıq zonalardıń sanı úlken bolǵan jaǵdayda $\frac{a_k}{2}$ nıń mánisi kishi hám qosındı amplitudanıń mánisiniń tolıq ashıq frontqa sáykes keletuǵın A_∞ shamasınan ayırması kishi boladı. Bunnan, ashıq zonlardıń sanı úlken bolǵanda $C'C''$ tesiginiń ólshemleriniń P noqatındağı jaqtılandırılǵanlıqqa tásiri sezilmey qaladı. Eger jaqtılıq tuwrı sızıq boyınsha tarqalatuǵın bolǵanda onda tesiktiń ólshemleriniń P noqatındağı jaqtılandırılǵanlıqqa tásiri pútkilley bolmaǵan bolar edi. Bunnan biz *tolqınlıq kóz-qaraslar menen jaqtılıqtıń tuwrı sızıqlı tarqalatuǵınlıǵı haqqındaǵı kóz-qaraslardıń ashıq zonalardıń sanı úlken bolǵan jaǵdayda bir birine sáykes keletuǵınlıǵın kóremiz*. Joqarıda k sanı ushın keltirip shıǵarılǵan ańlatpalardan tesikte jaylasatuǵın zonalardıń sanınıń qanday sharayatlarda úlken bolatuǵınlıǵın ańsat esaplawǵa boladı. Misalı, tegis tolqın

bolğan jaǵdayda ($R = \infty$) radiusı $\rho = 5$ mm bolğan tesikten $r_0 = 50$ sm qashılıqta jaylasqan P noqatı ushın jaqtılıqtıń tolqın uzınlıǵı $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$ sm bolğan jaǵdayda (8-a) ańlatpa boyınsha:

$$k = \frac{0,5}{5 \cdot 10^{-5}} \cdot \frac{0,5}{50} = 100.$$

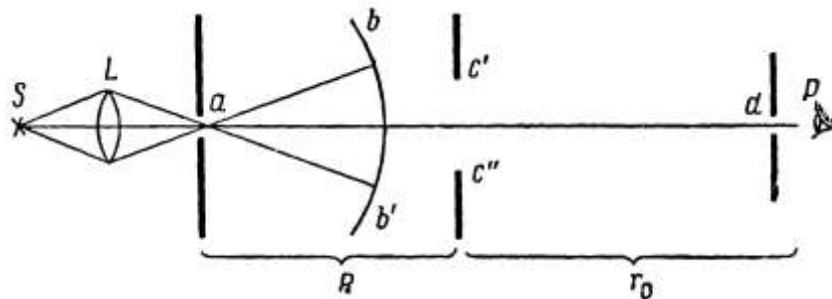
Solay etip, bul sharayatta tesiktiń betinde kóp sanlı zonalar jaylasadı, tesiktiń ólshemleriniń bunnan bılay úlkeyiwi P noqatındaǵı jaqtılandırıwǵa tásir etpeydi hám jaqtılıq tuwrı sıızılı tarqalatuǵın jaǵdaydaǵıday nátiyje alınadı. Al radiusı $\rho = 5$ mm bolğan tesikten 50 m qashılıqta turǵan P noqatı ushın tesikte tek bir zona jaylasadı hám jaqtılıqtıń tarqalıwınıń tolqınlıq xarakteri óziniń tásin tiygizedi.

Frenel tárepinen alınǵan juwmaqlardı sxeması 68-súwrette keltirilgen tájiriýbeniń járdeminde ańsat tekserip kóriwge boladı. Jaqtılıqtıń jarqın dereǵı S (mısalı elektr doǵasınıń krateri) L linzasınıń járdeminde kishi a tesigi bar ekranǵa proekciyalanadı. Bul tesik jaqtılıqtıń noqatlıq dereǵınıń xızmetin atqaradı hám bb' tolqınıń sferalıq frontın beredi. Bul fronttıń tási P noqatında jaylasqan kóz benen baqlanadı. Kózdi belgili bolğan baǵıtta baǵıtlaw ushın onıń aldına d kishi tesigi bar ekrandı jaylastırıw hám usı tesik arqalı baqlawdı ótkeriw kerek. Tolqın frontınıń aldına irislik diafragma jaylastırıladı hám usı diafragmaǵı jaqtılıq ótetuǵın tesik $C'C''$ tesiginiń xızmetin atqaradı. Irislik diafragmanıń ólshemlerin ózgertkende kózge taq sanlı yamasa jup sanlı zonalardan shıqqan terbelisler jetip keledi hám, usıǵan saykes, kóz birese kóp, birese az jaqtılıqtı qabıl etedi.

Irislik diafragmanıń zárúrli bolğan ólshemleri (7)-formula boyınsha esaplanadı. Eger a noqatlıq dereǵı menen irislik diafragmanıń arasındaǵı qashılıq $R = 10$ m etip hám irislik diafragmadan kózge shekemgi qashılıq r_0 di de 10 m etip alsa, onda $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$ sm tolqın uzınlıǵı ushın

$$\rho_k = \sqrt{\frac{10^3 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^3} \cdot 5 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{k}} \text{ sm} \cong 0,17 \cdot \sqrt{k} \text{ sm}$$

shamasın alamız.



68-súwret. Jaqtılandırılǵanlıqtıń Freneldiń ashıq zonalarınıń sanınan ǵárezligin demonstraciylaw sxeması.

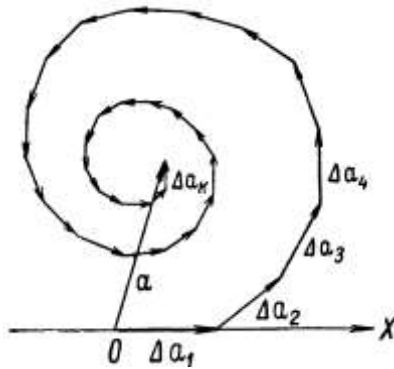
Solay etip, bunday sharayatlarda oraylıq zonanıń radiusı 1,7 mm ge, al toǵızınshı zonanıń radiusı 5,1 mm ge teń boladı. Tesiktiń bunday ólshemlerin irislik diafragmanıń járdeminde ańsat ámelge asırıwǵa hám diafragmanıń ólshemlerin úlkeyiwiniń barısında jaqtılıqtıń dáwirli túrdegi kúsheyiwi menen hásirewin ańsat baqlawǵa boladı.

§ 267. Amplitudalardı grafikalıq qosıw. 266-paragrafta biz kelgen juwmaqlarǵa terbelislerdiń qosıwdıń grafikalıq usılın paydalanıp ta keliwge boladı. Bunday jaǵdayda terbelislerdiń P noqatına qarama-qarsı fazalarda kelip jetiwi ushın saqıyna tárizli zonalardıń súwretin salıp otırıwdıń keregi joq (67-súwret). Bizler qálegeninshe ensiz bolğan zonalardı qaray alamız.

Terbelislerdi grafikalıq qosıw ushın amplituda vektor $\mathbf{a}$ dan paydalanamız (I tomdaǵı 100-paragrafqa qarańız). $\mathbf{a}$ amplituda vektorı degende uzınlıǵı amplitudaǵa, al usı vektor menen berilgen OX kósheriniń arasındaǵı múyesh α biz qarap atırǵan terbelistiń baslanǵısh fazasına teń bolğan vektordı túsinedi. $\mathbf{a}_i$ vektorlarınıń járdeminde súwretlenetuǵın bir neshe terbelmeli

qozğalışlardı qosqanda qosındı terbelis a_i vektorlarınıń vektorlıq qosındısına teń bolǵan a vektorı menen kórsetiledi. a vektorınıń uzınlıǵı amplitudanı, al usı a vektorı menen OX kósheriniń arasındaǵı múyesh α qosındı terbelistiń baslanǵısh fazasını beredi.

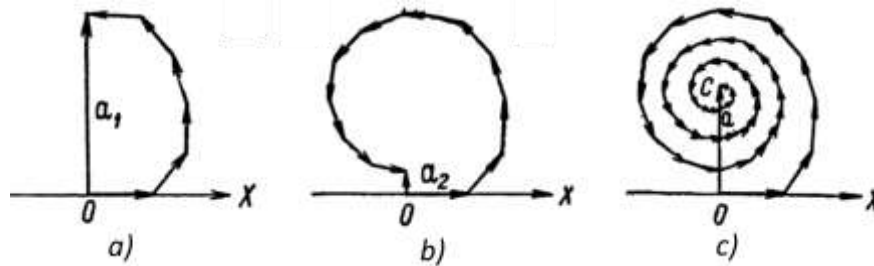
Tolqın frontınıń erkin betin júdá ensiz bolǵan saqıyna tárizli zonalarǵa bólemiz. P noqatına birinshi zonadan kelip jetetuǵın terbelisti Δa_1 arqalı súwretleybiz. Bul terbelistiń baslanǵısh fazası nolǵe teń dep boljayıq. Bunday jaǵdayda 69-súwrette bul Δa_1 vektorı OX kósheriniń baǵıtında jaylasadı. Ekinshi zonada kelip jetetuǵın terbelistiń amplitudası birinshi zonadan jetip keletuǵın terbelistiń amplitudasınan azmaz kishi boladı; usınıń menen birge bul terbelis birinshi zona payda etken terbelisten faza boyınsha keyinde qaladı. Sonlıqtan, ekinshi zona tárepinen P noqatında payda etilgen terbelis Δa_2 vektorınıń járdeminde súwretlenedi. Bul vektordıń uzınlıǵı Δa_1 vektorınıń uzınlıǵınan biraz kishi hám ol OX kósheri menen úlkenirek múyesh jasadı. Bul vektordı 69-súwrette kórsetilgendey etip Δa_1 vektorınıń ushınan baslap túsiremiz. Úshinshi zonadan jetip kelgen terbelisler Δa_3 vektorınıń járdeminde súwretlenedi, bul vektor uzınlıǵı boyınsha bir qansha kishi hám OX kósheri menen onnan da úlkenirek múyesh jasadı h.t.b. Δa_i vektorlarınıń jıynaǵı sınıq, spiral tárizli sıziqtı payda etedi. P noqatındaǵı qosındı terbelis O noqatın ashıq zonalardıń eń aqırǵısına jetip keletuǵın terbeliske sáykes keletuǵın Δa_k vektorınıń ushı menen tutastıratuǵın a vektorınıń járdeminde súwretlenedi.



69-súwret.

Ayırım zonalardan jetip keletuǵın terbelislerdiń amplituda vektorların grafikalıq qosıw.

Zonalardı qońsılazonalardan jetip keletuǵın terbelisler arasındaǵı fazalar ayırması turaqlı, , mısalı, $\pi/6$ shamasına teń bolatuǵınday etip dúzemiz. 70-a súwrette birinshi altı dana Δa_i vektorlarınıń qosındısı kórsetilgen. Qarap atırılǵan jaǵdayda altı vektordıń eń sońǵısı Δa_1 vektorınıń fazasına qarama-qarsı fazaǵa iye boladı. Bunnan biz qarap atırǵan zonalardıń dáslepki altawı Freneldiń birinshi zonasına sáykes keletuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Solay etip, a_1 vektorı Freneldiń birinshi zonası tárepinen payda etilgen terbeliske sáykes keledi. Dál sol sıyaqlı, a_2 vektorı (70-b súwret) Freneldiń eki birinshi zonaları payda etken terbelislerdi súwretleydi h.t.b. Kórinip turǵanında, a_2 vektorınıń uzınlıǵı a_1 vektorınıń uzınlıǵınan kishi. Bul jaǵday usı paragraftıń aldındaǵı paragrafta keltirip shıǵarılǵan juwmaqqa sáykes keledi. Bul juwmaq boyınsha P noqatındaǵı terbelislerdiń amplitudasınıń shaması eki zona ashıq bolǵan jaǵdaydaǵıǵa qaraǵanda bir zona ashıq bolǵan jaǵdayda úlken. Ulıwma aytqanda, ashıq zonalardıń sanınan ǵárezli biz P noqatındaǵı terbelistiń úlken yamasa kishi mánisin alamız. Toliq ashıq tolqın frontına zonalardıń sheksiz úlken sanı hám sınıq sıziqtıń C orayına asimptotalıq jaqınlasıwı sáykes keledi (70-c súwret). Bunnan O hám C noqatların tutastıratuǵın a_∞ vektorınıń uzınlıǵı tolıq ashıq bolǵan tolqın frontı tárepinen P noqatında payda etilgen terbelislerdiń amplitudasın beredi. 70-a hám 70-c súwretlerin salıstırıwdan onıń 266-paragrafta keltirilgen algebralıq summawdıń nátiyjeleri menen sáykes keletuǵınlıǵı kórinip tur.



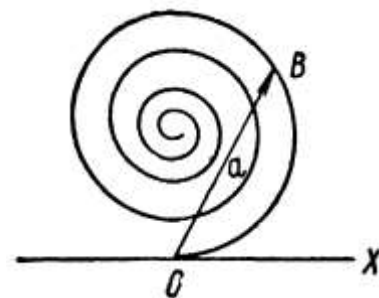
70-súwret. Terbelislerdiń amplituda vektorların qosıw: a) birinshi zonadan; b) birinshi eki zonadan; c) tolqın ashıq bolǵan tolqın frontınan.

SHekte, sheksiz ensiz zonalarǵı alıp, biz uzınlıǵı boyınsha sheksiz kishi bolǵan sheksiz kóp sanlı Δa_i vektorlarına iye bolamız. Olardıń hár biri ózinen burınǵı vektorǵa salıstırǵanda sheksiz kishi múyeshke burılǵan. Nátiyjede 70-c súwrette keltirilgen sınıq sızıq 71-súwrette kórsetilgen spiralǵa aylanadı.

Dóńgelek tesigi bar móldir emes ekranǵa túsetuǵın tegis tolqın frontın qaraymız. Bunday jaǵdayda 266-paragraftaǵı (8-a) formula boyınsha spiraldıń hár bir noqatına, mısalı 71-súwrettegi B noqatqa, $\frac{\rho}{\lambda} \alpha$ shamasınıń belgili bolǵan mánisi sáykes keledi. Bul ańlatpada ρ arqalı tesiktiń ólshemi, α arqalı P noqatınan qaraǵandaǵı tesiktiń múyeshlik ólshemi belgilengen (67-súwret). O noqatın B noqatı menen tutastıratuǵın a vektorınıń uzınlıǵı P noqatındaǵı biz qarap atırǵan dóńgelek tesiktiń ishindegi tolqın frontınıń barlıq bólimi tárepinen payda etiletuǵın terbelislerdiń amplitudasın beredi. Mısal retinde tesiktiń berilgen ρ radiusında P noqatı AA' kósheri boylap qozǵaladı dep boljayıq (66-súwret). Demek, α múyeshi ózgeredi. Bul jaǵdayǵa B noqatınıń spiral boylap orın almasıwı sáykes keledi. Bunday jaǵdayda $OB = a$ vektorınıń uzınlıǵı dáwirli túrde uzayadı hám kelteredi. Bul jaǵday AA' kósheri boylap orın almasıwıǵanda jaqtılandırılǵanlıqtıń dáwirli túrde ózeretuǵınlıǵın kórsetedi (66-súwret). Tap usınday juwmaqqa biz 266-paragrafta algebralıq summalaw jolı menen keldik. Bunday jaǵdayda Frenel zonaların dúziw ashıq zonalarǵı sanı pútin bolǵan jaǵday ushın P noqatlarındaǵı terbelislerdiń amplitudaların tabıwǵa múmkinshilik berdi. Al endi, sheksiz ensiz zonalarǵı dúziwdiń saldarınan biz qálegen P noqatındaǵı terbelislerdiń amplitudasın taba alamız.

71-súwret.

Zonalarǵı sheksiz ensiz qılǵan jaǵdayda amplitudalar vektorları tárepinen payda etilgen sınıq sızıq spiralǵa aylanadı.



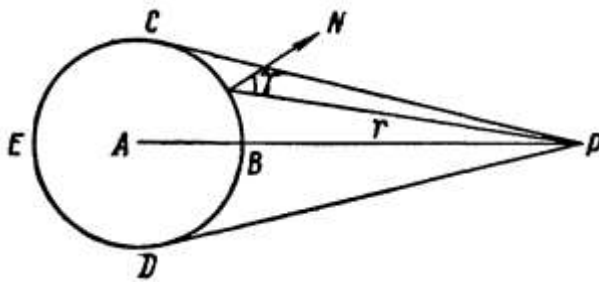
Bunnan bılay, difrakciyanıń hár qıylı kóriniwlerin qaraǵanda biz terbelislerdi qosıwdıń grafikalıq usılın paydalanamız.

Freneldiń esaplaw usılında principiallıq xarakterdegi ayqın bolmaǵan jaǵday orın alǵan. Noqatlıq A deregin kóz aldımızǵa elesleteyik (72-súwret) hám bazı bir waqıt momentinde onıń átirapında sferalıq $BCED$ tolqın frontı payda bolǵan bolsın. P noqatındaǵı terbelislerdiń amplitudasın anıqlaw ushın biz usı P noqatına CBD tolqın frontınıń barlıq bólimlerinen jetip keletuǵın terbelislerdi qosıwımız kerek. Esaplawlarda fronttıń DEC bólimi (fronttıń "artqı" bólimi) itibarǵa alınbaydı. Eger biz betke sırtqı N normalın júrgizetuǵın bolsaq, onda joqarıda

aytılǵanlarǵa sáykes P noqatına kelip jetetuǵın terbelislerdiń amplitudası r diń baǵıtı menen N normalınıń arasındaǵı múyesh γ dan ǵárezli boladı. P noqatına B noqatınıń átirapındaǵı bettiń (bul jaǵdayda $\gamma = 0$). $\gamma = \pi/2$ teńligi orınlanatuǵın C hám D noqatlarınń átirapındaǵı bettiń elementlerinen kelip jetetuǵın terbelislerdiń amplitudaları nolge teń. $\gamma > \pi/2$ teńligi orınlı bolatuǵın bettiń elementlerinen kelip jetetuǵın terbelislerdiń amplitudaların da nolge teń dep esaplawǵa tuwrı keledi. Solay etip, tolqın betiniń "artqı" tárepinen keletuǵın terbelisler esapqa alınbaydı. Bul jaǵday Frenel teoriyasında tiykarsız bolıp qaladı.

Frenel usılınıń ekinshi kemshiligi onıń P noqatındaǵı terbelislerdiń baslanǵısh fazasın anıqlay almawında. Terbelislerdi qosıwdıń grafikalıq usılınıń járdeminde tabılǵan P noqatındaǵı tolıq ashıq bolǵan fronttıń ayırım zonalarınan kelip jetetuǵın terbelislerdi qosıwdıń saldarınan alınǵan fazanıń mánisi haqıyqıy mánisinen $\pi/2$ shamasına ayrıladı.

Haqıyqatında da, meyli, tesigi bar ekranǵa tegis tolqın túsetuǵın bolsın. Eger tesiktiń ólshemi bazı bir P noqatına salıstırǵanda Freneldiń oraylıq zonasınıń kishi bólimi ashılǵan dárejede kishi bolsa, onda P noqatındaǵı terbelisler 70-súwrette OX kósherine parallel bolǵan birinshi strelkanıń járdeminde súwretlenedi. Eger tolıǵı menen ashılǵan bolsa, onda P noqatındaǵı terbelisler OX kósherine perpendikulyar bolǵan a_∞ vektorınıń járdeminde súwretlenedi. Bunnan, sheksiz tegis fronttan keletuǵın terbelislerdiń fazası kishi tesikten kelip jetetuǵın, yaǵnıy elementar yarım sferalıq tolqın túrinde tarqalatuǵın terbelistiń amplitudasınan $\pi/2$ ge keyin qalıwınıń kerek ekenligi kelip shıǵadı.



72-súwret.

Frenel usılı CBD sferalıq tolqın frontınıń tek "aldırǵı" yarımınan kelip jetetuǵın terbelislerdi ǵana esapqa aladı.

Biraq, usı jaǵdaylarǵa qaramastan Frenel usılı paydalı. Sebebi ol terbelislerdiń amplitudası, soǵan sáykes jaqtılandırılǵanlıq ushın durıs mánislerdi beredi. Al, kópshilik jaǵdaylarda bolsa, jaqtılandırılǵanlıqtı bilw áhmiyetli.

Jaqtılıqtıń elektromagnitlik teoriyasınıń tiykarında ǵana difrakciyanı tolıq dál esaplawdı alıwǵa boladı. Nátiye tolqın aylanıp ótetuǵın ekran soǵılǵan materialdıń xarakterinen biraz ǵárezli. Durıs geometriyalıq formaǵa iye bolǵan ótkizgish material ushın dál esaplawlar sońǵı waqıtları V.A.Fok tárepinen ótkerildi.

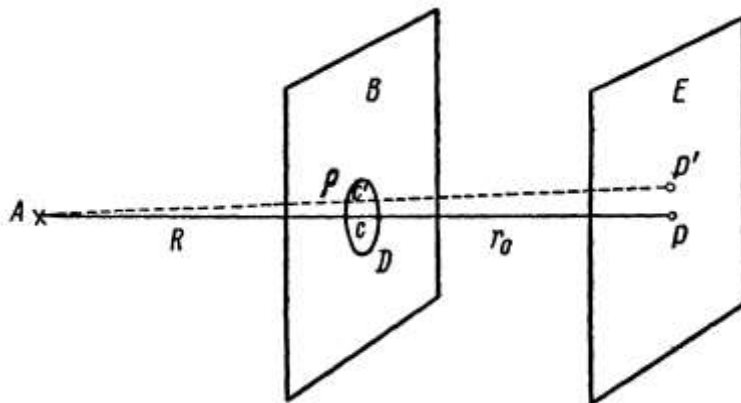
§ 268. Móldir bolmaǵan tosqańlıqlardaǵı difrakciya. Biz joqarıda difrakciyalıq qubılıslardıń móldir bolmaǵan tosqańlıqlardaǵı jaqtılıq dásteleriniń bir bólimin sheklegen jaǵdayda payda bolatuǵınlıǵın kórdik. Bunday jaǵdayda qanday da bir optikalıq sistemalardı paydalanbay baqlanatuǵın difrakciyanı *Frenel difrakciyası* dep ataladı. Usınday túrdegi difrakciyanı aldırǵı paragrafta táriyiplengen zonalar usılınıń járdeminde tallawǵa boladı. Frenel difrakciyasınıń bar qatar júzege keliwin qaraymız.

1. Dóńgelek tesiktegi difrakciya. Meyli, A - jaqtılıqtıń noqatlıq deregi (73-súwret), B bolsa orayı C noqatında jaylasqan D tesigi bar móldir bolmaǵan ekran hám E - jaqtılandırılǵanlıq baqlanatuǵın ekran bolsın. Jaqtılıq tuwrı sıziqlı tarqalatuǵın bolǵanda biz E ekranında shetleri keskin bolǵan jaqtılandırılǵan dóńgelekti alǵan bolar edik. Is júzinde ádewir quramalı bolǵan súwret alınadı. D tesigi arqalı ótetuǵın tolqın frontınıń AC kósheriniń boyında jatırǵan P noqatındaǵı tesiginiń nátiyesin biz joqarıda anıqladıq. D tesigindegi Frenel zonalarınń taq yamasa jup sanınıń bolıwına baylanıslı P noqatındaǵı jaqtılandırılǵanlıqtıń úlken yamasa kishi

boladı. AC kósheriniń boyında jaylaspaǵan qanday da bir P' noqatındaǵı jaqtılandırılǵanlıqtı anıqlaw ushın mınaday tallaw ótkeremiz. Eger B ekranı pútkilley bolmaǵan jaǵdayda tolqın frontınıń P noqatındaǵı tásirin orayınıń xızmetin C' noqatı atqaratuǵın Freneldiń saıyına túrindegi zonaların dúziw arqalı anıqlaǵan bolar edik. B ekranı bar bolǵan jaǵdayda D tesigi usı zonalarǵa qatnası boyınsha koncentrlık bolıp jaylaspaydı. Zonalardıń ashıq bólimi 74-súwrette kórsetilgendeı túrge iye. Bul súwrette anıqlıq ushın qatar sanı taq bolǵan zonalar shtrixlangan. Bul zonalardıń P noqatındaǵı tásiiri olardıń tek sanı boyınsha emes, al hár bir zonanıń qanday bóliminiń ashılǵanlıǵı boyınsha da anıqlanadı. P noqatındaǵı qosındı terbelislerdiń amplitudasın dál esaplaw júdá quramalı, Biraq P noqatınan alıslaǵanda biz jariqlıǵı úlken hám kishi bolǵan orınlardı dáwirli túrde kóremiz. Barlıq súwrettiń dóńgelek simmetriyaǵa iye bolıwınıń kerek ekenligine baylanıslı P noqatınıń átirapında gezeklesetuǵın jaqtılıǵı joqarı hám jaqtılıǵı tómén bolǵan saıynalar payda boladı. 2-súwrette (qosımshaǵa qarańız) tómengi bólimde hár qıylı bolǵan dóńgelek tesiklerdegi payda bolǵan difrakciyalardıń foto súwretleri keltirilgen (n sanı tesiktiń sheklerinde sıyatuǵın zonalardıń sanın kórsetedi). Joqarǵı bólimde usı súwretlerdegi intensivliklerdiń iymeklikleri berilgen. Baqlanatuǵın jaqtılı hám qarańǵı saıynalardıń sanı menen olardıń turǵan orınları baqlawdıń berilgen sharayatlarındaǵı D tesigine jaylasatuǵın zonalardıń sanınan ǵárezli. 266-paragraftaǵı (8)-formula boyınsha radiusı ρ bolǵan tesikte

$$k = \frac{\rho}{\lambda} \cdot \frac{\rho(R + r_0)}{Rr_0} \quad (1)$$

teńligi menen anıqlanatuǵın sandaǵı zonalar jaylasadı. Kórinip turǵanıday, bul k sanı tesiktiń radiusı ρ nıń derekten ekranǵa shekemgi qashıqlıq R den hám ekrannan baqlaw ornına shekemgi qashıqlıq r_0 den ǵárezli eken. R qashıqlıǵın sheksiz úlkeytkende (1)-formula 266-paragraftaǵı (8-a) formulaǵa ótedi. Eger R menen r_0 qashıqlıqları jetkilikli dárejede úlken bolsa, onda tesiktiń ólshemi D úlken bolǵan jaǵdayda da zonalardıń sanı k nıń kishi bolıwı múmkin. Eger tesiktiń maydanına Freneldiń tek bir oraylıq zonası yamasa onıń bir bólimi jaylasatuǵın bolsa, onda E ekranında jaqtılı hám qarańǵı saıynalar menen qorshalmaǵan jayılǵan daq payda boladı. Eger tesiktiń maydanında Freneldiń kóp sanlı zonaları jaylasatuǵın bolsa, onda P noqatınıń átirapındaǵı jaqtılandırıw ámeliy jaqtan bir tekli boladı hám geometriyalıq sayanıń shetlerinde júdá ensiz bolǵan jaqtılı hám qarańǵı jolaqlardıń gezeklesiwi baqlanadı.



73-súwret.
Dóńgelek tesikten difrakciya
qubılısın baqlawdıń sxeması.

Barlıq tallawlar A deregi noqatlıq dep esaplanılıp ótkerildi. Al qálegen haqıyqıy derek ólshemlerge iye boladı. Bunday jaǵdayda biz onı oyımızda noqatlıq dereklerge bólemiz. Bunday jaǵdayda olardıń hár biri óziniń difrakciyalıq súwretin beredi. Bul difrakciyalıq súwretler bir birine salıstırǵanda bir qansha shamaǵa awısqa boladı. Ayırım noqatlar tárepinen alınatuǵın qarańǵı hám jaqtılı jolaqlardıń bir biriniń ústine túsip, alınǵan súwrettiń jayılmaıwı ushın derektiń ólshemleriniń kishi bolıwı kerek.



74-súwret.

"Qıya" bağıt ushın zonalardıń jaylasıwı.

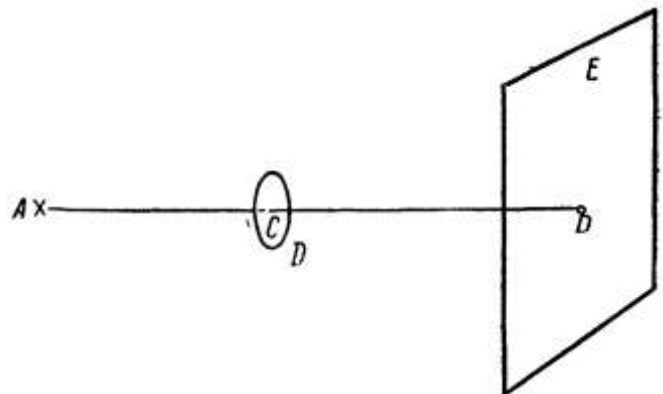
2. Dóńgelek móldir emes ekrandaǵı difrakciya. Meyli, bul jaǵdayda da A jaqtılıqtıń noqatlıq deregi bolsın, D arqalı orayı C noqatında jaylasqan (75-súwret) móldir bolmaǵan ekran belgilengen. Eń dáslep AC kósheriniń boyınsha jatqan P noqatındaǵı tolqın frontınıń tásirin anıqlaymız. Meyli, D ekranı birinshi k dana zonanı jabatuǵın bolsın. Bunday jaǵdayda P noqatına $(k + 1)$ - zonadan baslap, qalǵan zonanıń barlıǵınan terbelisler kelip jetedi. 266-paragraftaǵıday, bul zonalardıń barlıǵınıń tásirin summalap, P noqatındaǵı terbelislerdiń amplitudası A_P nıń $(k + 1)$ - zonasınan keletuǵın terbelislerdiń amplitudasınıń yarımına teń bolatuǵınlıǵın kóremiz:

$$A_P = \frac{a_{k+1}}{2}.$$

Solay etip, móldir emes disktiń ólshemlerinen hám turǵan orınan ǵárezsiz, onıń geometriyalıq sayasınıń orayında barlıq waqıtta jaqtılıq boladı. Usı jaqtılıqtıń intensivligi tek jabılǵan zonalardıń sanınan ǵana ǵárezli. Eger disk kóp sanlı zonalardı jabatuǵın bolsa, onda P noqatındaǵı jaqtılandırılǵanlıq ta kishi boladı.

75-súwret.

Móldir emes disktegi difrakciyanı baqlaw sxeması.



AC kósheriniń boyında jatpaytuǵın noqatlar ushın disk zonalarǵa qatnası boyınsha koncentrik bolmaydı. Zonalardıń qanday bóliminiń jabılǵanlıǵınan ǵárezli qosındı amplituda úlken de, kishi de boladı. Solay etip, biz oraylıq jaqtı noqattı jaqtılı hám qarańǵı saqıynalardıń sistemasınıń qorshap turadı degen juwmaqqa kelemiz. Eger disk oraylıq zonanıń tek kishi bólimin jabatuǵın bolsa, onda tolqınlar tolıǵı menen onı aylanıp ótedi hám disk sayanı pútkilley bermeydi.

Dóńgelek disktiń sayasınıń ortasında jaqtılı daqtıń alınatuǵınlıǵı haqqındaǵı juwmaq Freneldiń tolqın frontınıń ayırım zonalarınan kelip jetetuǵın terbelislerdi summalaw usılı haqqındaǵı birinshi jumısı jariq kórgennen keyin alındı. Bul juwmaq sonday dárejede kútilmegen edi hám sonlıqtan onı Frenel teoriyasına qarsı argument sıpatında paydalandı. Biraq, bir qansha waqıttan keyin sayanıń ortasındaǵı jaqtılı daqtıń bar ekenligi eksperimentlerde dálillendi.

Móldir emes dóńgelek diskten alınatuǵın difrakciyalıq súwretti ólshemleri sonday, jaqtılıqtıń deregi menen baqlaw noqatına salıstırǵanda jaylasıwı boyınsha da tap sonday orında jaylasqan dóńgelek tesikten alınǵan difrakciyalıq súwret penen salıstırıw jolı menen anıqlawǵa boladı. Birinshisiniń jaqtılı bólegi ekinshisiniń qarańǵı bólimine, al birinshisiniń qarańǵı bólimi ekinshisiniń jaqtılı bólimine sáykes keletuǵın

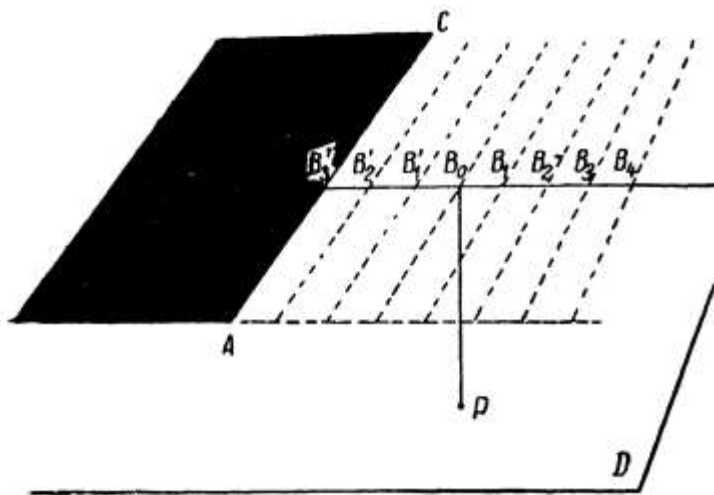
eki ekrandı *qosımsha* ekranlar dep ataydı. Eki qosımsha ekranlar bir birine qosımsha bolğan difrakciyalıq súwretlerde beretuğınday bolıp kórinedi: birewi jaqtı jolaqtı beretuğın orında ekinshisi qarańǵı jolaqtı beredi. Biraq, ulıwma aytqanda bul durıs emes.

Haqıyqatında da, meyli, tolıq ashıq tolqın frontı P noqatında amplitudası a ǵa teń terbelislerdi, al bazı bir ekran bar bolğan jaǵdaydaǵı usı noqattaǵı terbelislerdiń amplitudası a_1 , birinshige qosımsha bolğan ekran bolğan jaǵdaydaǵı terbelislerdiń amplitudasın a_2 bolsın.

Bunday jaǵdayda bul terbelislerdiń hár qaysısın amplitudalar vektorları a , a_1 , a_2 arqalı belgilep, mınanı alamız:

$$a_1 + a_2 = a. \quad (2)$$

Úsh a , a_1 , a_2 vektorların baylanıstıratuğın bul teńlik qanday da bir ekrannıń tásirin oǵan qosımsha bolğan ekrannıń táhiri boyınsha anıqlawǵa múmkinshilik beredi. Biraq, (2)-teńlikten amplitudalardıń birin, misalı a_2 ni anıqlaw ushın tek a_1 menen a nı biliw jetkiliksiz, al barlıq úsh terbelistiń fazaların da biliw kerek boladı. Solay etip, (2)-teńlemenı is júzinde paydalanıw qıyın. Tek bir dara jaǵdayda ǵana fazalardı biliwdiń keregi bolmaydı: eger vektorlardıń biri, misalı $a_1 = 0$ bolsa, onda (2)-teńlik boyınsha $a_2 = a$ teńligi orınlı boladı. Bul mınanı ańǵartadı: eger berilgen ekranda bazı bir noqatta terbelisler pútkilley bolmaytuğın bolsa, onda qosımsha ekranda sol noqatta jabıq bolmaǵan tolqın frontınan alınatuğın jaqtılandırılǵanlıqqa iye jaqtılandırılǵanlıq payda boladı. Keri mánistegi juwmaq durıs emes: eger bazı bir ekranda berilgen noqatta $a_1 = a$ teńligi orınlı bolsa, onda bazı bir ekrandaǵı berilgen noqatta a_2 amplituda 0 den $2a_1$ ge shekemgi mániske iye bola aladı. Sońǵı jaǵday a_1 hám a_2 terbelisleriniń qarama-qarsı fazalarında alınadı.

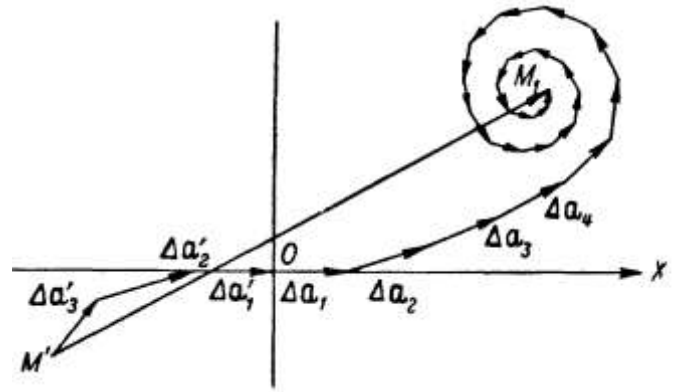


76-súwret.
AC yarım tegisliginen alınatuğın difrakciyanı baqlaw sxeması.

3. Yarım tegisliktiń tuwrı sızıqlı shetindegi difrakciya. Meyli, sheti tuwrı sızıqlı bolğan yarım tegislik berilgen bolsın (76-súwret). Usı yarım tegislikke oǵan parallel bolğan jaqtılıq tolqınınıń tegis frontı túsedı dep boljayıq. Eger jaqtılıq tuwrı sızıqlı tarqalatuğın bolsa, onda D ekranında bir yarım tegisliktiń keskin sayasın alǵan bolar edik. Al, haqıyqatında, jaqtılıqtıń tolqınlıq xarakterge iye bolatuğınlıǵına baylanıslı D ekranında quramalı difrakciyalıq súwret payda boladı. Usı súwretti alıw ushın tolqın frontınıń ayırım zonalarınan keletuğın terbelislerdi Freneldiń summalaw usılınan paydalanamız. Bul jaǵdayda front sferalıq simmetriyaǵa iye bolmaytuğın bolǵanlıqtan, saqıyna tárizli zonalar diń ornına jolaqlar túrindegi zonalar di kirgizemiz.

77-súwret.

Jolaqlar túrindegi zonlardan kelip jetetuǵın terbelislerdiń amplituda vektorların grafikalıq qosıw.

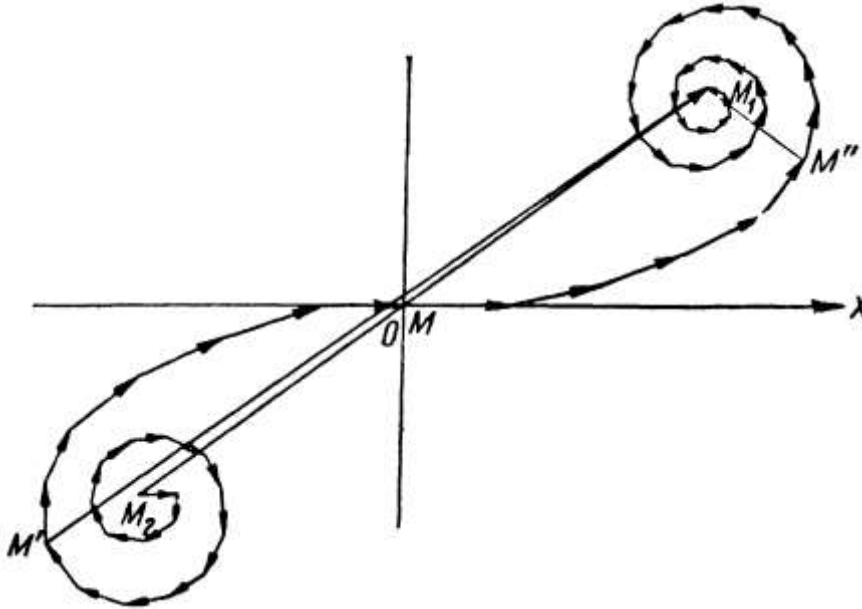


D ekranında jatatuǵın bazı bir P noqatına tolqın frontınan kelip jetetuǵın terbelislerdi qaraymız. Meyli, PB_0 tuwrısı tolqın frontına perpendikulyar bolsın. Zonalardı B_0 noqatınıń oń hám shep táreplerinde simmetriyalı túrde jaylasqan keńligi birdey bolǵan jolaqlar túrinde ótkeremiz. Sonıń menen birge P noqatına kelip jetetuǵın terbelisler fazaları boyınsha júdá kishi shamaǵa ayrılatuǵın bolatuǵınday dárejede ensiz bolıwı kerek. P noqatındaǵı qosındı terbelistiń amplitudası anıqlaw ushın amplituda vektorların qosıwdıń grafikalıq usılınan paydalanamız (267-súwret). Oń táreptegi B_0B_1 zonasınan P noqatına kelip jetetuǵın amplituda vektorı Δa_1 di OX kósheri boylap oń tárepke qaray jatqaramız (77-súwret). Ekinshi B_1B_2 zonasınan P noqatına kelip jetetuǵın amplituda vektorı uzınlıǵı boyınsha kishilew hám fazası boyınsha azmaz keyinde qaladı. Sonlıqtan onı Δa_2 arqalı belgileymiz. Tap sol sıyaqlı, úshinshi zonadan keletuǵın terbelislerdiń vektorın Δa_3 h.t.b. belgileymiz. Biz qarap atırǵan jaǵdayda tolqın frontı sheksizlikke shekem jayladı, sonlıqtan B_0 noqatınıń oń tárepinde jaylasatuǵın zonalardıń sanı sheksiz úlken hám usı zonalardıń barlıǵınan jetip keletuǵın terbelislerdiń amplituda vektorları OM_1 arqalı belgilengen spiral tárizli sııq sızıqtı payda etedi. B_0 noqatınıń shep tárepinde jatqan $B_0B'_0$ zonasınan P noqatına keletuǵın terbelisler fazası boyınsha Δa_1 terbelislerine sáykes keledi. Sonlıqtan olardıń amplitudalarınıń vektorı Δa_1 vektorı baǵıtlanǵan tárepke qaray baǵıtlanǵan $\Delta a'_1$ strelkasınıń járdeminde súwretlenedi (77-súwret). Tap sol sıyaqlı, ekinshi hám úshinshi shep zonalardan kelip jetetuǵın terbelislerdiń amplitudaları vektorları $\Delta a'_2, \Delta a'_3$ strelkalarınıń járdeminde belgilenedi. SHep tárepte fronttıń tek bir bólegi ǵana ashılǵan, sonlıqtan ashıq shep zonlaradıń sanı sheklengen. P noqatındaǵı qosındı terbelislerdiń amplituda vektorı A_P summalarınń járdeminde bilayınsha súwretlenedi:

$$A_P = \sum_{k=1}^{\infty} \Delta a_k + \sum_{k=1}^{\infty} \Delta a'_k.$$

76-súwrette kórsetilgen jaǵdayda ashıq zonalardıń sanı tek úshke teń, sonlıqtan P noqatındaǵı qosındı terbelistiń amplituda vektorı 77-súwrettegi tutastırıwshı $M'M_1$ menen súwretlenedi. P noqatındaǵı jaqtılandırılǵanlıq usı tutastırıwshı sızıqtıń kvadratı menen anıqlanadı. P noqatınıń turǵan ornına baylanisli ashıq zonalardıń sanı hár qıylı. Toliq ashıq tolqın frontına ashıq turǵan oń hám shep zonalarınıń sheksiz úlken sanı sáykes keledi. Olarǵa sáykes keletuǵın amplituda vektorlarınıń barlıq jıynaǵı 78-súwrette keltirilgen qos spiralı payda etedi. Tutastırıwshı sızıqtıń uzınlıǵınıń kvadratı tolıq ashıq front tárepinen payda etiletuǵın jaqtılandırılǵanlıqtı anıqlaydı. Sol spiraldıń ózi qálegen P noqatındaǵı jaqtılandırılǵanlıqtı anıqlawǵa múmkinshilik beredi. Haqıyqatında da, meyli, P noqatı geometriyalıq sayanıń shetinde jaylasqan bolsın. Bul jaǵdayǵa tolıq jabıq shep táreptegi zonalar hám oń táreptegi barlıq ashıq zonalar sáykes keledi. P noqatındaǵı qosındı terbelis MM_1 tutastırıwshısı menen anıqlanadı. P noqatın geometriyalıq sayanıń shetinen oń tárepke, yaǵnıy jaqtılıq tuwrı sızıqlı traektoriya boyınsha tarqalatuǵın bolǵanda teń ólshewli jaqtılandırılǵanlıq orın alatuǵın oblastqa kelip túsetuǵın bolsa shep táreptegi ashıq zonalardıń sanı arta baslaydı. Bul jaǵdayǵa 78-súwrettegi M

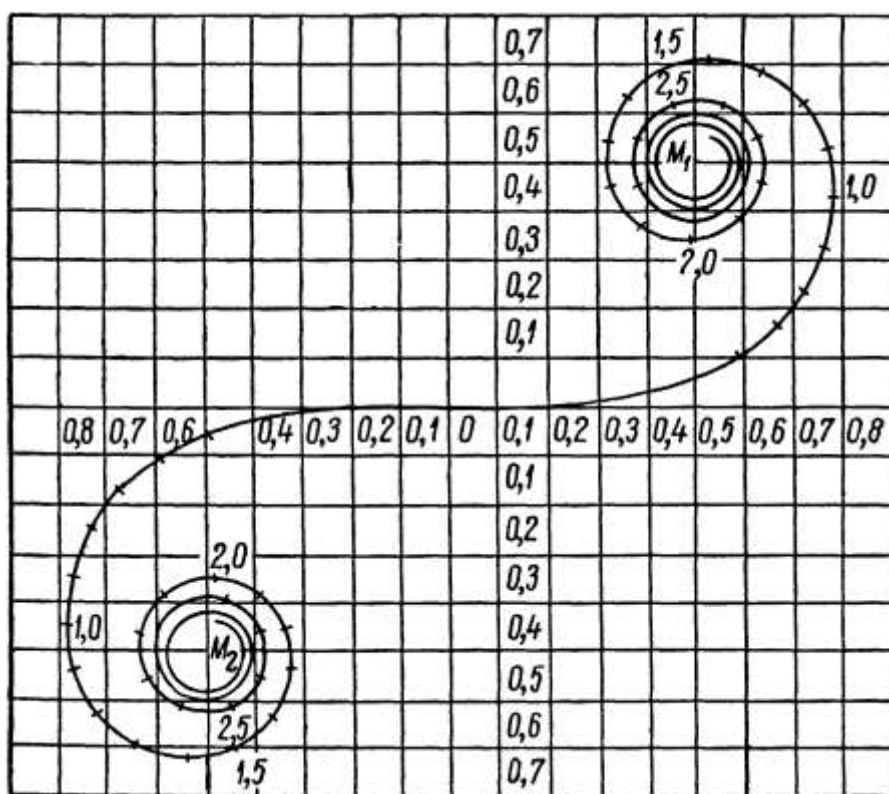
noqatınıń spiral boylap qozǵalıǵı sáykes keledi. $M'M_1$ tutastırıwshısına sáykes keletuǵın P noqatında jaqtılandırılǵanlıq maksimumǵa jetedi. P noqatın bunnan bılay qozǵaltqanda tutastırıwshı sızıqtıń uzınlıǵı birese uzayadı, birese kelteredi, sebebi M' noqatı spiraldıń shep bólimindegi oramlar arqalı qozǵalıwın dawam etedi. Solay etip, biz geometriyalıq saya oblastınıń sırtında jatatuǵın oblastta bir tekli jaqtılandırılǵanlıqtıń ornına gezeklesip jaylasqan jaqtılı hám qarańǵı oblastlar alınadı.



78-súwret.
Amplitudalar vektorın geometriyalıq qosıw: tutastırıwshı sızıq tolıq ashıq tolqın frontınan alınatuǵın terbelislerdiń amplitudasına sáykes keledi.

Geometriyalıq saya oblastında jatatuǵın P noqatlarına qatnası boyınsha barlıq shep táreptegi hám oń táreptegi zonalardıń bir bólimi jabıq: P noqatı saya oblastında qanshama tereńde jaylasqan bolsa, jabıq zonalardıń sanı da sonshama úlken boladı. Saya oblastına jılıw 78-súwrettegi M noqatınıń spiraldıń boyı menen oń tárepke qaray qozǵalıǵı sáykes keledi; bunday jılıswdıń barısında tutastırıwshınıń uzınlıǵı úzliksiz kemeyedi. Demek, geometriyalıq saya oblastında jaqtılandırılǵanlıqtıń úzliksiz kemeyiwi orın aladı.

Jaqtılandırılǵanlıqtı dál esaplaw ushın zonalardı sheksiz ensiz etip alıw kerek. Bunday jaǵdayda 78-súwrettegi sınıq sızıq Kornyu spiralı dep atalatuǵın qos qıysıq spiralǵa aylanadı. Onıń qanday túrge iye bolatuǵınlıǵı 79-súwrette keltirilgen. Masshtab tolıq ashıq front bolǵan jaǵdaydaǵı jaqtılandırılǵanlıq 1 ge teń etip alınadı. Iymeklik boylap qoyılǵan sanlar $v = x \sqrt{\frac{2}{b\lambda}}$ parametriniń mánisin anıqlaydı, bul teńlikte x - geometriyalıq sayanıń shetinen baslap esaplangan qashıqlıq, b — ekrannan difrakciyalıq súwret baqlanatuǵın betke shekemgi qashıqlıq. λ - tolqın uzınlıǵı.

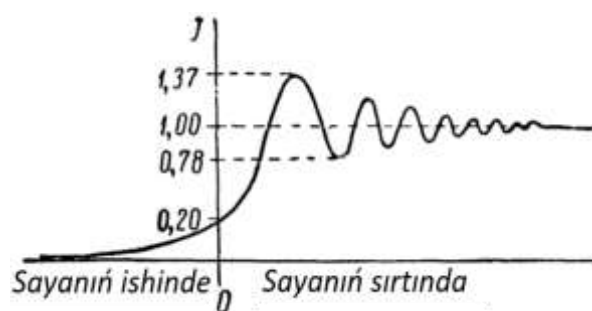


79-súwret. Kornyu spiralı.

80-súwrette Kornyu spiralınıń járdeminde esaplangan yarım tegisliktiń geometriyalıq sayasına jaqın orınlardaǵı jaqtılandırılǵanlıqtıń tarqalıwı berilgen. O noqatı geometriyalıq sayanıń shetine sáykes keledi. Toliq ashıq tolqın frontınan alınǵan jaqtılandırılǵanlıq 1 ge teń dep esaplangan. Kórinip turǵanıday, geometriyalıq sayanıń shetinde jaqtılandırılǵanlıq 0,2 ge teń, bunnan keyin sayaǵa tereń kirkende onıń mánisi úzliksiz túrde nolge shekem kemeyedi. Qarama-qarsı tárepte bir qatar maksimumlar jaylasadı, olardıń birinshisindegi jaqtılandırılǵanlıq 1,37 ge jetedi. Sayanıń shetinen alısłaǵanda maksimumlar bir birine kem-kemnen jaqınlasadı hám olardıń keskinligi kemeyedi.

80-súwret.

Yarım tegisliktiń geometriyalıq sayasınıń shetindegi jaqtılandırılǵanlıqtıń tarqalıwı.



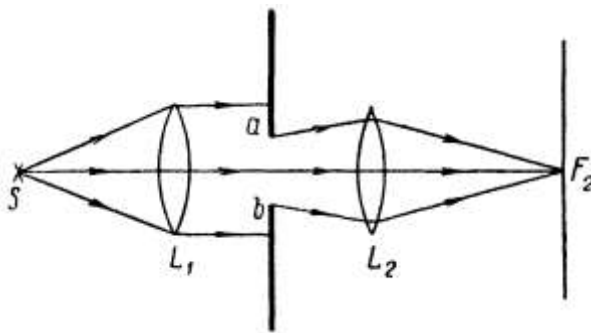
Mısal. Ekranniń shetindegi difrakciya tolqın uzınlıǵı $\lambda = 6 \cdot 10^{-5}$ sm bolǵan qızıl jaqtılıqta baqlanadı. Kornyu spiralınan paydalanıp (79-súwret) birinshi tórt jaqtılı jolaqtıń iyelegen orınların anıqlańız.

Sheshimi. Tekstte keltirilgen geometriyalıq sayanıń shetinen baslap esaplangan baqlaw noqatınıń koordinatası x penen v parametriniń arasındaǵı baylanıstan paydalanıp, bul jaǵday ushın mınaǵan iye bolamız:

$$x = v \sqrt{\frac{b\lambda}{2}} = v \sqrt{\frac{120 \cdot 6 \cdot 10^{-5}}{2}} \text{ sm} = 0,06v \text{ sm}.$$

79-súwrette birinshi tórt maksimumge v parametriniń shama menen 1,2; 2,35; 3,1; 3,7 shamalarına teń mánisleri sáykes keledi. Bunnan (3)-ańlatpa boyınsha tórt maksimumnıń geometriyalıq sayanır shetinen sáykes 0,08; 0,14; 0,19 hám 0,22 sm qashıqlıqta jaylasatuǵınlıǵın kóremiz.

§ 269. Parallel nurlardaǵı difrakciya. Bizler qarap ótken difrakciyalardı baqlaw ushın qanday da bir optikalıq ásbaplardıń keregi joq: jaqtılıq frontınıń jolında tek onıń (fronttıń) bir bólimin jabatuǵın móldir emes ekran ǵana jaylasadı. Difrakciyalıq qubılıslardı baqlawdıń basqa usılın Fraunhofer berdi. Ol anaw yamasa mınaw jabıwshı ekrannıń járdeminde bir bólimi jabılǵan tegis jaqtılıq tolqınlardı jıynawshı linzaniń bas fokallıq tegisliginde payda bolatuǵın difrakciyalıq súwretti baqladı. *Fraunhofer difrakciyasın* baqlawdıń sxeması 81-súwrette kórsetilgen. Jaqtılıqtıń S noqatlıq deregi L_1 linzasınıń bas fokallıq tegisliginde jaylasqan. L_1 linzasınan nurlardıń parallel dástesi shıǵadı hám onıń jolında ab tesigi bar móldir emes ekran jaylasqan. Ekran nurlardıń dástesiniń bir bólegin irkedi, al bul dáste bunnan keyin ekinshi linzaǵa kelip túsedı. Eger jaqtılıq tuwrı sıızıqlı tarqalatuǵın bolǵanda nurlar ekrannan keyin de parallel dáste túrinde tarqalǵan hám ekinshi linza tárepinen onıń bas fokallıq tegisliginde jıynalǵan bolar edi (linzalardıń ekewin de ideal linzalar dep esaplaymız). Al haqıyqatında, linzaniń fokallıq tegisliginde difrakciyalıq súwret baqlanadı hám onıń túri ekrandaǵı tesiktiń forması menen ólshemlerinen hám túsiwshi tolqınnıń uzınlıǵınan ǵárezli.

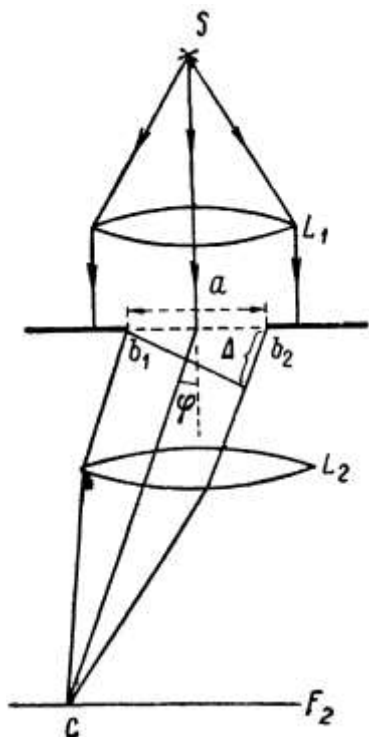


81-súwret.
Parallel nurlardaǵı difrakciyanı baqlawdıń
sxeması.

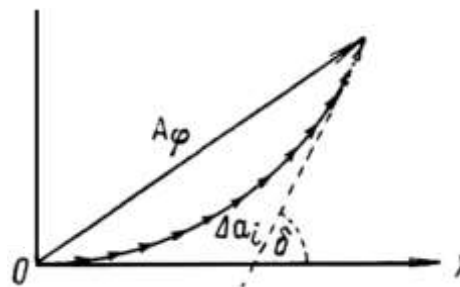
Fraunhoferlik difrakciya qubılısın da tolqın frontınıń ayırım zonalarınan kelip jetetuǵın terbelislerdi grafikalıq summalaw usılı menen tallawǵa boladı. Fraunhofer difrakciyasınıń ayırım kórinislerin qaraymız.

1. Bir sańlaqtan difrakciya. Meyli, keńligi a bolǵan b_1b_2 sańlaǵına parallel nurlardıń dástesi kelip túsetuǵın bolsın (82-súwret). Súwret tegisligine perpendikulyar baǵıtta sańlaqtıń uzınlıǵın sheksiz úlken dep esaplaymız. Sańlaqtıń artında nurlardı bas fokallıq tegislikte jıynaytuǵın L_2 linzası jaylasqan. Eger jaqtılıqtıń deregi bolǵan S tiń xızmetin b_1b_2 sańlaǵınıń shetlerine parallel bolǵan jaqtılıq shıǵarıp turǵan sıızıq atqaratuǵın bolsa, onda L_2 linzasınıń fokallıq tegisliginde sheksiz jırışhke bolǵan jaqtılı jolaq alıńǵan bolar edi. Al haqıyqatında bolsa, sańlaqqa jetken tolqın frontınıń hár bir noqatı barlıq táreplerge qaray tarqalatuǵın terbelislerdiń deregi bolıp tabıladı. Eń dáslepki baǵıtqa φ múyeshi menen tarqalatuǵın nurlar L_2 linzasınıń fokallıq tegisligindegi C noqatında jıynaladı. Terbelislerdiń C noqatındaǵı amplitudası esaplaw ushın tolqın frontın sańlaqtıń shetlerine parallel jáne enleri birdey bolǵan ensiz zonalarǵa bólemiz. Meyli, bir zonadan jetip keletuǵın terbelis $\Delta \mathbf{a}_i$ amplituda vektori menen súwretlenetuǵın bolsın. Bunday jaǵdayda C noqatındaǵı qosındı terbelisniń amplitudasınıń vektori mınaǵan teń boladı:

$$\mathbf{A}_\varphi = \sum \Delta \mathbf{a}_i.$$



82-сүврет. Бір саңлақтан алынған дифракция.



83-сүврет. Саңлақтан өтетуінің тербелістердің амплитуда векторын графикалық қосыу.

Qosındı terbelistіń amplituda vektorın grafikalıq túrde Δa_i vektorları tárepinen payda etiletuǵın sınıq sızıq penen súwretlenedi (83-súwret). C noqatına shetki shep zonadan jetip keletuǵın terbelislerdiń baslanǵısh fazasın (b_1c nurı) nolge teń dep esaplaymız. C noqatına shetki oń zonadan jetip keletuǵın terbelislerdiń baslanǵısh fazasın (b_2c nurı) esaplaymız. Onıń ushın b_2c hám b_1c nurlarınıń arasındaǵı júrisler ayırması Δ nı esaplaymız. 82-súwretten mınaǵan iye bolamız:

$$\Delta = a \sin \varphi.$$

Bul teńlikte a arqalı sańlaqtıń keńligi belgilengen. Baslanǵısh faza δ júrisler ayırması menen (I tomdaǵı 109-paragrafqa qarańız)

$$\delta = 2\pi \frac{\Delta}{\lambda}$$

qatnası boyınsha baylanısqa bolǵanlıqtan (λ arqalı tolqın uzınlıǵı belgilengen)

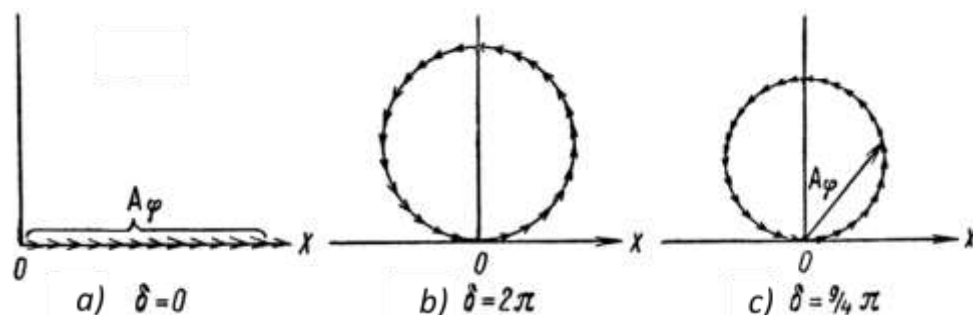
$$\delta = 2 \frac{\pi a \sin \varphi}{\lambda} \quad (1)$$

teńligine iye bolamız. 83-súwrette shetki oń zonadan shıǵatuǵın terbelislerdiń bul baslanǵısh fazası δ múyeshi menen súwretlenedi, Δa_i vektorlarınıń eń sońǵısı menen OX kósheriniń arasındaǵı múyesh δ ǵa teń. SHetki shep zonadan shıǵatuǵın terbelislerdiń baslanǵısh fazasın nolge teń dep esaplaǵan edik. Sonlıqtan δ múyeshi shetki zonalardan C noqatına kelip jetetuǵın terbelislerdiń *fazalar ayırmasın* beredi.

C noqatındaǵı qosındı terbelistіń amplitudası Δa_i vektorları tárepinen payda etilgen tuyıqlaytuǵın sınıq sızıqtıń uzınlıǵı menen súwretlendi.

266- hám basqa da paragraflarda biz hár qıylı zonalardan shıǵatuǵın terbelislerdiń amplitudaları zonaǵa túsirilgen normal menen terbelislerdiń tarqalıw baǵıtı arasındaǵı múyeshitiń shamasınan ǵárezli dep esapladıq. Demek, bul jaǵdayda terbelislerdiń amplitudası Δa_i diń mánisi φ den ǵárezli bolıwı kerek. Biraq kishi φ múyeshleri menen sheklenip, bul ǵárezlikti esapqa almawǵa hám Δa_i amplitudalarınıń barlıǵınıń mánislerin birdey dep esaplawǵa boladı. Bunday jaǵdayda Δa_i vektorlarınan dúzilgen sınıq sızıqtıń ulıwma uzınlıǵı da φ múyeshinen ǵárezli

bolmaydı. φ múyeshiniń hár qıylı mánislerine (demek, fazalar ayırması δ nıń hár qıylı mánislerine) sınıq sızıqtıń buralıwınıń hár qıylı dárejesi ǵana sáykes keledi. Fazalar ayırması δ nıń hár qıylı mánisleri ushın sınıq sızıqtıń túriniń qanday bolatuǵınlıǵı 84-súwrette keltirilgen.



84-súwret. φ múyeshiniń hár qıylı mánislerine sáykes keletuǵın amplitudalar vektorlarınıń grafikalıq qosıw.

φ múyeshiniń $\varphi = 0$ mánisine $\delta = 0$ mánisi sáykes keledi hám bul jaǵday Δa_i vektorlarınıń barlıǵınıń bir tárepke qaray baǵıtlanǵanlıǵın bildiredi (84-a súwret). Bunday jaǵdayda qosındı terbelistiń amplitudası $A_0 = \Delta a_1 + \Delta a_2 + \Delta a_3 + \dots$ shamasına teń, yaǵnıy múmkin bolǵan maksimalıq mániske iye boladı. Solay etip, *súwrettiń orayında maksimalıq jaqtılandırılǵanlıq alınadı.*

$\delta = 2\pi$ teńligi orınlanǵanda Δa_i vektorları menen payda etilgen sınıq sızıq tuyıqlanadı (84-b súwret). Bul jaǵdayǵa $A_\varphi = 0$ teńligi, yaǵnıy *jaqtılandırılǵanlıqtıń nolge teń bolǵan minimallıq mánisi* sáykes keledi. Bul minimumnıń ornı (1)-teńlik boyınsha $\sin \varphi = \lambda/a$ shártin qanaatlandıratuǵın φ múyeshiniń mánisine sáykes keledi. Álbette, tap usınday minimum $\sin \varphi = -\lambda/a$ shárti orınlanatuǵın jaǵdayda oraylıq maksimumnıń ekinshi tárepinde jaylasadı.

Fazalar ayırması δ nıń bunnan bılay ósiwi menen sınıq sızıq jarım-jartı qabatlasadı (84-c súwret). Qosındı amplituda A_φ dıń mánisi $\delta = \pm 2k\pi$ teńligi orınlanǵan jaǵdaylarda nolge teń boladı (k - pútın san). Bul $A_\varphi = 0$ mánisleri minimumlar bolıp tabıladı. Qońsılás eki minimumlardıń arasında salıstırmalı maksimumlar jaylasadı.

Difrakciyalıq súwrettiń sheklerindegi jaqtılandırılǵanlıq ushın sanlı ańlatpanı alıw ushın bir sańlaqtan sheksiz ensiz zonalarǵa ótiw kerek. Bunday jaǵdayda 83-súwrettegi sınıq sızıq OB sheńberiniń doǵasınıń bir bólimine ótedi (85-súwret). Qosındı amplituda A_φ dıń mánisi OB doǵasınıń ushların tutastıratuǵın xorda menen súwretlenedi. Ayılıp ótilgenindey, φ múyeshiniń úlken bolmaǵan mánislerinde OB doǵasınıń uzınlıǵın φ múyeshinen ǵárezsiz dep esaplawǵa boladı. Bir bólimi OB doǵası bolıp tabılatuǵın sheńberdiń radiusın R arqalı belgileybiz. Bunday jaǵdayda

$$A_\varphi = 2R \sin \frac{\angle OCB}{2}.$$

Biraq, $\angle OCB = \delta$. Bunnan

$$A_\varphi = 2R \sin \frac{\delta}{2} \quad (2)$$

teńligine iye bolamız.

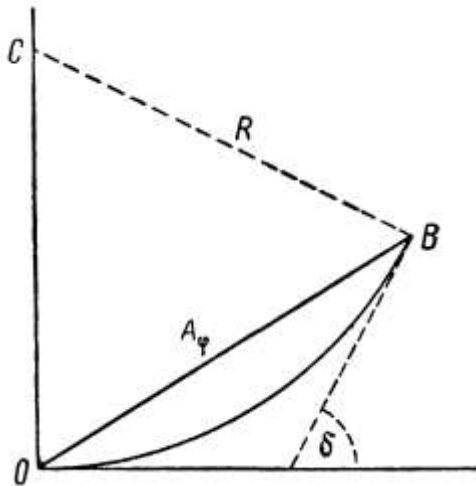
R radiusınıń mánisin $\overline{OB}$ doǵasınıń uzınlıǵı boyınsha ańǵartamız:

$$R = \frac{\overline{OB}}{\angle OCB} = \frac{\overline{OB}}{\delta}.$$

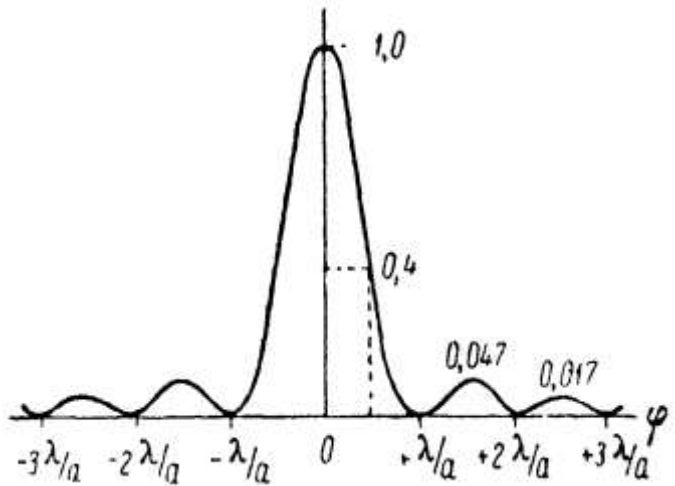
R dıń bul mánisi (2) ge qoyıp

$$A_\varphi = \overline{OB} \frac{\sin \delta/2}{\delta/2} \quad (3)$$

ańlatpasın alamız.



85-súwret. A_φ amplitudasın grafikalıq jollar menen anıqlaw.



86-súwret. Bir sańlaqtan alıńǵan difrakciyalıq súwrettegi intensivliktiń tarqalıw iymekligi.

$\varphi = 0$ teńligi orınlanǵanda $\delta = 0$ teńligi de orınlanadı, bunnan $A_0 = \overline{OB}$ teńligine iye bolamız, yaǵnıy doǵanıń uzınlıǵı oraylıq maksimumdaǵı terbelislerdiń amplitudasın beredi. $\overline{OB}$ nıń bul mánisin (3) ke qoyıp hám $\delta/2$ ni u arqalı belgilep, mınaday teńlikti tabamız:

$$A_\varphi = A_0 \frac{\sin u}{u}.$$

L_2 linzasınıń fokallıq tegisligindegi jaqtılandırılǵanlıq (82-súwretke qarańız) amplitudanıń kvadratı boyınsha anıqlanadı. Sonlıqtan

$$I_\varphi = I_0 \frac{\sin^2 u}{u^2}$$

teńligine iye bolamız hám (1)-teńlik boyınsha

$$u = \frac{\delta}{2} = \frac{\pi a \sin \varphi}{\lambda}.$$

Solay etip, linzanıń fokallıq tegisligindegi jaqtılandırılǵanlıqtıń tarqalıwı $\frac{\sin^2 u}{u^2}$ funkciyasınıń júrisi menen beriledi. Bul tarqalıw 86-súwrette kórsetilgen. Nolge teń bolǵan minimumlardıń ornı $u = \pm k\pi$ ($k = 1, 2, 3, \dots$) mánisleri yamasa (5)-qatnasqa sáykes

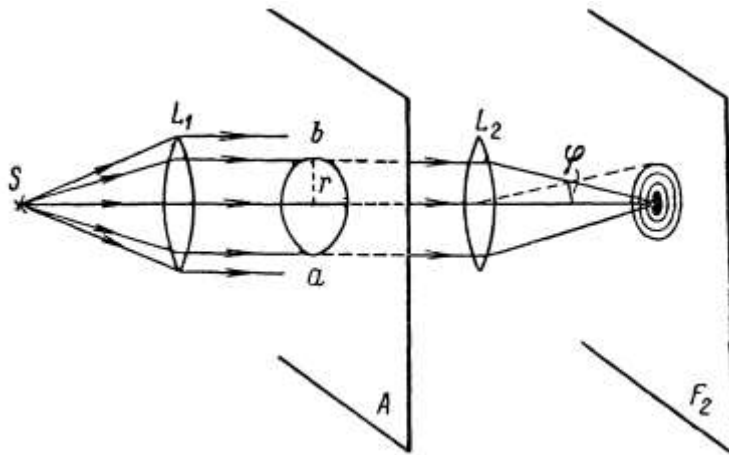
$$\sin \varphi = \pm k \frac{\lambda}{a}$$

shártin qanaatlandıratúǵın φ múyeshleriniń mánisleri boyınsha anıqlanadı.

Oraylıq jaqtılı jolaq eń jaqın bolǵan oń hám shep táreptegi minimumlardıń arasındaǵı oblastta, yaǵnıy (6)-teńlik boyınsha $\varphi = -\frac{\lambda}{a}$ hám $\varphi = \frac{\lambda}{a}$ mánisleriniń arasında jaylasadı. Demek, *tolqın uzınlıǵı λ nıń mánisi qanshama úlken hám sańlaqtıń keńligi a qanshama kishi bolsa oraylıq jaqtılı jolaq sonshama keń boladı.* Usınıń menen birge $\frac{\lambda}{a}$ qatnasınıń shaması úlken bolǵan jaǵdayda ekinshi maksimumlardıń arasındaǵı qashıqlıqtıń úlkeyetuǵınlıǵın kóremiz.

Oraylıq jolaqlardıń óziniń sheklerinde jaqtılandırılǵanlıqtıń onıń ortasınan shetine qaray tez kemeyetuǵınlıǵın atap ótiw áhmiyetli. $\varphi = \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda}{a}$ teńligi orınlanǵanda jaqtılandırılǵanlıq maksimum jaqtılandırılǵanlıqtıń $\frac{1}{4}$ bólegine teń.

Juwmaqlay kele biz bir sańlaqtan alıńǵan Fraunhoferlik difrakciyalıq súwrettiń mınaday túрге iye bolatuǵınlıǵın ayta alamız: orayında — jaqtılandırılǵanlıqtıń maksimumına iye jaqtılı jolaq, qaptallarında — minimumlar menen bólingen salıstırmalı hásiz maksimumlar, minimumlardaǵı jaqtılandırılǵanlıq nolge teń. Tolqın uzınlıǵı úlken hám sańlaqtıń keńligi kishi bolǵan jaǵdaylarda barlıq súwret keń bolıp alınadı.



87-súwret.
Parallel nurlardaǵı dóńgelek
sańlaqta alınatuǵın difrakciyanı
baqlaw usılı.

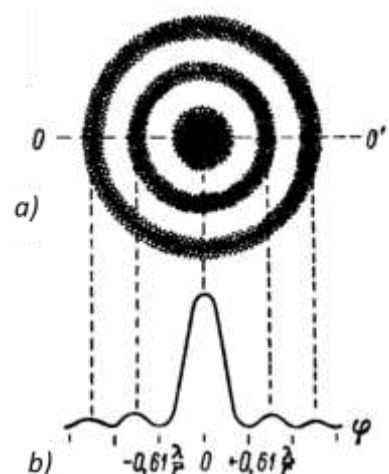
2. Dóńgelek tesikte alınatuǵın difrakciya. Jaqtılıq tuwrı sıızılı tarqalatuǵın jaǵdayda móldir bolmaǵan A ekranındaǵı dóńgelek ab sańlaǵı, al onnan keyin L_2 linza arqalı ótken nurlardıń parallel dástesi usı linzanıń bas fokallıq tegisligi F_2 de bir noqatqa jıynalǵan bolar edi (87-súwret). Jaqtılıqtıń tolqınlıq tábiyatına baylanıslı linzanıń bas fokallıq tegisligi F_2 de quramalı difrakciyalıq súwret payda boladı. Alınatuǵın súwrettiń túrin bul jaǵdayda da ayırım zonalardıń tásirin summalaw jolı menen anıqlawǵa boladı. Saqıyna tárizli zonlardı alıp, oraylıq noqat ushın barlıq zonalardıń tásirleriniń qosılatuǵınlıǵın ańsat kóriwge boladı hám bul orında bas maksimum alınadı. Dóńgelek tesiktegi Frenel difrakciyasın qaraǵanıımızday qıya baǵıtta tarqalatuǵın nurlar ushın qarańǵı hám jaqtılı jolaqlar payda boladı dep juwmaq shıǵarıwǵa boladı. Sáykes esaplawlar φ múyeshiniń

$$\sin \varphi = 0,61 \frac{\lambda}{r} \quad (7)$$

teńligine sáykes keletuǵın mánisinde birinshi qarańǵı saqıynanıń alınatuǵınlıǵın kórsetedi. Bul teńlikte r arqalı tesiktiń radiusı belgilengen. Ekinshi qarańǵı saqıyna $\sin \varphi = 1,116 \frac{\lambda}{r}$ shártin qanaatlandıratuǵın φ múyeshinde jatadı h.t.b. Minimumlardaǵı jaqtılandırılǵanlıq nolge teń. Qońsılas qarańǵı saqıynalardıń arasında jaqtılı saqıynalar jaylasadı, Biraq olar oraylıq jaqtılı daqqa salıstırǵanda ádewir hálisiz boladı. Eger oraylıq maksimumdaǵı jaqtılandırılǵanlıqtı 1 ge teń dep esaplasaq, onda birinshi jaqtılı saqıynadaǵı maksimum jaqtılandırılǵanlıq 0,0174 ke, al ekinshisinde 0,0041 ge teń. A ekranındaǵı dóńgelek tesikten ótken jaqtılıqtıń ulıwma muǵdarınıń shama menen 84 procenti oraylıq jaqtılı daq oblastına túsedı.

Dóńgelek tesikte alınǵan Fraunhofer difrakciyasınıń ulıwma túri 88-a súwrette kórsetilgen. 88-b súwrette bolsa difrakciyalıq súwrettegi jaqtılandırılǵanlıqtıń usı tesiktiń orayı arqalı ótetuǵın OO' punktir sıızıqtıń boyındaǵı tarqalıwı berilgen.

88-súwret.
Dóńgelek tesikte alınatuǵın difrakciya: a)
difrakciyalıq súwrettiń ulıwmalıq túri, b)
jaqtılandırılǵanlıqtıń tarqalıwınıń iymekligi.



φ мұйеші кіші болғанда (7)-formula бойынша бірінші қараңғы сақынаның мұйешлік радиусы $\Delta\varphi$ жуық түрде мінаған тең:

$$\Delta\varphi = 0,61 \frac{\lambda}{r} = 1,22 \frac{\lambda}{d}. \quad (7a)$$

Bul teńlikte d - tesiktiń diametri. Bul saqynanıń ishinde jaqtılı oraylıq daq jatadı. λ/d qatnasınıń shaması qansha úlken, yaǵnıy tolqın uzınlıǵı λ qanshama úlken bolsa oraylıq jaqtılı daqtırń ólshemleri de úlken boladı. Sonıń menen birge tesiktiń diametri d úlken bolǵan sayın oraylıq jaqtılı daqtırń ólshemi kishireyedi. Birinshi qarańǵı saqynanıń sıızıqlı ólshemleri juwıq túrde міnaǵan teń:

$$\Delta l = \Delta\varphi \cdot F = 1,22 \frac{\lambda}{d} F.$$

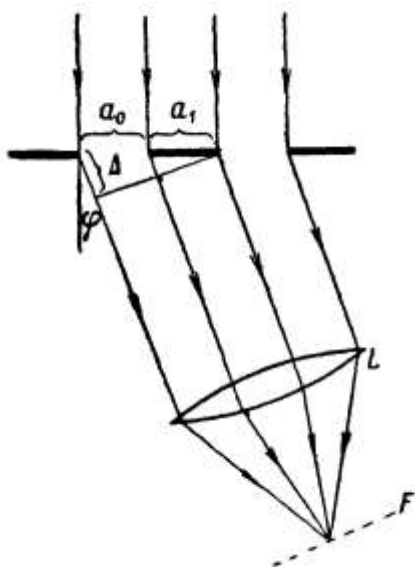
Bul teńlikte F arqalı L_2 linzanıń bas fokuslıq qashıqlıǵı belgilengen. Difrakciyalıq súwrettiń orayınan baslap birinshi qarańǵı saqıyna turǵan orıńǵa kóshkende jaqtılandırılǵanlıq monotonlı tárizde kemeyedi (88-b súwret). Biraq, kontrastı boyınsha vizuallıq baqlaǵanda oraylıq jaqtılı daq kishkenedey bolıp kórinedi hám onıń "diametrin" juwıq túrde birinshi qarańǵı saqynanıń radiusına, yaǵnıy $1,22 \frac{\lambda}{d}$ shamasına teń dep esaplawǵa boladı. Mısalı, diametri $d = 0,5$ mm bolǵan tesikte hám linzanıń bas fokuslıq qashıqlıǵı $F = 100$ sm bolǵan jaǵdayda tolqın uzınlıǵı $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$ sm bolǵan kózge kórinetuǵın jaqtılıq paydalanılǵan jaǵdayda oraylıq jaqtılı daqtırń ólshemi ushın

$$\Delta l = 1,22 \frac{5 \cdot 10^{-5}}{5 \cdot 10^{-2}} 10^2 \text{ sm} = 0,122 \text{ sm}$$

shamasına iye bolamız.

§ 270. Kóp sańlaqlardaǵı difrakciya. Difrakciyalıq pánjere. 269-paragrafta bir sańlaqtaǵı parallel nurlardaǵı difrakciyanı qaradıq. Endi bir birine parallel, keńlikleri birdey hám a_0 shamasına teń jáne bir birinen birdey a_1 qashıqlıqta jaylasqan bir neshe sańlaqlardı qaraymız. Bir sańlaqtaǵı difrakciyaday, bul jaǵdayda da difrakciyalıq súwret L linzanıń fokallıq tegisliginde baqlanadı. Ápiwayılıq ushın kogerent nurlardıń dástesi sańlaqlar jaylasqan tegislikke perpendikulyar baǵıtta túsedі dep esaplaymız (89-súwret).

Bul jaǵdayda mınaday jaǵdaylarǵa baylanıslı qubılıs biraz quramalasadı: hár *bir sańlaqta alınatuǵın difrakciya* menen bir qatarda sańlaqlardıń hár birinen jetip keletuǵın jaqtılıq dásteleriniń terbelisleriniń qosılıwı, yaǵnıy *kóp dástelerdiń interferenciyası orın aladı*. Eger sańlaqlardıń ulıwma sanı N ge teń bolsa, onda bir biri menen N dana nur interferenciyalanadı.



89-súwret.
Difrakciyalıq pánjere.

Dáslep N dana dásteniń interferenciyası haqqındaǵı máseleni qaraymız. Usınıń menen birge sańlaqlar jaylasqan tegislikke túsirilgen normal menen birdey φ múyeshinde tarqalatuǵın dástelerdi qaraymız. Bunday jaǵdayda barlıq dástelerdegi terbelislerdiń amplitudaları birdey (berilgen φ de); onıń mánisin a arqalı belgileymiz. 89-súwrette kórinip turǵanıday, qońsılas sańlaqlardan kelip jetetuǵın nurlardıń arasındaǵı júrisler ayırması Δ mınaǵan teń boladı:

$$\Delta = (a_0 + a_1) \sin \varphi. \quad (1)$$

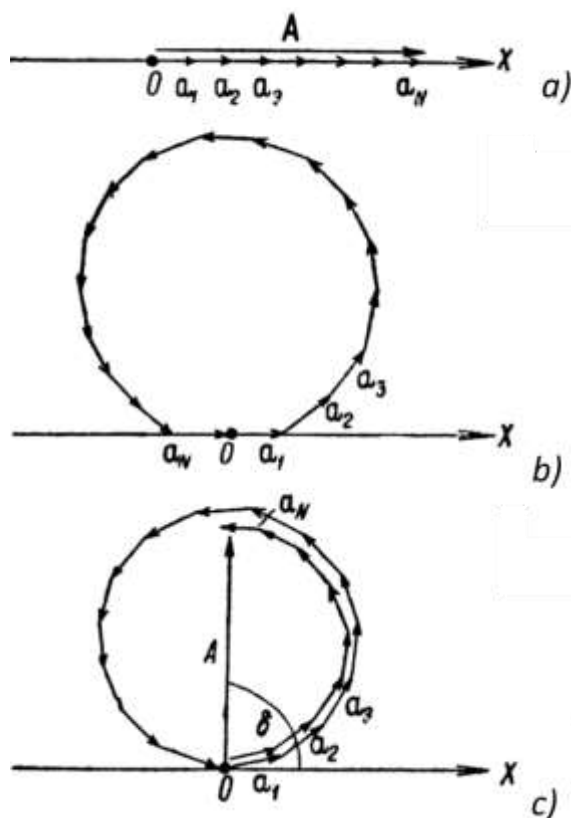
$a_0 + a_1$ qosındısı b arqalı belgileymiz. Bunday jaǵdayda (1)-formula mınaday túrge enedi:

$$\Delta = b \sin \varphi. \quad (1a)$$

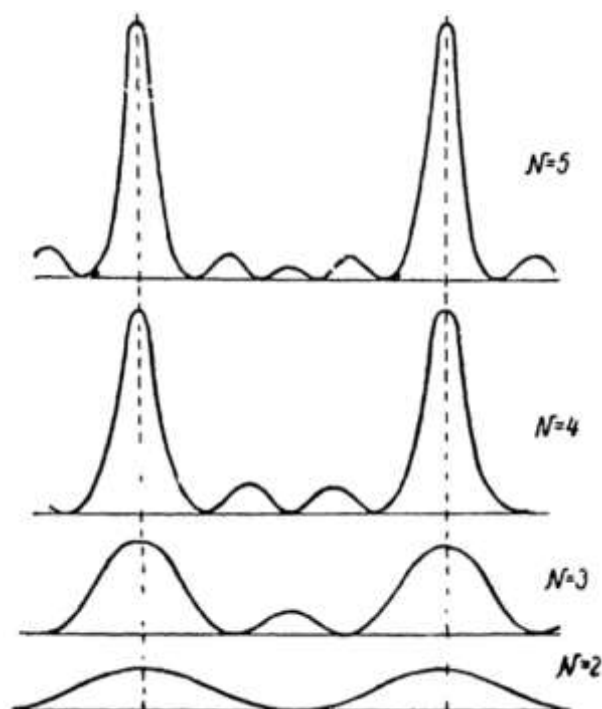
Bunday júrisler ayırmasına qońsılas dásteler arasındaǵı δ fazalar ayırması sáykes keledi. Onıń shaması mınaǵan teń

$$\delta = 2\pi \frac{\Delta}{\lambda}. \quad (2)$$

Terbelislerdiń interferenciyasınıń nátiyjesinde linzanıń fokallıq tegisliginde bazı bir A amplitudasına iye qosındı terbelis alınadı. Onıń mánisi fazalar ayırması δ dan, soǵan sáykes difrakciya múyeshi φ den ǵárezli.



90-súwret. Amplituda vektorların qosıw.



91-súwret. Kóp sanlı nurlardıń interferenciyasındaǵı intensivliktiń tarqalıwı.

Endi qosındı amplituda A nı anıqlaw ushın amplitudalardı qosıwdıń grafikalıq usılın paydalanamız. Bunday jaǵdayda A vektorı amplituda vektorları a lardı qosıwdıń saldarınan payda bolǵan sınıq sızıqtıń tuyıqlawshısı bolǵan vektor túrinde kórsetiledi.

Álbette, a vektorları bir tuwrınıń boyında jaylasatuǵın bolsa A vektorı maksimalıq mánisine jetedi (90-a súwret). Bul jaǵday

$$\delta = \pm 2k\pi \quad (3)$$

teńligi orınlangan jaǵdayda orın aladı. Bul teńlikte $k = 0, 1, 2, \dots$

Bunday jaǵdayda $\mathbf{A}$ vektorınıń uzınlıǵı $\mathbf{A} = N\mathbf{a}$ shamasına teń boladı. Bunnan L linzalıń fokallıq tegisligindegi jaqtılandırılǵanlıqtıń $\delta = 2k\pi$ teńligi orınlanganda maksimumlıq mánisine jetetuǵınlıǵın kóremiz:

$$I_{max} = cN^2a^2. \quad (4)$$

Bul teńlikte c arqalı proporcionallıq koefficient belgilengen.

$\mathbf{a}$ vektorları tárepinen payda etiletuǵın sınıq sızıq tuyıq sızıqqa aylanǵan jaǵdayda, yaǵnıy $\mathbf{a}$ vektorınıń eń sońǵısı birinshi $\mathbf{a}$ vektorına parallel jaylasatuǵın jaǵdayda $\mathbf{A}$ vektorı nolge aylanadı (90-b súwret). $\mathbf{a}$ vektorlarınıń sońǵısı OX kósheri menen $N\delta$ múyeshin jasaytuǵın bolǵanlıqtan, usıǵan sáykes $N\delta = \pm 2k\pi$ shárti orınlangan jaǵdayda ($k = 0, 1, 2, \dots$) ol OX kósherine parallel jaylasadı.

Solay etip, biz minimumlardı alıwdıń shártin alamız:

$$\delta = \pm 2k \frac{\pi}{N}. \quad (5)$$

Minimumlarda jaqtılandırılǵanlıq nolge teń:

$$I_{min} = 0. \quad (6)$$

Minimumlar δ shaması (5)-shártti qanaatlandıratuǵın hám (5)-shárt maksimumlar shárt (3) ke ótetuǵın $\delta = 0, N, 2N, 3N, \dots$ teńlikleri orınlanbaytuǵın jaǵdaylarda payda boladı. Ayılǵanlardan mınaday jaǵday kelip shıǵadı: $I_{min} = 0$ minimumlar (3)-qatnas penen anıqlanatuǵın $I_{max} = cN^2a^2$ maksimumlarına salıstırǵanda ($N - 1$) ese jiýi jaylasadı. Kórinip turǵanıday, qońsılas minimumlardıń arasında jáne bir maksimumnan payda bolıwı kerek. Bul maksimumlar $\mathbf{a}$ vektorları payda etken sınıq sızıq bir biri menen jaqınlasqanda tuyıqlanbaytuǵın jaǵdayda, yaǵnıy $\mathbf{a}$ vektorları tárepinen quralǵan sınıq sızıq birinshisi menen tutaspaytuǵın jaǵdayda payda boladı (90-c súwret). Bul maksimumlardıń burınraq qarap ótilgen maksimumlardan ádewir hálisiz ekenligin kórsetiwge boladı. Sonlıqtan olardı *ekinshi maksimumlar*, al (3)-shárt orınlangan jaǵdayda payda bolatuǵın maksimumlardı *bas maksimumlar* dep ataydı. Ekinshi maksimumlardıń eń intensivlisi (N niń úlken mánisinde) bas maksimumlardıń intensivliginiń $1/23$ shamasınan úlken bolmaydı.

Sońında biz mınanı alamız: *birdey amplitudaǵa iye bolǵan N dásteniń interferenciyasında intensivlikleri birdey $I_{max} = cN^2a^2$ shamasına teń bir qatar bas maksimumlar payda boladı; qońsılas bas maksimumlardıń arasında $N - 1$ dana $I_{min} = 0$ minimumlar jaylasadı; usınıń menen birge, qońsılas bas maksimumlar arasında eki, úsh, tórt hám bes interferenciyalanıwshı dásteler bar bolǵan jaǵdaylar ushın $N - 2$ dana ekinshi maksimumlar jaylasadı. Kórinip turǵanıday, interferenciyalanıwshı dástelerdiń sanı úlkeygende bas maksimumlar keskin túrge enedi; olardıń arasında kem-kemnen kóp sanlı ázzi ekinshi maksimumlar jaylasadı.*

Fazalar ayırması δ menen júrisler ayırması Δ arasındaǵı baylanıstı [(2)-formula] hám (1-a) formulanı itibarǵa alıp, bas maksimumlardıń

$$\sin \varphi = \pm k \frac{\lambda}{b} \quad (7)$$

shártin qanaatlandıratuǵın φ múyeshlerinde payda bolatuǵınlıǵın alamız. Bul teńlikte $k = 1, 2, 3, \dots$ Al, minimumlar bolsa

$$\sin \varphi = \pm k \frac{\lambda}{bN} \quad (8)$$

shártin qanaatlandıratuǵın φ múyeshlerinde payda boladı. Bul teńlikte $k = 1, 2, 3, \dots$ ($k = N, 2N, 3N, \dots$ mánislerinen basqa).

Tek ayırım sańlaqlardan shıǵatuǵın dástelerdiń interferenciyasın esapqa alǵanda bas maksimumlar, joqarıda ayılǵanday, birdey intensivlikke iye bolǵan bolar edi. Haqıyqatında, hár bir sańlaqta hár qıylı φ múyeshinde difrakciyalanǵan nurlar L linzalıń fokallıq tegisliginde hár qıylı amplitudalarǵa iye terbelislerdi beredi, bas maksimumlardıń shamaları hár qıylı boladı. Bul ayırmanı esapqa alıw ushın 269-paragrafta tallanǵan bir sańlaqta alınǵan difrakciyalıq súwrettiń

túrinen paydalanıw kerek. L linzaniń bas fokallıq tegisliginde bir sańlaq 92-b súwrette kórsetilgen I_2 tarqalıwdı beredi. Bas maksimum $\varphi = 0$ teńligi orınlangan jaǵdayda alınadı. I_{2min} minimumlar φ múyeshiniń

$$\sin \varphi = \pm k \frac{\lambda}{a_0} \quad (9)$$

shártin qanaatlandıratuǵın mánislerinde alınadı. Bul teńlikte a_0 - sańlaqtıń keńligi, $k = 1, 2, 3, \dots$. Minimumlardıń arasında ekinshi maksimumlar jaylasadı. Olardıń eń úlken intensivlikke iye bolǵanıń intensivligi bas maksimumnıń shama menen $1/23$ bólimine teń (92-b súwrette ekinshi maksimumlardıń shaması ayqınlıq ushın bir qansha úlkeytilgen).

L linzaniń fokallıq tegisligindegi jaqtılandırılǵanlıqtıń haqıyqıy tarqalıwı bolǵan I funkciyası

$$I = I_1 I_2$$

kóbeymesi menen kórsetiledi. Bul tarqalıw 92-c súwrette keltirilgen. Kórinip turǵanıday, tek I_{1max} bas maksimumları ǵana intensivli boladı. Olar difrakciyalıq súwrettiń bas maksimumı I_{2max} tıń oblastına kiredi. Olardıń sanı b shaması menen sańlaqlardıń keńligi a_0 dıń qatnasınan ǵárezli. Haqıyqatında, I_2 iymekliginiń birinshi minimumı (oń φ múyeshi tárepine qaray) $\varphi = \varphi_1$ teńligi orınlanganda (9)-teńlik penen anıqlanatuǵın

$$\sin \varphi_1 = \frac{\lambda}{a_0}$$

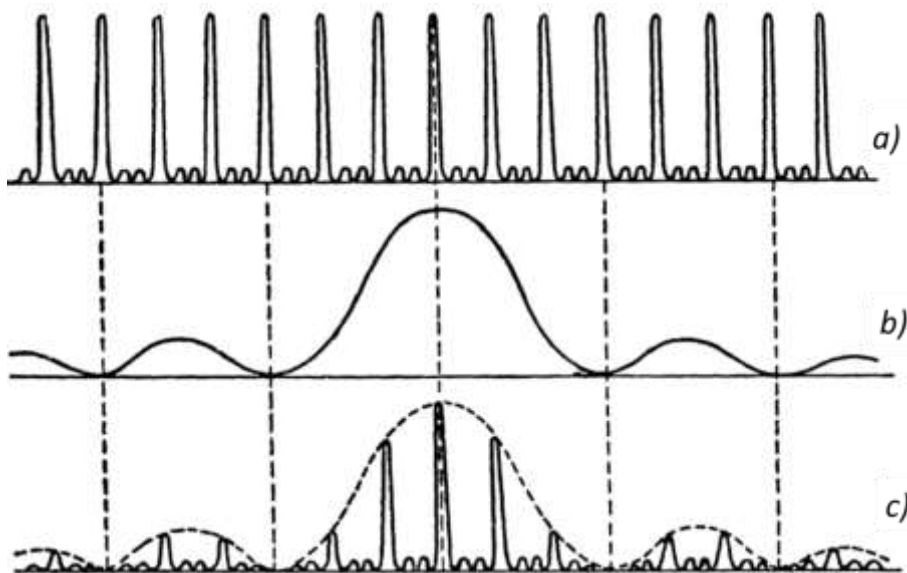
φ múyeshinde jaylasadı. Eger

$$\sin \varphi_1 = k \frac{\lambda}{b}$$

teńligi orınlanatuǵın bolsa, onda múyeshtiń usı mánisine I_1 iymekliginiń bas maksimumı sáykes keledi. Bul teńliktegi k nıń pútın san bolıwı kerek. Bul eki teńlikti salıstırıp, k nıń

$$k = \frac{b}{a_0}$$

teńliginiń járdeminde anıqlanatuǵınlıǵın kóriwge boladı.



92-súwret. Tórt sańlaқтаǵı difrakciyada alınatuǵın maksimumlardıń orınları: a) tórt dásteniń interferenciyasınıń nátiyjesinde alınatuǵın maksimumlar; b) bir sańlaқта alınatuǵın difrakciyalıq súwrettegi jaqtılandırılǵanlıqtıń tarqalıwı; c) maksimumlar boyınsha jaqtılandırılǵanlıqtıń tarqalıwı.

Solay etip, eger b/a_0 qatnası pútin sangá teń bolsa, onda $k = \frac{b}{a_0}$ tártibindegi bas I_2 iymekliginiń nolge teń bolǵan minimumına túsedı hám joǵaladı. Bunday jaǵday

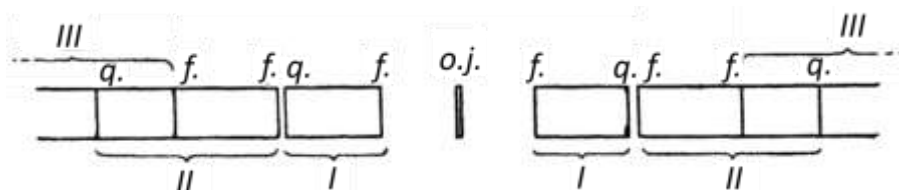
$$k = \pm k' \frac{b}{a_0} \quad (11)$$

tártibindegi barlıq bas maksimumlar ushın da orınlı bolatuǵınlıǵın ańsat kóriwge boladı. Bul teńlikte $k' = 1, 2, 3, \dots$ Bas maksimumnıń I_2 iymekliginiń sheklerine I_1 iymekliginiń $2 \frac{b}{a_0} - 1$ dana ekinshi maksimumları I_2 iymekliginiń ekinshi maksimumlarında jaylasadı. 92-súwret sańlaqlar bir birinen birdey qashıqlıqta turǵan hám $\frac{b}{a_0} = 3$ bolǵan jaǵday ushın tiyisli. $b = a_0 + a_1$ teńligi orınlı bolǵanlıqtan $\frac{b}{a_0} = 3$ teńliginen sańlaqlardıń arasındaǵı móldir emes oblastlardıń keńliginiń sańlaqlardıń ózleriniń keńliginen eki ese úlken ekenligi kelip shıǵadı.

Birdey móldir emes jolaqlar menen ajratılǵan móldir sańlaqlardıń qatarı *difrakciyalıq pánjere* atamasına iye. $b = a_0 + a_1$ shaması *pánjereniń turaqlısı* dep ataladı.

Sańlaqlardıń sanı N júdá úlken bolǵan jaǵdaylarda bas maksimumlar júdá keskin, al ekinshi maksimumlar júdá hálisiz. Belgili bolǵan λ tolqın uzınlıǵına iye bolǵan jaqtılıqta (monoxromat jaqtılıq) L linzaniń bas fokallıq tegisliginde difrakciyalıq pánjere tárepinen beriletuǵın barlıq súwret qara aralıqlar menen bólingen ensiz jaqtılı jolaqlardan turadı. Pánjereni aq jaqtılıq penen jaqtılandırǵanda orayda ($\varphi = 0$) aq jolaq payda boladı, sebebi $\varphi = 0$ teńligi orınlanganda (7)-shárt qálegen λ ushın orınlı boladı. Oraylıq aq jolaqtıń oń hám shep tárepinde hár qıylı tolqın uzınlıqları ushın hár qıylı φ múyeshlerinde maksimumlar payda boladı. Usı φ múyeshleriniń mánisleri $k = 1$ teńligi orınlanatuǵın jaǵdaylar ushın (7)-teńliktiń járdeminde anıqlanadı; bul maksimumlar bir biri menen aralasıp *spektrler* dep atalatuǵın boyalǵan jolaqlardı payda etedi. Spektrlerdiń hár birinde fiolet nurlardıń maksimumları oraylıq jolaqqa jaqınaraq, al qızıl nurlar ushın maksimumlar onnan qashıǵıraqta jaylasadı. Nátiyjede $k = 1$ teńligi orınlanatuǵın jaǵdaylarda óziniń fiolet shetleri menen oraylıq jolaqqa jaqın jaylasqan birinshi tártipli eki spektr payda boladı (oń hám shep). Usıǵan sáykes, oraylıq aq jolaqqa simmetriyalı jaylasqan $k = 2, 3, \dots$ lar ushın ekinshi, úshinshi h.t.b. tártiptegi spektrler payda boladı.

Pánjereni tek belgili uzınlıqtaǵı λ_i tolqın uzınlıǵına iye tolqınlar menen jaqtılandırǵanda biz hár qıylı tártiplerdegi spektrlerdi alamız. Bunday jaǵdayda oraylıq jolaq λ_i tolqın uzınlıqları ushın maksimumlardıń bir biriniń ústine túsiwiniń nátiyjesinde payda boladı.



93-súwret. Hár qıylı tártiptegi spektrlerdiń jaylasıwı.

93-súwrette oraylıq jaqtılı jolaqtıń ornı (o.j.) hám $I, II, III, \dots$ rim sanları menen belgilengen hár qıylı tártiptegi kózge kórinetuǵın jolaqlar kórsetilgen. Ekinshi hám úshinshi tártiptegi kózge kórinetuǵın spektrlerdiń ayırım bólimleri bir biriniń ústine túsedı. (7)-teńlikten biz

$$k\lambda = k'\lambda' \quad (12)$$

shártin qanaatlándıratuǵın λ tolqın uzınlıǵındaǵı jaqtılıqtıń k -tártibindegi maksimumnıń ústine tolqın uzınlıǵına λ' shamasına iye jaqtılıqtıń k' -tártipli maksimumnıń ústine túsetuǵınlıǵın kóremiz. (12)- teńlikten, mısalı, tolqın uzınlıǵı λ bolǵan birinshi tártipli ($k = 1$) spektrdiń ústine

tolqın uzınlıǵı $\lambda' = \frac{1}{2}\lambda$ shamasına teń bolǵan spektrdiń ekinshi tártibi ($k = 1$) túsedı. Tap sol sıyaqlı, ekinshi tártip spektrdiń hár bir uchastkasınıń ústine tolqın uzınlıǵı $\lambda' = \frac{2}{3}\lambda$ shamasına teń bolǵan úshinshi tártipli spektrdiń uchastkası túsedı. Hár qıylı tártiplerdegi spektrler boyınsha jaqtılandırılǵan tarqalıwı b/a_0 qatnasınan ǵárezli boladı hám I_2 iymekliginiń júrisi boyınsha anıqlanadı. Eger, mısalı, sańlaqlardıń arasındaǵı móldir bolmaǵan aralıqlardıń qalınlıǵı a_1 ge teń bolsa, onda $b = 2a_0$ hám (11)-formula boyınsha jup tártipli barlıq spektrler joǵaladı.

Difrakciyalıq pánjereler birinshi ret 1821-jılı Fraungofer tárepinen spektrlerdi úyreniw ushın paydalanıldı. Ol paydalanǵan birinshi pánjereler bir birine parallel etip kerilgen kóp sanlı jińishke sımlardan turǵan. Sımlardıń arasındaǵı jaqtılıq ótetuǵın sańlaqtıń xızmetin atqaratuǵın oblastlardıń 1 santimetrdegi sanı 136 ǵa shekem jetken. Keyinirek Fraungofer pánjerelerdi shıyshe plastinkanıń betine almazdıń járdeminde shtrixlardı salıw jolı menen soǵa basladı. Házirgi waqıtları usınday (móldir) pánjereler menen bir qatarda metall aynanıń betinde almazdıń járdeminde shtrixlardı salıw jolı menen soǵılǵan shaǵılastırılshı pánjereler de keńnen qollanıladı. Bunday pánjerelerdiń qásiyetleri tiykarınan almazdıń járdeminde túsirilgen shtrixlardıń forması menen tereńliginen ǵárezli boladı. Haqıyqıy pánjerelerdegi jaqtılandırılǵanlıqtıń tarqalıwı biz qarap ótken birdey keńliktegi sańlaqları bar hám móldir bolmaǵan birdey jolaqlar menen ayrıılǵan ideallastırılǵan pánjeredegi jaqtılandırılǵanlıqtıń tarqalıwınan úlken ayırmaǵa iye boladı. Sońǵı waqıtları tek qanday da bir spektrdi beretuǵın, mısalı birinshi tártipli spektrlerdiń birin beretuǵın pánjerelerdi soǵıwdıń sáti tústi.

§ 271. Difrakciyalıq pánjereniń dispersiyası menen ajırata alıw kúshi. Barlıq basqa spektrallıq ásbaplar sıyaqlı pánjere tárepinen beriletuǵın spektr mınaday shamalar menen táriyiplenedi: múyeshlik dispersiya hám ajırata alıw kúshi.

Múyeshlik dispersiya D dep nurlardıń awısıw múyeshi φ den tolqın uzınlıǵı λ boyınsha alınǵan tuwındıǵa teń shamaǵa aytadı:

$$D = \frac{d\varphi}{d\lambda}. \quad (1)$$

$\Delta\lambda$ tolqın uzınlıǵınıń intervalı sáykes keletuǵın spektrdiń kishi uchastkanıń múyeshlik ólshemleri $\Delta\varphi$ dı juwıq túrde bılayınsha kóretiwge boladı:

$$\Delta\varphi = D \cdot \Delta\lambda.$$

Bunnan múyeshlik dispersiyanıń berilgen tolqın uzınlıǵınıń qasındaǵı oblasttaǵı spektrdiń jayılıw dárejesin táriyipleıydi. 270-paragraftaǵı (7)-ańlatpanı differenciallap pánjereniń múyeshlik dispersiyası ushın mınaday ańlatpanı alamız

$$D = \frac{k}{b \cos \varphi}. \quad (2)$$

Kórinip turǵanıday, dispersiya pánjereniń shtrixlarınıń sanınan ǵárezsiz, al onıń b turaqlısı hám spektrdiń tártibi k boyınsha anıqlanadı eken: pánjereniń turaqlısı qansha kishi bolsa onıń múyeshlik dispersiyası úlken boladı.

Kishi φ múyeshlerinde (2)-teńlik boyınsha juwıq túrde

$$D = \left(\frac{d\varphi}{d\lambda} \right)_{\varphi \approx 0} = \frac{k}{b}$$

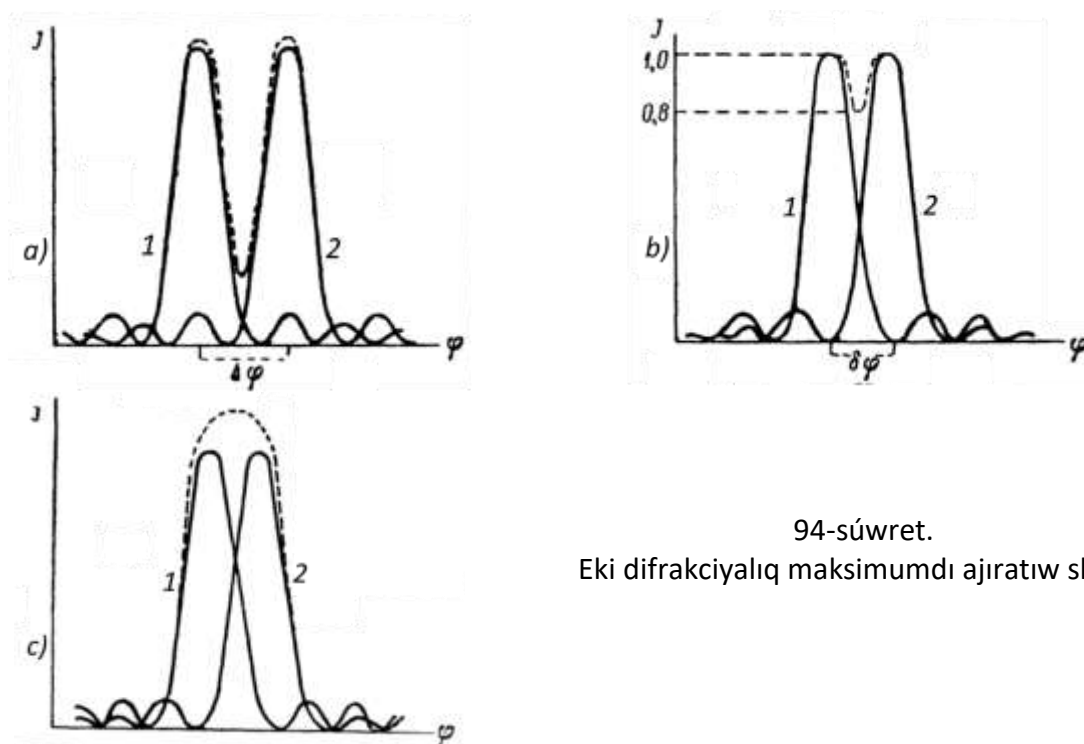
teńligin alamız, yaǵnıy $\varphi = 0$ ge jaqın orınlarda dispersiya turaqlı mánisin saqlaydı; bunnan bunday sharayatlarda spektrallıq sızıqlardıń arasındaǵı múyeshlik qashıqlıq $\Delta\varphi$ dıń tolqın uzınlıqlarınıń ayırması $\Delta\lambda$ ge proporcional bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Turaqlı dispersiyaǵa iye spektr ámeliy jaqtan barlıq tolqın uzınlıqlar oblastına sozılǵan hám sonlıqtan ol spektrdiń fiolet bólimi qızıl oblastına qaraǵanda ádewir jayılatuǵın prizmanıń járdeminde alınǵan spektrden utımlı túrde ajıralıp turadı.

Ajirata aliw qábiletligi pánjereniń tolqın uzınlıqları kishi bolǵan qanday spektrallıq sızıqlardı ajirata alatuǵınlıǵın kórsetedi. Eger ásbap ajirata alatuǵın qońsılas sızıqlardıń tolqın uzınlıqlarınıń ayırması $\delta\lambda$ shamasına teń bolatuǵın bolsa, onda ajirata aliw kúshi dep

$$r = \frac{\lambda}{\delta\lambda} \quad (3)$$

shamasına aytamız. Bunda λ arqalı ajratılátuǵın sızıqtıń ortasha tolqın uzınlıǵı belgilengen.

Spektrallıq sızıqlardıń hár qaysısı pánjereniń spektrinde difrakciyalıq maksimumdı beredi. Qanday jaǵdaylarda λ hám $\lambda + \delta\lambda$ tolqın uzınlıqlarına iye sızıqlarǵa sáykes keletuǵın eki difrakciyalıq maksimumdı bir birinen ajratıwǵa boladı dep soraw beriledi. 94-súwrette bir birinen hár qıylı múyeshlik qashıqlıqlarda jaylasqan eki qońsılas maksimumlar kórsetilgen. Punktir sızıq maksimumlardıń ekewiniń qosındı intensivligin beredi. Múyeshlik qashıqlıq $\delta\varphi$ diń kishireyiwi menen eki punktir sızıqtıń bir birinen ajırılıwı kem-kemnen kishireyedi hám eń aqırında pútkilley joǵaladı (94-c cúwret).



94-súwret.

Eki difrakciyalıq maksimumdı ajratıw shárti.

Reley eki difrakciyalıq súwretti ajratıwdıń tómendegidey ámeliy mánisi bar kriteriyin usındı: eger *olardıń minimumınıń ordinatası qosındı iymekliktiń maksimumınıń ordinatasınıń 0,8 in quraytuǵın bolsa, onda olar bir birinen ajratılǵan dep esaplanadı*. Bunday jaǵdayda minimumdaǵı salıstırma oypat orın 20 procentke jetedi, al bul jaǵdayda kóz benen qaraǵanda eki maksimumnıń arasında qaraǵı aralıqtıń bar ekenligi ayqın kórinedi.

94-súwrette keltirilgen iymekliklerde iymekliklerdiń birewiniń maksimumı ekinshi iymekliktiń minimumına sáykes kelgen jaǵdaydaǵı oyıq oblasttıń shaması 20 procentke jetedi. Solay etip, spektrallıq sızıqlardıń arasındaǵı múyeshlik qashıqlıq $\delta\varphi$ bas maksimum menen oǵan jaqın bolǵan minimumnıń arasındaǵı múyeshlik qashıqlıqqa teń bolǵan jaǵdayda usı eki spektrallıq sızıq bir birinen ajırılǵan boladı.

k -tártiptegi bas maksimumnıń ornı 270-paragraftaǵı (7)-formulanıń járdeminde

$$\sin \varphi = k \frac{\lambda}{b} \quad (4)$$

teńliginiń boyınsha anıqlanadı.

Oǵan eń jaqın bolǵan minimum 270-paragraftaǵı (8)-formula boyınsha $\varphi + \delta\varphi$ múyeshinde

$$\sin(\varphi + \delta\varphi) = k' \frac{\lambda}{bN}$$

shártı orınlanatuǵın jaǵdayda anıqlanadı. Bul formulada k' shamasın $kN + 1$ ge teń esaplaw kerek. Solay etip, mınaǵan iye bolamız:

$$\sin(\varphi + \delta\varphi) = (kN + 1) \frac{\lambda}{bN}. \quad (5)$$

Joqarıda ayılǵanlarǵa sáykes, bir birinen zorǵa ajralatuǵın eki sıziqtıń arasındaǵı múyeshlik qashıqlıqtıń shaması $\delta\varphi$ ge teń bolıwı kerek. Usı $\delta\varphi$ shamasın tabıw ushın (5)-teńlikten (4)-teńlikti aǵzama-aǵza alıw kerek. Bunday jaǵdayda

$$\sin(\varphi + \delta\varphi) - \sin \varphi = \frac{\lambda}{bN}$$

yamasa

$$2 \sin \frac{\delta\varphi}{2} \cos \frac{2\varphi + \delta\varphi}{2} = \frac{\lambda}{bN}$$

teńlikleriniń orın alatuǵınlıǵın kóremiz. $\delta\varphi$ múyeshiniń shamasınıń kishi ekenligin esapqa alsaq, bunnan juwıq túrdegi

$$\delta\varphi = \frac{\lambda}{Nb \cos \varphi}$$

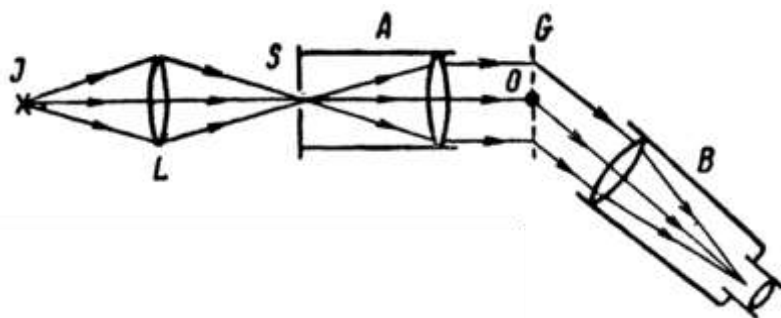
teńligin alamız. Bul múyeshlik qashıqlıqqa tolqın uzınlıqlarınıń $\delta\lambda$ ayırması sáykes keledi. Onıń mánisin múyeshlik dispersiyaǵa arnalǵan (2)-ańlatpanı paydalanıw jolı menen alamız:

$$\delta\lambda = \left(\frac{d\lambda}{d\varphi} \right) \delta\varphi = \frac{b \cos \varphi}{k} \cdot \frac{\lambda}{Nb \cos \varphi} = \frac{\lambda}{kN}. \quad (6)$$

(6)-formuladan sańlaqlardıń sanı N úlken jáne joqarı k tártipli spektrdi paydalanǵan jaǵdayda difrakciyalıq pánjereniń bir birine jaqın bolǵan spektrallıq sıziqlardı ajırata alatuǵınlıǵı kórinip tur. (6)-ańlatpadan ajırata alıw kúshi r ushın mınanı alamız:

$$r = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = kN.$$

Pánjereniń ajırata alıw kúshi b turaqlısınan ǵárezli emes, al sańlaqlardıń ulıwmalıq sanı N hám spektrdiń tártibi k boyınsha anıqlanadı.



95-súwret.
Móldir pánjereli dúzilistiń
sxeması.

Úlken múyeshlik dispersiyaǵa jetiw ushın b turaqlısınıń mánisiniń kishi bolıwı, yaǵnıy pánjereniń uzınlıǵınıń birligine múmkin bolǵanınsha kóp sanlı shtrixlardıń sáykes keliwi kerek. Al ajırata alıw kúshiniń úlken bolıwı ushın shtraxlar sanı N niń úlken bolıwı shárt. Házirgi waqıtlardaǵı pánjereler bir millimetrde 1200 ge shekemgi shtrixlarǵa iye hám ondaǵı shtrixlardıń ulıwmalıq sanı 200 000 ǵa jetedi. Bunday pánjere birinshi tártipte $\lambda/\delta\lambda = 200\,000$ shamasına teń ajırata alıw kúshine teń. Eger hár millimetrde 1200 shtrix bar pánjerede bas fokuslıq qashıqlıǵı $F = 2$ m bolǵan linzaniń járdeminde spektrdi alsa, onda kózge kórinetuǵın birinshi tártipli spektrdiń uzınlıǵı shama menen 85 sm ge teń boladı.

Móldir difrakciyalıq nánjereniń eń ápiwayı sxeması 95-súwrette keltirilgen. Bul súwrette S — pánjereniń shtrixlarına parallel bolǵan sańlaq, A — nurlardıń parallel dástesin beretuǵın

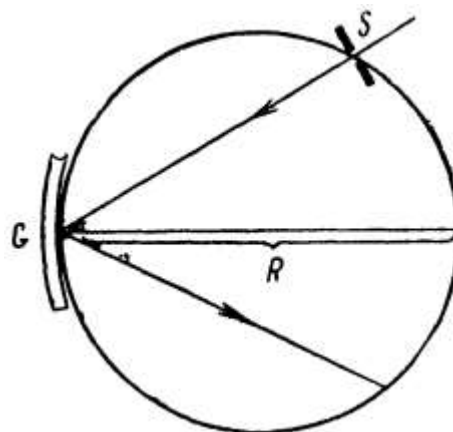
kollimator. Bul dáste normal bağıtta G pánjerege kelip túsedı. S sańlağı L linzanıń járdeminde jaqtılıqtıń I dereginen jaqtılandırıladı. Spekr O kósheriniń dógereginde burıla alatuǵın jáne pánjere turǵan orın arqalı ótetuǵın B trubasınıń járdeminde baqlanadı.

Difrakciyalıq pánjere jaqtılıq tolqınlarınıń uzınlıqların ólshewge múmkinshilik beredi. 270-paragraftaǵı (7)-teńlikten mınaǵan iye bolamız

$$\lambda = \frac{b}{k} \sin \varphi. \quad (7)$$

Berilgen k tártiptegi spektrdegi sızıqqa sáykes keletuǵın φ múyeshin ólshap hám pánjereniń turaqlısı b nı bilip, (7)-teńlik boyınsha bul sızıq ushın tolqın uzınlıǵı λ nı tabıwǵa boladı.

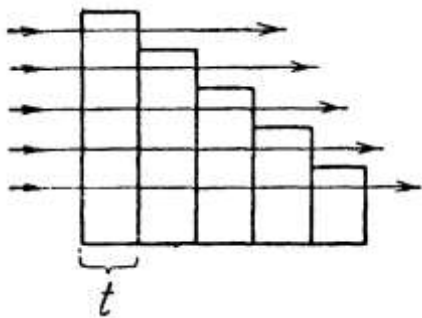
96-súwret.
Oyıs difrakciyalıq pánjere.



Tegis aynaǵa shtrixlardı júrgiziw jolı menen alınatuǵın shaǵıstırıwshı pánjere menen bir qatar da oyıs pánjerelerdi de soǵadı. Oyıs pánjerede oyıs sferalıq bette xorda boyınsha esaplap, bir birinen teńdey qashıqlıqlardaǵı shtrixlar qoyıladı. Oyıs pánjere fokuslawshı qásiyetke iye boladı hám hesh qanday linzalarsız paydalanıladı. Bul jaǵday tegis pánjerege salıstırǵanda onıń artıqmashlıǵı bolıp tabıladı. Eger S sańlağı menen G oyıs pánjere (96-súwret) radiusı usı pánjereniń mayısqanlıq radiusı R den eki ese kishi bolǵan sheńberde jaylastırılǵan bolsa, onda spektr sol sheńberde fokuslanatuǵınlıǵın kórsetiwge boladı.

Spektrdiń uzaq infraqızıl oblastında islew ushın shashıratıwshı pánjerelerdi uzınlıq birligine salıstırmalı kóp bolmaǵan shtrixlardı salıw menen tayarlaydı. Bunday pánjerelerdi esheletlar dep ataydı. Olardı bóletuǵın mashınanıń kesetuǵın pıshaǵın jumsaq mıstıń betine kúsh penen basıw arqalı shtrixlardı payda etiw jolı menen aladı. Payda bolǵan oyıq izler durıs formaǵa iye boladı hám bet tekshe tárizli formanı iyeleydi. Oyıqlıqlardıń shetleriniń qıyalıǵın sáykes túrde saylap alıp, spektrlerdiń infraqızıl oblasttaǵı úlken jariqlıǵın payda etiwge boladı.

§ 272. Joqarı ajırata alıwshılıq kúshine iye spektroskopiya. Spektrlerdi úyreniw menen baylanıslı bolǵan kóp máselelerdi sheshiw ushın joqarı ajırata alıwshılıq kúshine iye spektrallıq ásbaplar talap etiledi. Tájiriýbeler kóp sanlı spektrallıq sızıqlardıń strukturaǵa iye bolatuǵınlıǵın, yaǵnıy bir birine júdá tıǵız jaylasqan bir neshe qurawshılardan turatuǵınlıǵın kórsetti. Olardıń hár qaysısı óziniń menshikli λ_i tolqın uzınlıǵına iye. Ayırım qurawshılardıń arasındaǵı tolqın uzınlıqlarınıń ayırmaları sonshama kishi bolıp, olardı ádettegi prizmalıq spektrograflar menen ajıratıwdıń múmkinshiligi bolmaydı. Joqarı ajırata alıw kúshi magnit maydanınıń spektrallıq sızıqlarǵa tásinin úyreniw (Zeeman qubılısı, 346-paragraf), sızıqlardıń konturların hám basqa da bir qatar máselelerdi sheshiw ushın da kerek.



97-súwret.
Teksheli pánjere.

Joqarı ajırata alıw kúshine iye spektrallıq ásbaplardıń qatarına úlken difrakciyalıq pánjereler kiredi. Bunnan aldırǵı paragrafta olardıń jumıs islewiniń kóp sanlı dástelerdiń interferenciyasına tiykarlangan ekenligi atap ótildi. Kóp sanlı dástelerdiń interferenciyası qullanılatuǵın bir qatar spektrallıq ásbaplar da bar. Usınday ásbaplardıń teoriyası birinshi ret B.B.Golicin tárepinen berildi.

Ádettegidey difrakciyalıq pánjere isleytuǵın principte teksheli pánjere yamasa Maykelson esheloni dep atalatuǵın bir biriniń ústine qoyılǵan birdey qalırlıqtaǵı shiyshe plastinkalardan turatuǵın dúzilis isleydi (97-súwret). Hár bir kelesi plastinka óziniń aldındaǵı plastinkadan qısqaq, sonlıqtan, jaqtılıqtıń dásteleri hár qıylı sandaǵı plastinkalar ("teksheler") arqalı ótedi. Plastinkalardıń qalırlıǵı t tolqın uzınlıǵınıń kishi bólimine teń dállikte birdey bolıwı kerek. Plastinkalardıń bir birine optikalıq kontaktta bolıwı, yaǵnıy olar bir biri menen hawanıń yamasa jelimlewshi zattıń sezilerliktey qatlamı bolmaǵan halda tiyisip turıwı kerek. Usınday teksheli pánjerege jaqtılıq normal baǵıtta túskende (bul eń ápiwayı bolǵan jaǵday) qońsılás dástelerdiń arasındaǵı júrisler ayırması $\Delta = (n - 1)t$ shamasına teń boladı, bul teńlikte n arqalı plastinkalar soǵılǵan shiysheńiń sındırıw kórsetkishi belgilengen. Ádette plastinkalardıń qalırlıǵı bolǵan t shamasınıń mánisi 1 sm dey boladı. Bul interferenciyanıń júdá úlken tártibi k ǵa alıp keledi. Haqıyqatında da, $t = 1$ sm, $n = 1,5$ hám $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$ sm bolǵan jaǵdayda bas maksimumlardıń orınların anıqlaytuǵın

$$\Delta = (n - 1)t = k\lambda$$

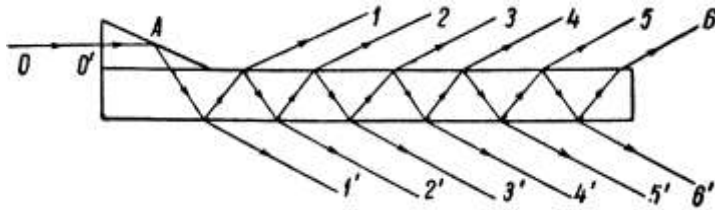
qatnasınan k ushın 10000 ǵa teń mánisti alamız. Solay etip, teksheli pánjere júdá joqarı tártiptegi spektrlerdi beredi. Usınıń saldarınan interferenciyanıwshı dástelerdiń salıstırmalı úlken bolmaǵan sanında úlken ajırata alıw kúshin alıwdıń múmkinshiligi tuwıladı. Ádette, teksheli pánjerelerdi bir neshe onlaǵan plastinkadan soǵadı (30-40).

Interferenciyanıń joqarı tártipleriniń basqasha nátiyjesi spektrlerdiń bir biriniń ústine túsiwinen azat bolǵan $\Delta\lambda$ uchastkasınıń kishi mánisi bolıp tabıladı. Haqıyqatında da, 270-paragraftaǵı (12)-formula boyınsha λ_1 tolqın uzınlıǵınıń bas maksimumınıń ústine

$$\lambda_2 = \frac{k}{k - 1} \lambda_1$$

tolqın uzınlıǵınıń $(k - 1)$ -maksimumı túsedi. Bunnan $\lambda_1 - \lambda_2 \cong -\lambda_1/k$ teńligin alamız. Demek, $k = 10000$ teńligi orınlanganda $|\Delta\lambda| = |\lambda_1 - \lambda_2|$ shamasınıń mánisi λ_1 tolqın uzınlıǵınıń barlıǵı bolıp 1/10 000 úlesin ǵana quraydı.

Spektroskopiyada tolqınlardıń uzınlıǵın *angstrem* (qısqaşa Å) dep atalatuǵın birliklerde ólshew qabil etilgen. Onıń shaması 10^{-8} sm ge teń. $k = 10000$ hám $\lambda_1 = 5000$ Å (spektrdiń jasıl bólegi) teńlikleri orın alǵanda $|\Delta\lambda| = 0,5$ Å shamasın alamız. $|\Delta\lambda|$ niń usınday kishi shaması teksheli pánjereniń járdeminde quramalı quramǵa iye bolǵan jaqtılıqtı izertlewge bolmaytuǵınlıǵı kelip shıǵadı: qanday da bir usıl menen (mısalı, prizmanıń járdeminde) barlıq spektrden aldın-ala tar uchastka ayırıp alınadı hám usı uchastka keyin teksheli pánjereniń járdeminde izertlenedi.



98-súwret.
Lyumer-Gerke plastinkası.

Teksheli pánjereniń ajırata alıwshılıq kúshin mınaday usıldıń járdeminde bahalawǵa boladı: qońsılas bas maksimumlardıń arasında $N - 1$ dana minimum jaylasatuǵın bolǵanlıqtan bas maksimum menen oǵan eń jaqın minimumnıń arasındaǵı múyeshlik qashılıq $\delta\varphi$ qońsılas bas maksimumlardıń arasındaǵı qashılıqtan N ese kishi boladı. Bunnan mınaday juwmaq kelip shıǵadı: bir birinen zorga ajralatuǵın sızıqlardıń arasındaǵı tolqın uzınlıqlarınıń ayırması bolǵan $\delta\lambda$ shaması tolqın uzınlıqlarınıń ayırması $|\Delta\lambda|$ shamasınan juwıq túrde N ese kishi:

$$\delta\lambda = \frac{|\Delta\lambda|}{N}.$$

30 tekshesi bar teksheli pánjere ushın $N = 30$. $|\Delta\lambda| = 0,5 \text{ \AA}$ teńligi orınlanganda biz tallǵan jaǵday ushın mınanı alamız:

$$\delta\lambda = \frac{0,5}{30} \text{ \AA} \approx 0,017 \text{ \AA}.$$

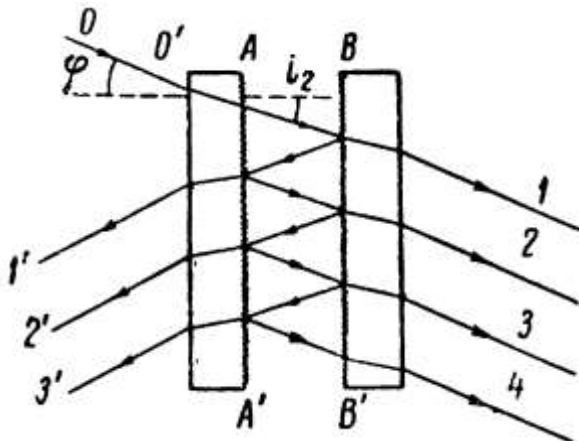
Kóp dástelerden interferenciya alıwdıń basqa usılı júdá joqarı sapalı móldir tegis-parallel plastinka bolıp tabılatuǵın Lyumer-Gerke plastinkası dep atalatuǵın plastinkanı paydalanıwdan ibarat. Plastinkanıń ushların birine úlken bolmaǵan tolıq ishki shaǵılısıw prizması A bekıtilgen (98-súwret). Jaqtılıqtıń OO' dástesi A prizmasına túsip, bunnan keyin plastinkada bir qatar shaǵılısıwǵa ushıraydı. Bul sınǵan nurlardıń eki 1, 2, 3, ... hám 1', 2', 3', ... nurlarınıń sistemasınıń payda bolıwına alıp keledi. Bul sistemaniń hár qaysısındaǵı dásteler kogerentli hám olar bir birinen turaqlı fazalar ayırmasına iye boladı. Eger bul dásteler sistemasınıń birin linza menen jıynasaq, onda onıń fokallıq tegisliginde 270-paragrafta táriyiplengen interferenciyalıq súwret payda boladı. Haqıyqatında 1, 2, 3, ... (yamasa 1', 2', 3', ...) dástelerindegi terbelislerdiń amplitudaları tolıq birdey emes: shaǵılısıwlardıń sanınıń úlkeyiwi menen amplitudalar kemeyedi. Biraq, onsha uzın bolmaǵan plastinka ushın amplitudanıń bunday kemeyiwin itibarǵa almawǵa boladı. Interferenciyalanıwshı dástelerdiń sanı N plastinkanıń ólshemlerinen, onıń sındırıw koefficientinen hám plastinkada nurlar shaǵılısatuǵın múyeshhtiń shamasınan ǵárezli; bul sannıń mánisi 15—20 ǵa jetiwi múmkin. Qońsılas dástelerdiń arasındaǵı júrisler ayırması Δ plastinkanıń qalırlıǵınan hám onıń sındırıw koefficientinen ǵárezli hám ádette júdá úlken bolǵan $20\,000\lambda$ hám onnan da úlken mániske iye bola aladı. Usıǵan baylanıslı Lyumer-Gerke plastinkasınıń járdeminde júdá joqarı tártipke iye bolǵan interferenciyalıq jolaqlar baqlanadı ($k \approx 20\,000$). Interferencyanıń usınday joqarı tártipleri hár qıylı tolqın uzınlıqlarına sáykes keletuǵın jolaqlardıń bir biriniń ústine túsiwine alıp keledi.

Sonlıqtan, tekshe tárizli pánjere bolǵan jaǵdaydaǵıday, Lyumer-Gerke plastinkasınıń járdeminde qanday da bir ásbaptıń járdeminde barlıq spektrden bólip alınǵan spektrdiń júdá tar bólimin ǵana izertlewge boladı.

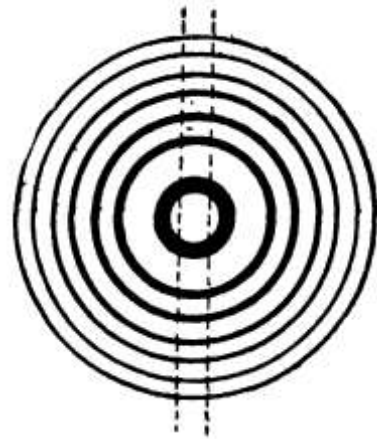
Lyumer-Gerke plastinkasınıń ajırata alıw kúshi bir neshe júzlegen mırǵa jetedi.

Házirgi waqıtları Lyumer-Gerke plastinkası siyrek paydalanıladı. Sebebi jetkilikli dárejedeǵi ólshemlerge iye plastinkalardı alıw ushın bahası qımbat bolǵan bir tekli shiysheniń úlken bólegi kerek boladı. Sonlıqtan kóp sanlı dástelerdiń interferenciyanı alıwdıń basqa usılı bolǵan *Fabri hám Pero interferometrleri* yamasa *etalonları* ádewir keńnen tarqalǵan.

Fabri hám Pero etalonı eki plastinkadan turadı, olardıń AA' hám BB' betleri hawanıń tegis-parallel qatlamın sheklep turadı (99-súwret). Bul AA' hám BB' betleri metaldıń yarımday ótkeretuǵın móldir plenkaları menen jabılǵan. Etalonǵa túsetuǵın jaqtılıqtıń OO' dástesi AA' hám BB' betlerinde kór ret shaǵılısadı hám ótken 1, 2, 3, ... nurlarınıń sisteması menen hám keri shaǵılısqan 1', 2', 3' ... nurlarınıń sistemasın payda etedi. Hár bir sistemadaǵı nurlardıń dásteleri kogerentli hám bir birinen turaqlı Δ júrisler ayırmasına iye. Bunnan bılay biz tek ótken 1, 2, 3, ... nurlardı ǵana qaraymız.



99-súwret. Fabri hám Pero etalonınıń sxeması.



100-súwret. Fabri hám Pero etalonı beretuǵın interferenciyalıq saqıynalardıń kórinisi.

Δ júrisler ayırmasınıń qatarń túrde turaqlı bolıp qalıwı ushın bir birine qaraǵan AA' hám BB' betleri tolqın uzınlıǵınıń kishi bólimine shekemgi dálikte tegis hám tap usınday dálikte bir birine parallel bolıwı kerek. Etalonnıń plastinkalarınń eki basqa betlerin de tegis etip soǵadı, Biraq olardıń birinshi interferenciyalıq jolaqlar sistemasınıń ústine túsetuǵın ekinshi interferenciyalıq jolaqlardıń sistemasın payda etpewi ushın bir birine salıstırǵanda úlken bolmaǵan múyeshke burılǵan bolıwı kerek. Etalonnıń plastinkaların bir birine salıstırǵanda belgili bolǵan t qashıqlıǵında jaylastırıw ushın olardı ádette eki tárepten balqıtılǵan kvarctan yamasa invardan soǵılǵan saqıynaǵa qısıp jaylastıradı. Bul materiallardı olardıń kishi jıllılıq keńeyiw koefficientine iye bolıwına baylanıslı saylap aladı. Plastinkalardıń arasındǵı qashıqlıq t nı úziksiz túrde ózgeriw múmkinshiligi payda etilgen ásbaplar da soǵıladı (bunday jaǵdayda Fabri hám Pero interferometrleri dep atalatuǵın). Onıń ushın plastinkalardıń birin qozǵalmaytuǵın etip bekitedi, al ekinshisin vinttiń járdeminde arnawlı túrde soǵılǵan dúziliste jıljitadı.

Fabri hám Pero etalonı teńdey qıyılıqlar iymekliklerin payda etedi (262-paragraf). Kóp sanlı dásteler interferenciyalanatuǵın bolǵanlıqtan, monoxromat jaqtılıqta qarańǵı aralıqlar menen ayırılǵan ensiz jaqtılı saqıynalar payda boladı (100-súwret). Qanshama kóp sanlı dásteler interferenciyalanatuǵın bolsa bul saqıynalardıń súwreti keskin boladı.

Etalonı payda bolatuǵın qońsılás dástelerdiń arasındǵı júrisler ayırması $\Delta = 2t \cos i_2$ ge teń (262-paragraftaǵı esaplawdı qarańız, bul jaǵdayda plastinkalardıń arasındǵı hawanıń sıındırıw koefficienti 1 ge teń). Bul teńlikte i_2 arqalı nurlardıń etalonnıń aynalıq plenkalarına túsiw múyeshi belgilengen. Etalonnıń plastinkaları tegis-parallelikke jaqın bolǵanlıqtan, i_2 múyeshiniń mánisi etalonǵa túsiw múyeshine jaqın (99-súwret). Usı múyeshi biz φ arqalı belgileybiz.

Bunday jaǵdayda bas maksimumlardıń payda bolıw shárti mınaday túrge enedi:

$$2t \cos \varphi = k\lambda. \quad (1)$$

Bul teńlikte k - pútin san.

Maksimumlardıń tártibi k nı juwıq túrde $\cos \varphi \cong 1$ dep esaplap, (1)-teńlikten anıqlaymız. Bunday jaǵdayda mınanı alamız:

$$k = \frac{2t}{\lambda}. \quad (2)$$

Bunnan, etalon bolǵan jaǵdayda da, teksheli pánjere hám Lyumer-Gerke plastinkası bolǵan jaǵdaydaǵıday júdá joqarǵı tártipli maksimumlar menen jumıs alıp baratuǵınımız kelip shıǵadı. Etalonnıń qalınlıǵı $t = 0,5$ sm hám $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$ sm bolǵanda mınaǵan iye bolamız

$$k = \frac{2 \cdot 0,5}{5 \cdot 10^{-5}} = 20\,000.$$

λ_1 tolqın uzınlıǵı menen k -tártipli saqıynanıń ústine λ_2 tolqın uzınlıǵı menen $(k-1)$ -tártipli saqıyna túsedı. 270-paragraftaǵı (12)-formulanı paydalanıp, saqıynalardıń tap usınday bir biriniń ústine túsiwi

$$k\lambda_1 = (k-1)\lambda_2$$

shárti orınlanǵanda júzege keletuǵınlıǵın alamız. Bunnan tolqın uzınlıqlarınıń ayırması $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$ ushın

$$\Delta\lambda = -\frac{\lambda_2}{k}$$

teńligin alamız. Bul teńlikke k nıń (2)-formula boyınsha anıqlanğan mánisin qoyıp hám λ shamasınıń indeksin qaldırıp, mınanı alamız:

$$\Delta\lambda = -\frac{\lambda^2}{2t}. \quad (3)$$

$\Delta\lambda$ shaması bir tolqın uzınlıǵınıń saqıynalar sistemasın ekinshi tolqın uzınlıǵınıń saqıynalar sisteması tolıq basatuǵın tolqın uzınlıqlarınıń ayırması bolıp tabıladı. Bul $\Delta\lambda$ shaması etalonnıń "turaqlısı" dep ataladı. $\Delta\lambda$ "turaqlısı" sheklerinde saqıynalar ele bir biriniń ústine túspeytuǵın tolqın uzınlıǵınıń intervalın anıqlaydı. (3)-formuladan kórinip turǵanıday, "turaqlı" etalonnıń qalınlıǵı t dan ǵárezli boladı: etalon qanshama qalıń bolsa, onıń ushın turaqlılınıń mánisi de kishi boladı. Etalonnıń qalınlıǵı $t = 0,5$ sm bolǵanda $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$ sm tolqın uzınlıǵı ushın mınanı alamız:

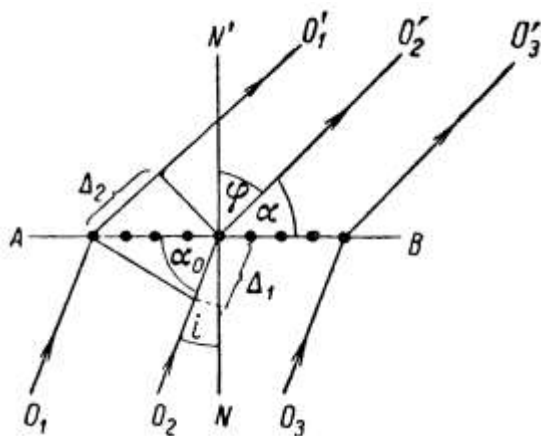
$$\Delta\lambda = -\frac{\lambda^2}{2t} = -\frac{(5 \cdot 10^{-5})^2}{2 \cdot 0,5} = -2,5 \cdot 10^{-9} \text{ sm}.$$

Demek, biz tallanğan jaǵdayda etalonnıń turaqlısı $\Delta\lambda = 0,25 \text{ \AA}$ shamasına teń eken. Sonlıqtan, hár qıylı tártiptegi saqıynalardıń bir biriniń ústine túspewi ushın etalonnıń járdeminde spektrdiń tek usınday tar uchastkasınıń izertleniwi múmkin.

Etalon ayırım spektrallıq sızıqlardıń strukturasını izertlew ushın qollanıladı. Spektrdegi sızıq qanday da bir spektrallıq ásbaptıń, mısalı, prizmalıq spektrograftıń, járdeminde bólip alınadı. Etalon usı sızıqtıń jaqtısı menen jaqtılandırıladı. Meyli, mısalı, Fabri hám Pero etalonına tolqın uzınlıqları λ_1 menen λ_2 júdá jaqın bolǵan jaqtılıq túsetuǵın bolsın. Usı tolqın uzınlıqlarınıń hár birine sáykes keletuǵın jaqtılıq óziniń saqıynalar sistemasın beredi. Olardıń múyeshlik ólshemleri bir birinen bazı bir shamaǵa ózgeshe boladı. Nátiyjede saqıynalardıń barlıǵı qos saqıynalar túrine iye boladı.

§ 273. Kóp ólshemli pánjeredegi difrakciya. 270-paragrafta biz parallel sańlaqlardıń qatarınan turatuǵın difrakciyalıq pánjereni qaradıq. Sańlaqlardıń hár qaysısın hár qıylı φ múyeshlerinde tarqalatuǵın terbelislerdiń deregi xızmetin atqardı. Biraq, sańlaqlardıń ornına basqa formaǵa iye bolǵan tesiklerdi, mısalı, bir birinen birday qashıqlıqlarda jaylasqan kishkene dóńgelek tesiklerdi paydalanıwǵa boladı. Olardan shıqqan jaqtılıqtıń dásteleri bir biri menen interferenciyanıp, belgili bolǵan iymekliklerdiń boyında jatatuǵın maksimumlardıń sistemasın payda etedi. Sonıń menen birge tesiklerdi shashıratıwshı oraylardıń qatarı menen, mısalı, kishi sharlardıń qatarı menen almasıwǵa boladı. Usınday shashıratıwshı oraylardıń járdeminde tek tegis eki ólshemli pánjereni júzege keltirip ǵana qoymay, shariklerdi parallel betlerde jaylastırıp keńisliklik pánjereni de payda etiwge boladı.

Dáslep, birdey shashıratıwshı oraylardıń qatarınan payda etilgen ápiwayı sızıqlı pánjereni qaraymız. Shashıratıwshı oraylar AB tuwrısınıń boyında bir birinen b qashıqlıǵında jaylasqan (101-súwret). Meyli, pánjerege súwret tegisliginde jatqan hám pánjerege túsirilgen NN' normal menen i múyeshin jasaytuǵın $O_1, O_2, O_3, \dots$ kogerentli nurlardıń qatarı túsetuǵın bolsın. Túsiwshi tolqınınıń tásirinde shashıratıwshı oraylar sferalıq tolqınlardıń dereklerine aylanadı. Oraylar tárepinen shashıratılǵan barlıq nurlardıń ishinen sızılma tegisliginde jatatuǵın hám NN' normalı menen φ múyeshin jasaytuǵın $O'_1, O'_2, O'_3, \dots$ nurların ayırıp alamız.



101-súwret.
Sızıqlı pánjeredegi difrakciya.

101-súwrette kórinip turǵanıday, bul nurlardıń ishindegi qońsılas nurlardıń arasındaǵı júrisler ayırması Δ

$$\Delta = \Delta_2 - \Delta_1 = b \sin \varphi - b \sin i$$

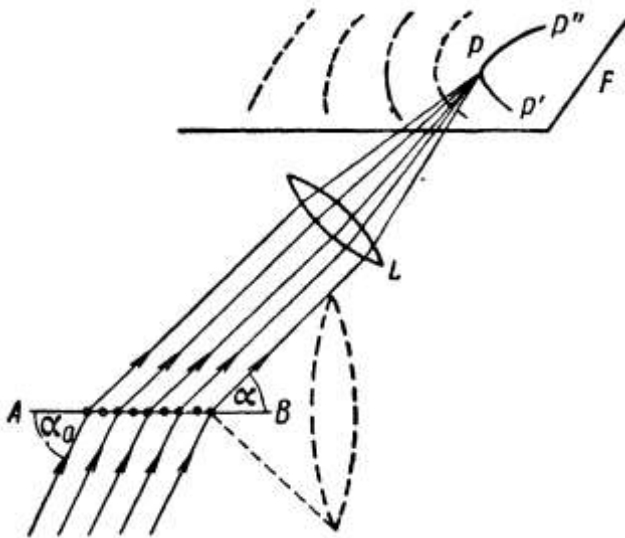
shamasına teń. Endi qarap shıǵıwımız ushan i hám φ múyeshleriniń ornına shashıratıwshı oraylar jaylasqan AB tuwrısı menen nurlardıń arasındaǵı α_0 hám α múyeshlerin kirgizemiz. Bunday jaǵdayda sońǵı teńlik mınaday túrge enedi:

$$\Delta = b(\cos \alpha - \cos \alpha_0). \quad (1)$$

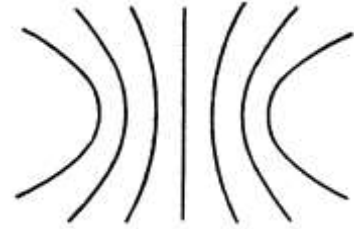
Eger $O'_1, O'_2, O'_3, \dots$ nurların linzaniń járdeminde jıynasaq, onda onıń fokallıq tegisliginde olar interferenciyalanadı hám Δ júrisler ayırması pútın san eselengen tolqın uzınlıǵı λ ge teń bolǵan jaǵdayda bas maksimumlardı beredi:

$$\Delta = b(\cos \alpha - \cos \alpha_0) = k\lambda. \quad (2)$$

α múyeshiniń turaqlı mánisine kósheri AB tuwrısınıń dawamı bolǵan hám tóbesindegi múyesh α ge teń bolǵan konustıń jasawshısınıń boyında jaylasqan nurlar sáykes keledi (102-súwret). Konustıń jasawshılarınıń birewine parallel (mısalı, sızılma tegisliginde jatırǵan jasawshıǵa) biziń sızıqlı pánjeremizdiń barlıq oraylarında shashıraǵan nurlardı ayırıp alamız. Bul nurlar (2)-teńlik orınlanǵanda L linzaniń F fokallıq tegisliginde bir birin kúsheytedi hám P jaqtılı daǵın beredi. Konustıń basqa jasawshısına parallel bolǵan nurlar fokallıq tegislikte óziniń jaqtılı daqların beredi. Olar jıynalıp $P'PP''$ jaqtılı jolaǵınıń payda bolıwına alıp keledi. Birdey tolqın uzınlıǵına (2)-formuladaǵı k nıń hár qıylı mánislerine α múyeshiniń hár qıylı mánisleri hám soǵan sáykes tóbesindegi múyeshlerdiń shaması hár qıylı bolǵan konuslar sáykes keledi. Nátiyjede, linzaniń fokallıq tegisliginde 102-súwrette punktir menen súwretlengen jolaqlardıń sisteması payda boladı. Eger linza AB tegisligine parallel tegislikte jatatuǵın bolsa, onda $P'PP''$ jolaǵı giperbola bolıp tabıladı. $\alpha_0 = \frac{\pi}{2}$ múyeshinde hám $\alpha = \frac{\pi}{2}$ teńligi orınlanǵan jaǵday ushın nollik tártiptegi jolaq sáykes keledi ($k = 0$), ol linzaniń fokallıq tegisliginde tuwrı túrine iye boladı. Onıń oń hám shep táreplerinde $k = \pm 1, \pm 2, \dots$ mánislerine sáykes keletuǵın giperbolalar jaylasadı (103-súwret). Oraylardıń sanı úlken bolǵanda interferenciyalanuǵın dástelerdiń sanı úlken boladı hám jolaqlar keskin túrge enedi.



102-сúwret. Сızıqlı пánjeredeги дифракциядағы жақтılı P'PP'' сızıqlарınıń payda болıwı.



103-сúwret. Сızıqlı пánjeredeги дифракцияда payda болатуғын гиперболалар.

Endi eki ólshemli kvadrat пánjereniń túyinlerinde jaylasqan bir qatar shashıratıwshı oraylardı qaraymız. OX hám OY kósherlerin пánjereniń jasawshılarına parallel etip júrgizemiz (104-сúwret). Bunday *eki ólshemli пánjereni* OX hám OY kósherlerine parallel болған сızıqlı пánjerelerdiń eki sistemasınıń qosılıwı dep qarawğa boladı. Meyli, eki ólshemli пánjerege OX hám OY kósherleri menen α_0 hám β_0 múyeshlerin jasaytuғын nurlardıń parallel dástesi túsetuғыn bolsın. Bunday jaғdayda oraylarda shashıraған толқınlar линзаниń fokallıq tegisliginde α hám β múyeshleriniń ekewi de (2)-shártti qanaatlандıratuғын baғıtlarda maksimumlardı beredi:

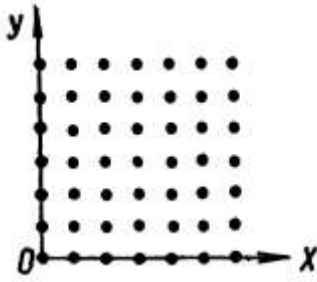
$$\begin{aligned} b(\cos \alpha - \cos \alpha_0) &= k_1 \lambda, \\ b(\cos \beta - \cos \beta_0) &= k_2 \lambda. \end{aligned} \quad (3)$$

Bul teńliklerde k_1 menen k_2 ler pútin sanlar. XOY tegisligine parallel болған линзаниń fokallıq tegisliginde (3)-teńliklerdiń hár birine гиперболалardıń óziniń sisteması sáykes keledi (105-сúwretke qaraңыз, bul сúwrette $\alpha_0 = \beta_0 = \pi/2$ болған jaғday ushın гиперболалар keltirilgen). (3)-shárttiń ekewi de eki sistemasınıń гиперболаларı kesilisetuғын noqatlarda orınlanadı. Solay etip, eki ólshemli пánjere menen monoxromat nurlanıw болған jaғdayda maksimumlar ayırım jaқтılı daqlar túrine iye boladı. Eki ólshemli пánjereni aq jaқтılıq penen jaқtılandırғанда hár qıylı λ толқын uzınlıqlarına (k_1 menen k_2 lerdiń berilgen mánislerinde) (3)-teńlik boyınsha α hám β múyeshleriniń hár qıylı mánisleri sáykes keledi. Nátiyjede hár bir daq spektrge jayıladı. k_1 menen k_2 pútin sanlarınıń hár qıylı mánisleri hár qıylı tártiptegi spektrler sáykes keledi.

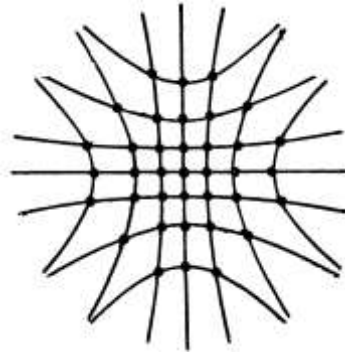
Eń aqırında eń ápiwayı болған jaғdayda kublıq пánjereniń túyinlerinde jaylasqan shashıratıwshı oraylardıń sisteması tárepinen payda etilgen *keńisliklik пánjereni* qaraymız. Bunday пánjereni OX , OY hám OZ kósherlerine parallel болған сızıqlı пánjerelerdiń úsh sistemasına bóliwge boladı. Terbelislerdiń maksimumları

$$\left. \begin{aligned} b(\cos \alpha - \cos \alpha_0) &= k_1 \lambda, \\ b(\cos \beta - \cos \beta_0) &= k_2 \lambda, \\ b(\cos \gamma - \cos \gamma_0) &= k_3 \lambda \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

shártlerin qanaatlандırnatuғын α , β hám γ múyeshleriniń járdeminde anıqlanatuғын baғıtlarda payda boladı. Bul teńliklerde k_1 , k_2 hám k_3 ler pútin sanlar, α_0 , β_0 hám γ_0 múyeshleri túsiwshi толқınnıń baғıtların táriyipleydi.



104-súwret. Eki ólshemli pánjere.



105-súwret. Eki ólshemli pánjeredegi difrakciyada alınatúgín giperbolalardıń sisteması.

Qanday da bir bağıt penen tuwrı múyeshli koordinatalar sistemasınıń kósherleriniń arasıdağı múyeshlerdiń bir biri menen belgili bolğan qatnaslardıń járdeminde baylanısqa ekenligi belgili. Atap aytqanda, olardıń kosinuslarınıń kvadratlarınıń qosındısı 1 ge teń. Demek, (4)-shártlerden basqa mınaday geometriyalıq shártlerdiń de orınlanıwı kerek:

$$\left. \begin{aligned} \cos^2 \alpha_0 + \cos^2 \beta_0 + \cos^2 \gamma_0 &= 1, \\ \cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma &= 1. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

(4)-menen (5)-shártlerdi tolqın uzınlıgı λ niń qálegen mánisi qanaatlandırmaydı. Biraq, λ nıń belgili bolğan mánislerine (4)- hám (5)-shártler bir waqıtta qanaatlandıradı. Bunnan keńisliklik pánjerege kogerentli monoxromat nurlar túskende maksimumlar qálegen tolqın uzınlıgı ushın emes, al belgili bolğan tolqın uzınlıqlarında payda boladı. Bunday tolqın uzınlıqlarınıń mánisin ańsat tabıwǵa boladı. (4)-teńlikti mına túrde kóshirip jazamız:

$$\left. \begin{aligned} \cos \alpha &= \cos \alpha_0 + k_1 \frac{\lambda}{b}, \\ \cos \beta &= \cos \beta_0 + k_2 \frac{\lambda}{b}, \\ \cos \gamma &= \cos \gamma_0 + k_3 \frac{\lambda}{b}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

(6)-teńlikti kvadratqa kóterip, olardı aǵzama-aǵza qosıp hám (5)-teńlikti inabatqa alıp,

$$1 = 1 + 2 \frac{\lambda}{b} (k_1 \cos \alpha_0 + k_2 \cos \beta_0 + k_3 \cos \gamma_0) + \frac{\lambda^2}{b^2} (k_1^2 + k_2^2 + k_3^2)$$

teńligin tabamız. Bunnan biz izlep atırǵan tolqın uzınlıgı λ ushın mınaday ańlatpanı alamız:

$$\lambda = -2b \frac{k_1 \cos \alpha_0 + k_2 \cos \beta_0 + k_3 \cos \gamma_0}{k_1^2 + k_2^2 + k_3^2}. \quad (7)$$

túsiwshi tolqınıń berilgen bağıtında (α_0, β_0 hám γ_0 shamaları berilgen) interferenciyanıń hár bir berilgen tártibi k_1, k_2 hám k_3 ushın tolqın uzınlıgı λ niń tek bir mánisi tabıladı. Onıń ushın keńisliklik pánjere maksimumdı beredi. Bul maksimum payda bolatuǵın bağıt (6)-shártlerden zárúrli bolğan α, β, γ múyeshleriniń mánisleri boyınsha ańıqlanadı.

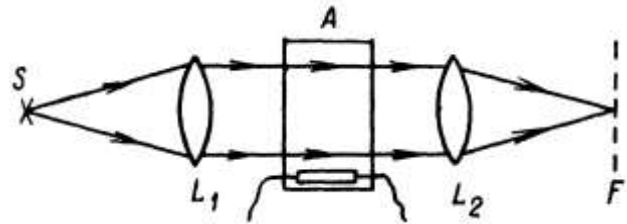
Ulıwma aytqanda, berilgen α_0, β_0 hám γ_0 múyeshlerinde hár qıylı bolğan k_1, k_2 hám k_3 sanlarına (7)-teńlik boyınsha tolqın uzınlıgı λ niń hár qıylı mánisleri sáykes keledi, yaǵnıy, berilgen tolqın uzınlıgı λ maksimumdı beretuǵın bolsa, onda usı tolqın uzınlıgı bir belgili bolğan bağıtta tek bir maksimumdı beredi. Biraq, dara jaǵdaylarda bir λ tolqın uzınlıgına hár qıylı tártiplerdegi k_1, k_2 hám k_3 maksimumları sáykes keledi. SHında da, meyli, parallel nurlardıń dástesi kublıq keńisliklik pánjereniń qaptal betine normal bağıtta kelip túsetuǵın bolsın. Bunday jaǵdayda α_0, β_0 hám γ_0 múyeshleriniń birewi nolge, al qalǵan ekewi $\pi/2$ ge teń. $\alpha_0 = 0$ hám $\beta_0 = \gamma_0 = \pi/2$ teńlikleri orınlanadı dep boljayıq; bunday jaǵdayda (7)-teńlik mınaday túrge enedi:

$$\lambda = -2b \frac{k_1}{k_1^2 + k_2^2 + k_3^2}.$$

Eger bul teńlik k_1 , k_2 hám k_3 shamalarınń belgili bolǵan mánislerinde orınlanatuǵın bolsa, onda k_1 , k_2 , $-k_3$; k_1 , $-k_2$, k_3 hám $-k_1$, k_2 , k_3 mánislerinde de, yaǵnıy k_i shamalarınń tórt kombinaciyasında orınlanadı. Bunday jaǵdayda tolqın uzınlıǵı λ bolǵan nurlar hár qıylı bolǵan tórt baǵıtta maksimumlardı beredi.

106-súwret.

Turǵın ultrases tolqınlarındadı jaqtılıqtıń difrakciyasın baqlaw boyınsha ótkeriletuǵın tájiriýbeniń sxeması.



(7)-teńlikti dál qanaatlandıratuǵın tolqın uzınlıǵı λ nı saylap alıw, kórinip turǵanıday, dım qıyın. Sonlıqtan úsh ólsheмли pánjeredegi difrakciyanı baqlaw ushın ádette aq jaqtılıqtı paydalanadı. Aq jaqtılıqtı múmkin bolǵan barlıq tolqın uzınlıqları qatnasadı, hám soǵan sáykes olardıń ishinde k_1 , k_2 hám k_3 shamalarınń hár qıylı mánislerinde (7)-teńlikti qanaatlandıratuǵın λ_i tolqın uzınlıqları barlıq waqıtta tabıladı. Usınday hár bir λ_i tolqın uzınlıǵına (6)-teńlik boyınsha óziniń α_i , β_i hám γ_i múyeshleri, yaǵnıy maksimum payda bolatuǵın baǵıt sáykes keledi. Ulıwma aytqanda, linzaniń fokallıq tegisliginde simmetriyalı túrde jaylasqan jaqtılı noqatlardı kóremiz hám olardıń hár qaysısı óziniń tolqın uzınlıǵı λ_i ge sáykes keledi.

Sızıqlı pánjereniń maksimumlardı bere alıwı ushın $\lambda < 2b$ teńsizliginiń orınlanıwı kerek. Sebebi, bunday bolmaǵan jaǵdayda α_0 hám α nıń hesh bir mánisinde (2)-teńlemenin qanaatlandırılıwı múmkin emes. Tap usınday shárttiń eki ólsheмли hám keńisliklik pánjere ushın da orınlanıwı kerek. Ekinshi tárepten, eger pánjereniń turaqlısı b tolqın uzınlıǵınan kóp úlken bolsa, onda júdá joqarı tártipli k_i maksimumlar ǵana payda boladı, al bul jaǵday olardı baqlawdı qıyınlastıradı. Bunnan, keńisliklik pánjereniń turaqlısı b nıń mánisi bir neshe tolqın uzınlıǵına teń bolsa, onda usınday keńisliklik pánjeredegi difrakciyanı baqlaw ámeliy jaqtan múmkin bolmay qalatuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Kózge kórinetuǵın jaqtılıq ushın usınday pánjereni bir birinen ajratılǵan qanday da bir shashıratuǵın bólekshelerdi jaylastırıw jolı menen jasalma túrde soǵıw oǵada qıyın. Durıs keńisliklik pánjeredegi jaǵdayǵa bazı bir dárejede usaǵan sharayatlar dumanda júzege keledi. Duman ayırım mayda tamshılardan turadı. Bul tamshılar tártipsiz jaylasqan bolsa da, olardıń aralarındadı qashıqlıqlardıń shaması bir birinen kúshli ayırmaǵa iye emes. Usınıń saldarınan Quyashtıń yamasa Aydıń jaqtılıǵı júdá qalıń duman arqalı ótkende jaqtırtqıshtıń átirapında difrakciyalıq dóńgelekler payda boladı. Dóńgelektiń sırtqı sheti qızıl reńge, al ishki sheti fiolet reńge iye. Fiolet reńge iye bolǵan shet qısqaaraq tolqınlar ushın difrakciyanıń kishi múyeshine sáykes keledi.

Durıs keńisliklik pánjerege sáykes keletuǵın sharayattı jasalma túrde qanday da bir móldir suyıq yamasa qattı denede turǵın ultrases tolqınların payda etiw jolı menen júzege keltiriwge boladı. Turǵın boylıq tolqınınıń túyinlerinde zattıń tıǵızlıǵınıń maksimumı payda boladı (I tomadı 110-paragraftı qarańız) hám olar jaqtılıqtı shashıratadı. Ultrases tolqınınıń túyinleriniń arasındadı qashıqlıq 10^{-4} sm shamasında boladı, yaǵnıy jaqtılıqtıń tolqın uzınlıǵınıń shaması menen barabar. Eger, misalı, ishinde suyıqlıq bar ıdista bir birine perpendikulyar baǵıtta tarqalatuǵın úsh baǵıtta ultrases tolqınların qozdırsa, onda olar ıdistiń diywallarında shaǵılısıp turǵın tolqınlardıń sistemasın beredi. Bul tolqınlar sistemasınıń túyinleri durıs keńisliklik pánjere túrinde jaylasadı. Jaqtılıqtıń usınday pánjeredegi shashırawında joqarıda táriyiplengen difrakciyalıq súwret payda boladı. Turǵın ultrases tolqınlarındadı difrakciyanı baqlaw sxeması 106-súwrette keltirilgen. Bul súwrette S - jaqtılıqtıń deregi, L_1 - jaqtılıqtıń parallel dástesin beretuǵın linza, A - ıdıs. Bul ıdistiń ishinde pezoqvarc plastinkasınıń járdeminde (I tomadı 118-paragraf) ultrases terbelisleri qozdırıladı. Difrakciyaǵa ushıraǵan nurlar L_2 linzaniń járdeminde jıynaladı hám onıń bas fokallıq

tegisliginde maksimumlardı beredi. Turgın tolqınlardaǵı difrakciyanı hár qıylı zatlardaǵı ultrases tolqınlarınıń tezligin anıqlaw ushın paydalanadı. Jaqtılıq tolqınınıń uzınlıǵın bilip, difrakciyalıq maksimumlardıń orınları boyınsha pánjereniń turaqlısı b nı, yaǵnıy berilgen zattaǵı ultrases terbelisleriniń tolqın uzınlıǵın tabıwǵa boladı. Bunnan terbelisler jıyılıǵınıń belgili mánisi boyınsha olardıń tarqalıw tezligin tabadı.

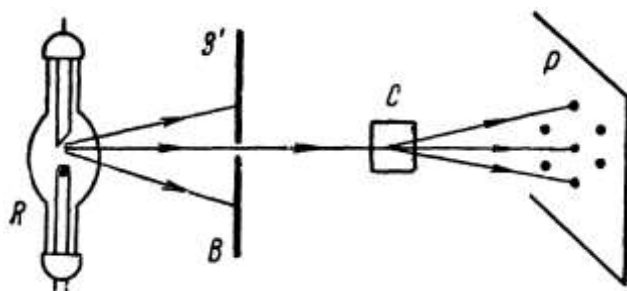
Keńisliklik pánjeredegi difrakciyanıń basqa áhmiyetli túri 274-paragrafta qaralatuǵın rentgen nurlarınıń kristallardaǵı difrakciyası bolıp tabıladı.

§ 274. Rentgen nurlarınıń spektroskopiyası hám rentgenstrukturalıq analiz. Rentgen nurları kózge kórinetuǵın nurlarday tolqınlıq tábiyatqa iye hám tutas hám sıziqlı spektrlerdi beredi (352-paragraf). Rentgen nurlarınıń tolqınlıq tábiyatı birinshi ret 1912-jılı tikkeley tastıyıqlandı. Usı waqıtta Laue difrakciyalıq pánjere sıpatında kristallardıń tábiyiy keńisliklik pánjeresin paydalanıp rentgen nurlarınıń difrakciyasın baqlaw múmkin degen ideyanı usındı (I tom, 87-paragraf). Rentgen nurları ushın difrakciyalıq qubılıslardı kristallardı paydalanbay baqlaw tek 1930-jılı sovet fizigi V.P.Linnik tárepinen ámelge asırıldı. Óziniń jumıslarınıń birinde V.P.Linnik kózge kórinetuǵın nurlar ushın orınlangan Lloydtıń tájiriyesindey tájiriyebeıni ámelge asırdı (261-paragraf). Rentgen nurları ushın qattı denelerdiń sıdıırıw koefficienti birden biraz kishi hám túsiw múyeshiniń shaması júdá kishi bolǵanda olar hawa-qattı deneniń shegarasında tolıq ishki shaǵılısıwǵa ushıraydı. Rentgen nurlarınıń júdá jıńışke dástesi shıyshe plastinka arqalı tuwrı ótken hám onıń bir bólegi tolıq ishki shaǵılısıwǵa ushıraǵan

Dásteler (tuwrı ótken hám shaǵılısqan) bir biriniń ústine túsip, bir qatar interferenciyalıq jolaqlardı payda etken hám olardıń fotosúwreti túsilgen. Interferenciyalıq jolaqlardıń arasındaǵı qashılıq shama menen $1,5 \text{ \AA}$ ge sáykes kelgen (rentgen nurlarınıń deregi xızmetin mis antikatodi atqarǵan).

Kristallardaǵı rentgen nurlarınıń difrakciyasın baqlawdıń múmkinshiligi rentgen nurlarınıń tolqın uzınlıǵı menen kristallıq pánjereniń turaqlısınıń shamalarınń birdey tártipte ekenligine tiykarlangan ($\sim 10^{-8} \text{ sm}$). Solay etip, rentgen nurları kristallar arqalı ótkende biz 273-paragrafta tallǵan kóp ólshemli pánjeredeli difrakciya júzege keledi. Rentgen nurlarınıń difrakciyası boyınsha Laue tájiriyesiniń sxeması 107-súwrette kórsetilgen. Bul súwrette R — rentgen trubksı, BB' - rentgen nurlarınıń dástesin ótkeretuǵın tesigi bar qalıń qorǵasın ekran. Bul ekran arqalı ótken rentgen nurları C kristallına kelip túsedı. Rentgen nurları ushın linzalardı soǵıwdıń múmkinshiligi joq, sebebi onıń qattı denelerdegi sıırıw koefficientiniń shaması 1 ge júdá jaqın. Difrakciyalıq maksimumlar dástelerdiń jıńışke bolıwınıń saldarınan linzalarsız baqlanadı. Bul jıńışke dásteler P fotoplastinkası menen kesilisip, onda ayırım maksimumlardı beredi.

Keyinirek biz qattı denelerdi tez qozǵalatuǵın elektronlar menen bombalaǵanda shıǵatuǵın rentgen nurlarınıń (352-paragraf) spektrallıq quramı boyınsha bir tekli emes ekenligin kóremiz: olar hár qıylı uzınlıqtaǵı tolqınlarǵa iye. Usıǵan sáykes, P fotoplastinkasında 273-paragraftaǵı (4)- hám (5)-shártlerdi qanaatlandıratuǵın baǵıtlarda hár qıylı tolqın uzınlıqları ushın bir qatar qarańǵı (negativte) daqlar payda boladı. Baqlanatuǵın difrakciyalıq súwretti eki maqset ushın paydalanıwǵa boladı: 1) eger rentgen nurlarınıń tolqın uzınlıǵı belgili bolsa kristallıq pánjereniń tipi menen turaqlısın anıqlaw anıqlaw; 2) eger kristallıq pánjereniń tipi menen b turaqlısı belgili bolsa rentgen nurlarınıń tolqın uzınlıǵın anıqlaw ushın.



107-súwret.
Rentgen nurlarınıń difrakciyası boyınsha
tájiriyeńiń sxeması.

Bul múmkinshiliklerdiń birinshisi qattı denelerdiń tábiyatı haqqındaǵı biziń kóz-qaraslarımızdıń rawajlanıwında úlken orındı iyeledi. Kristallardaǵı rentgen nurlarınıń difrakciyasınıń tiykarında birinshi ret kristallardaǵı bólekshelerdiń keńisliklik pánjereniń túyinleri boyınsha jaylasıwı haqqındaǵı gipotezaniń durıs ekenligi isenimli túrde dálillendi.

Ekinshi múmkinshilik rentgen nurlarınıń tolqın uzınlıǵın dál anıqlaw ushın paydalanıldı. I tomnıń 87-paragrafında kórip ótkenimizdey, tas duzı ($NaCl$) ápiwayı kublıq pánjerege iye. Bul pánjereniń turaqlısı b (yaǵnıy qońsılas ionlardıń arasındaǵı qashıqlıq) tas duzınıń molekualıq salmaǵı M , onıń tıǵızlıǵı ρ hám Avagadro sanı N arqalı

$$b = \sqrt[3]{\frac{M}{2N\rho}} \quad (1)$$

formulasınıń járdeminde anıqlanadı. M niń, N niń hám ρ nıń belgili bolǵan mánisleri boyınsha $NaCl$ kristalları ushın

$$b = 2,804 \text{ \AA}$$

shaması alınadı.

Tas duzı rentgen nurları ushın difrakciyalıq maksimumlardı beretuǵın múyeshlerdi ólshep hám b niń joqarıda keltirilgen mánisin paydalanıp, tolqın uzınlıǵı λ ni tabıwǵa boladı. Mısalı, mıstırnıń K_α nurı ushın $\lambda = 1,537 \text{ \AA}$ shaması alınadı. Eń qısqa tolqınlı rentgen nurları ushın tolqın uzınlıǵı shama menen $0,1 \text{ \AA}$ di quraydı. Kristallardaǵı difrakciyanıń járdeminde ólsheñiwı múmkin bolǵan eń uzın tolqın uzınlıǵı juwıq túrde $20 \text{ \AA}$ ge teń. Usınday tolqın uzınlıqların ólshew ushın úlken b turaqlısına iye bolǵan quramalı organikalıq zatlardıń kristalların paydalanıwǵa tuwrı keledi.

(1)-formuladan pánjereniń turaqlısı b nı esaplaw ushın Avogadro sanı N di biliw kerek ekenligi kórinip tur. Solay etip, rentgen nurlarınıń tolqın uzınlıǵın ólshew ushın Avogadro sanınıń mánisin biliw kerek. Álbette, keri baǵıtta da júriwge hám rentgen nurlarınıń tolqın uzınlıǵı boyınsha Avogadro sanınıń mánisin ólshewge boladı. Onıń ushın tolqın uzınlıǵınıń mánisin kristallardaǵı difrakciya menen baylanıslı bolmaǵan usıldıń járdeminde anıqlawǵa tuwrı keledi. Bunday ólshewdi rentgen nurlarınıń interferenciyası boyınsha ótkerilgen tájiriyelerde, mısalı V.P.Linniktiń tájiriyesinde ámelge asırıwǵa boladı. Házirgi waqıtları ádettegidey shaǵılastırıwshı difrakciyalıq pánjerede rentgen nurlarınıń spektrin ala aladı. Rentgen nurlarınıń jıńışke dástesi shaǵılastıratuǵın difrakciyalıq pánjerege onıń beti menen júdá kishi múyesh jasaytuǵınday etip túsiriledi. Bunday jaǵdayda rentgen nurları hawa-metall shegarasında tolıq ishki shaǵılısıwǵa ushıraydı. Difrakciyalıq maksimumlar múyeshlik minuttıń onnan bir úlesinde múyeshlerde baqlanadı. Difrakciya múyeshi menen pánjere turaqlısınıń mánisleri boyınsha rentgen tolqınlarınıń uzınlıǵın tabadı. Bunday ólshewlerdiń dáliliginiń júdá joqarı bolıwı múmkin: salıstırmalı qátelikti $0,002$ procenke shekem tómenletiwge boladı. Bunnan keyin kristaldaǵı rentgen nurlarınıń difrakciyasın baqlap, dáliliktıń sáykes dárejesinde kristaldıń turaqlısı b nı anıqlaw múmkin. Mısalı, kalcit pánjeresi ushın ($CaCO_3$) $b = 3,03560 \cdot 10^{-8} \text{ sm}$ shaması alıńǵan. Bunnan, kalcittiń tıǵızlıǵı hám molekualıq salmaǵı boyınsha Avogadro sanınıń mánisi ólshegen: $N = (6,0228 \pm 0,0011) \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$. Bul mánisi basqa da usıllar menen alıńǵan mánislerge tolıq sáykes keledi.

Rentgen nurlarınıń spektrin úyreniw ushın rentgen spektrografları paydalanıladı. Olardaǵı difrakciyalıq pánjereniń xızmetin kristallardıń keńisliklik pánjeresi atqaradı.

Berilgen tolqın uzınlığındadı kristallıq pánjeredegi difrakciyada bağıttı esaplawdı tek (4)- hám (5)-shártlerdiń tiykarında ǵana emes, al ádewir ápiwayı bolǵan usıl menen esaplawǵa boladı. Bul usıl bir birinen ǵárezsiz rus fizik-kristallografi YU.V.Vulf hám angliyalı ákeli-balalı U.G. hám U.L.Breggler tárepinen bir waqıtta tabıldı hám Vulf-Breggler usılı dep ataladı¹⁰. Bul usıldıń mánisin túsindiriw ushın kublıq sistemadaǵı kristalda oyımızda elementar kublıq qutınıń qaptal betine parallel hám bir birinen qashıqlıǵı b ǵa teń betlerdi ótkeremiz. Bul tegisliklerde atomlar birdey tıǵızlıqta jaylasqan. 108-súwrette bunday tegisliklerdiń sızilmanını tegisligi menen kesilisiw sıziqları 1, 1'; 2, 2'; 3, 3' h.t.b. sıziqları, al atomlar bolsa qara dóńgelekler menen kórsetilgen. Meyli, kristalǵa tolqın uzınlıǵı λ bolǵan bir birine parallel hám kogerentli $O_1, O_2, O_3, \dots$ nurları túsetuǵın bolsın. Bul nurlardıń bağıttın α_0 arqalı belgileybiz, bul múyesh usı nurlar menen 1, 1' tegisliginiń arasındaǵı múyesh bolıp tabıladı. Bul nurlarǵa tegis AB frontı sáykes keledi. 1, 1' tegisliginde jaylasqan atomlardadı shashırawdıń nátiyjesinde shaǵılısqan $A'B'$ frontı payda boladı. Bul frontqa normal bolǵan $O'_1, O'_2, O'_3, \dots$ nurları 1, 1' tegisligi menen $\alpha = \alpha_0$ múyeshin jasadı. $A'B'$ frontına parallel bolǵan tap usınday $A''B''$ frontı 2, 2' tegisliginde jatırǵan atomlardadı shashırawdıń saldarınan payda boladı. $A''B''$ frontına normal bolǵan $O''_1, O''_2, O''_3, \dots$ nurları $O'_1, O'_2, O'_3, \dots$ nurlarına qatnası boyınsha

$$\Delta = af - ac - cd = ad \cos \alpha_0 - \frac{ad}{\cos \alpha_0}$$

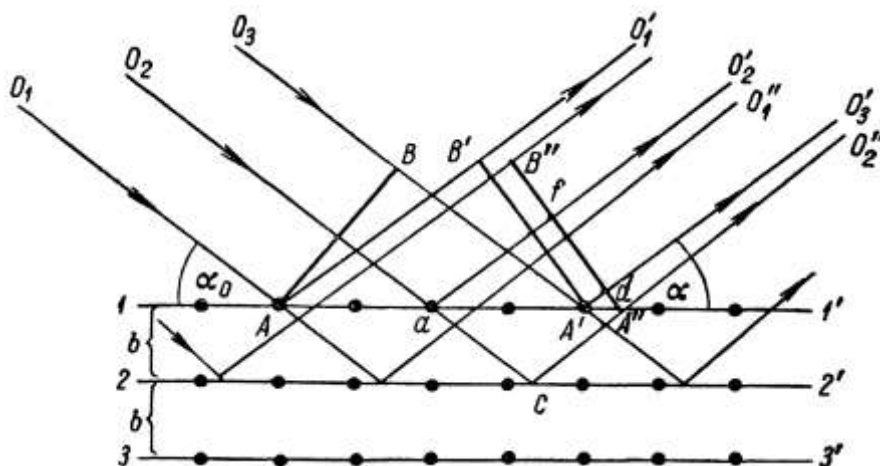
júrisler ayırmasına iye boladı. Bunnan

$$\Delta = ad \frac{\sin^2 \alpha_0}{\cos \alpha_0}$$

teńligin alamız. $ad = 2b \operatorname{ctg} \alpha_0$ teńliginiń orınlı ekenligin esapqa alsaq, onda

$$\Delta = 2b \sin \alpha_0$$

teńligine iye bolamız.



108-súwret. Vulf-Breggler teńlemesin keltirip shıǵarıwǵa.

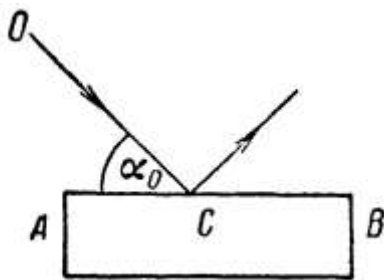
Tap sol sıyaqlı dásteler 3, 3'; 4, 4' hám basqa da tegisliklerde jatırǵan atomlardadı rentgen nurlarınıń shashırawınıń saldarınan da payda boladı hám bul dástelerdiń nurlarınıń arasındaǵı júrisler ayırması Δ birdey. Solay etip, aynalıq shaǵılısqan bağıttında bir biriniń ústine túsetuǵın turaqlı júrisler ayırması Δ ǵa iye dásteler payda boladı. Qubılıs 270-paragrafta tallanǵan kóp dásteler interferenciyasına sáykes keledi Eger dástelerdiń arasındaǵı júrisler ayırması pútın san eselengen tolqın uzınlıǵına teń bolsa, yaǵnıy

¹⁰ Bul usıldıń tiykarında jatatuǵın $2d \sin \theta = n\lambda$ túrindegi teńleme 1913-jılı U.G.Bregg, U.L.Bregg hám G.V.Vulf tárepinen keltirip shıǵarıldı. Kristaldadı atomlar sıyaqlı úsh ólshemli dáwirlik strukturadadı difrakciyanı Bregg difrakciyası dep ataw qabıl etilgen (Awdarıwshılar).

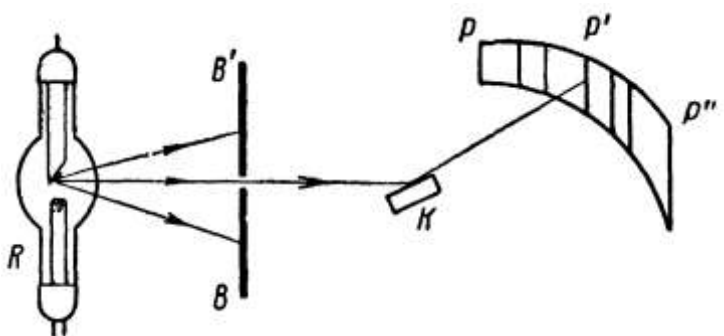
$$2b \sin \alpha_0 = k\lambda \quad (2)$$

shárti orinlanatuǵın bolsa (k arqalı pútin san belgilengen), onda aynalıq shaǵılısıw baǵıtında maksimum payda boladı. Interferenciyanıń dústetiriliw shıǵarılǵan dástelerdiń sanı kóp bolǵanda barlıq basqa baǵıtlardaǵı terbelislerdiń qosındı amplitudası júdá kishi boladı, yaǵnıy is júzinde shaǵılısqan nur bolmaydı. (2)-shárt Vulf-Breggler shárti dep ataladı.

Vulf-Breggler shártin keltirip shıǵarǵanda biz kristaldıń tábiyiy kaptal betine parallel bolǵan tegislikler sistemasındaǵı nurlardıń shashırawın qaradıq. Álbette, atomlardıń jıynaǵı arqalı ótkerilgen (mısalı, elementar kubtıń diagonalları boyınsha) hám bir birinen teńdey qashıqlıqlarda jaylasqan tegisliklerdegi shashırawdı da qarawǵa boladı. Bul tegisliklerdegi shashırawlar jańa maksimumlardı beredi. Usınday usıllar menen tabılǵan maksimumlardıń baǵıtlarınıń 273-paragraftaǵı (4)- hám (5)-formulalardıń járdeminde anıqlanǵan baǵıtlarǵa sáykes keletuǵınlıǵın kórsetiwge boladı. Biraq Vulf-Breggler usılı mınaday artıq mashlıqqa iye: bul usıl hár bir λ tolqın uzınlıǵına (eger $\lambda > 2b$ shárti orinlanatuǵın bolsa) aynalıq shaǵılısqan tolqın maksimumdı payda etetuǵın túsiw múyeshi α_0 di tabıwǵa múmkinshilik beredi. Meyli, kristaldıń tegis AB beti tábiyiy qaptal bet bolsın (109-súwret). AB qaptalına α_0 múyeshi menen monoxromat rentgen nurlarınıń OC dástesi kelip túsetuǵın bolsın. Kristaldı súwrettiń tegisligine perpendikulyar bolǵan C kósheriniń dógerinde aylandırıp α_0 múyeshin ózgertemiz. Usı α_0 múyeshi (2)-shártti qanaatlandıratuǵın mániske iye bolǵanda aynalıq shaǵılısıw baǵıtında maksimum payda boladı. α_0 múyeshiniń barlıq basqa mánislerinde shaǵılısqan nur pútkilley bolmaydı.



109-súwret. Kristaldan rentgen nurlarınıń shaǵılısıwı.



110-súwret. Aylanıwshı kristalı bar rentgen spektrografınıń sxeması.

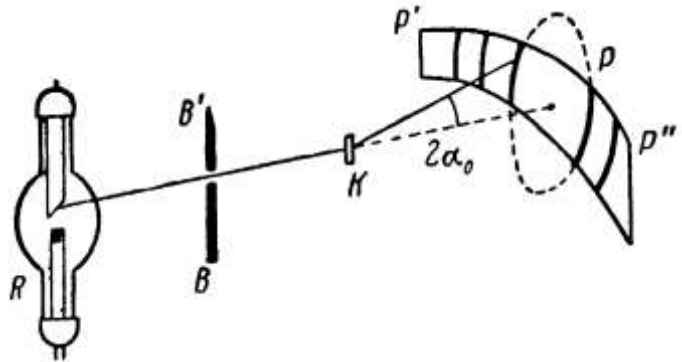
Aylanıwshı kristalı bar rentgen spektrografınıń dúzilisi biz tallaǵan principke tiykarlanǵan. Bul spektrograftıń sxeması 110-súwrette kórsetilgen. Bul súwrette R - rentgen trubkası, BB' - rentgen nurlarınıń jıńışke dástesin bólip beretuǵın ensiz sańlaǵı bar qorǵasın diafragma. Nurlar sańlaqqa parallel bolǵan kósherdiń dógerinde aylanıw alatuǵın K kristallına kelip túsedı. Orayı kristaldıń aylanıw kósherinde jatqan $PP'P''$ dóńgeleginiń dóǵasında fotografiyalıq plenka jaylasadı. Izertlenetuǵın rentgen nurları tolqın uzınlıqları $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$ bolǵan tolqınlarǵa iye dep boljaymız. Bunday jaǵdayda túsiw múyeshiniń α_{0i} shamasında λ_i tolqın uzınlıǵı ushın (2)-shárt oranlanatuǵın jaǵdayda kristaldıń qaptalınan nurlardıń shaǵılısıwı júzege keledi hám fotoplastinkadaǵı sáykes orında qarawıtıw alınadı. Kristaldı aylandırıw jolı menen barlıq $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$ tolqın uzınlıqları ushın shaǵılısıwdı alıwǵa boladı. Eger diafragmaǵı sańlaq tar hám kristaldıń shaǵılıstırıwshı qaptalına parallel bolsa, onda fotoplastinkadaǵı qarawıtıwdıń ayırım orınları jıńışke jolaqlar túrine enedi hám súwrettiń barlıǵı ádettegidey difrakciyalıq pánjereniń járdeminde alınǵan optikalıq spektrdiń súwretine usaytuǵın boladı.

Geypara jaǵdaylarda rentgen nurların registraciyalaw ushın olardıń hawanı yamasa basqa da gazlerdi ionlastırıw qábiletligi qollanıladı. Onıń ushın fotoplenka kristall aylanatuǵın kósherdiń dógerinde aylanıw alatuǵın ionizaciyalıq kamera menen almasırladı. Eger kameranıń aylanıw múyeshi kristaldıń aylanıw múyeshinen eki ese úlken bolsa, onda kameraǵa shashırǵan nur kelip

túsetuǵın shárt avtomat túrde orınlanadı. Usınday nur kameraǵa kelip túsken jaǵdayda ionizaciyanı júzege keltiredi; ionizaciyanıń dárejesi elektrometrdiń járdeminde ólshenedi.

Kristallardaǵı difrakciyanıń tek ǵana rentgen nurlarınıń tolqın uzınıǵın ólshew ushın ǵana emes, al keri bolǵan máseleni sheshiw ushın da paydalanıladı: tolqın uzınıǵı belgili bolǵan nurlardıń járdeminde kristallardıń strukturasını anıqlaw. Anaw yamasa mınaw kristaldan alınǵan difrakciyalıq súwrette tereń úyreniw olarǵa sáykes keletuǵın pánjerelerdiń geometriyalıq tipin tabıwǵa múmkinshilik beredi. Házirgi waqıtları usınday túrdegi izertlewler rentgenstrukturalıq analiz dep atalatuǵın fizikanıń óz aldına bólimine aylandı. Rentgenostrukturalıq analiz kristallografiyada da, texnikada da keń túrde paydalanılmaqta hám ol materiallardıń (polattıń, reńli metallardıń quymaların h.t.b.) qásiyetlerin izertlewdiń áhmiyetli usılı bolıp tabıladı.

111-súwret.
Untalǵan kristalǵa iye bolǵan rentgen
spektrografınıń sxeması.



Rentgenstrukturalıq analizdiń maqsetleri ushın tek ayırım monokristallardaǵı rentgen nurlarınıń difrakciyası usılı ǵana qollanılıp qoymay, *poroshok usılı* dep atalatuǵın usıl da keńnen qollanıladı¹¹. Bul usılda monokristaldıń ornına cilindr tárezli baǵanaǵa presslengen mayda etip untalǵan monokristall qollanıladı. Eger usınday jıńışke baǵana arqalı rentgen nurlarınıń monoxromat dástesin ótkeretuǵın bolsaq, onda tártipsiz túrde baǵıtlanǵan ayırım mayda kristallardıń ishinde berilgen λ tolqın uzınıǵı ushın (2)-shártti qanaatlandıratuǵın túsiwshi nurǵa α_0 múyeshi menen baǵıtlanǵan kristallar da tabıladı. Olar kelip túsiwshi nur menen $2\alpha_0$ múyeshin jasaytuǵın shaǵılısqan nurlardı beredi. Túsiwshi nur beti menen α_0 múyeshin jasaytuǵın mayda kristallardıń múmkin bolǵan barlıq baǵıtlarına tóbesindegi múyeshtiń shaması $2\alpha_0$ ge teń bolǵan nurlardıń konusı sáykes keledi. Hár qıylı λ_i tolqın uzınıqlarına hám hár qıylı k_i tártiplerine tóbesindegi múyeshtiń mánisi hár qıylı bolǵan konuslar juwap beredi. Poroshok tárizli kristallardan difrakciyalıq súwretti alıwdıń sxeması 111-súwrette keltirilgen. Bul súwrette R - rentgen trubkası; BB' - nurlardıń jıńışke dástesin berip beretuǵın diafragma; K - presslengen kristall poroshoktıń beǵanası. PP'P'' sheńberi boyınsha jaylasqan fotoplenkada nurlar konuslarınń fotoplenka menen kesilisiwine sáykes keletuǵın doǵa tárizli maksimumlar payda boladı. Kristallıq poroshok usılınıń artıqmashlıǵı alınıwı qıyın monokristallardı paydalanıwdı talap etpeytuǵınlıǵınan ibarat.

¹¹ "Poroshok usılı" ataması menen bir qatarda "polikristallar usılı" yamasa "untalǵan kristallar usılı" atamaları da qollanıladı. Bunday jaǵdayda polikristallardaǵı kristallıq dóneshelerdiń ólshemleri untalǵan kristaldaǵı maydan kristallarınıń ólshemleri menen barabar bolıwı kerek (Awdarıwshılar).

XXIV BAP

JAQTILIQTÍŇ IZOTROP ZATLAR HÁM OLARDÍŇ SHEGARALARI ARQALI ÓTIWI

§ 275. Jaqtılıqtıń zatlar menen óz-ara tásirlesiwi. Biz 259-paragrafta jaqtılıqtıń kishi tolqın uzınlığına iye elektromagnit tolqın ekenligin kórdik. Demek, jaqtılıq qubılısları elektromagnit tolqınlarınıń payda bolıwı menen tarqalıwın usı tolqınlardıń zatlar menen tásir etisiwin esapqa alatuǵın Maksvell teńlemeleri menen táriyiplenedi eken.

Maksvelldiń eń dáslepki teoriyasında zatlardıń elektromagnitlik processlerge tásin esapqa alıw ushın zattıń mınaday úsh xarakteristikasını esapqa alıw zárúr edi: ϵ dielektriklik turaqlı, μ magnitlik sińirgishlikti hám σ ótkizgishlikti. Dielektriklik turaqlı ϵ menen magnit sińirgishlik μ berilgen ortalıqtaǵı elektromagnitlik tolqınlardıń tarqalıw tezligi v nı beredi; Maksvell boyınsha:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}. \quad (1)$$

Ótkizgishlik σ tolqınlardıń jutılıwın anıqlaydı.

Zattaǵı jaqtılıqtıń tarqalıw tezligi v onıń sındırıw kórsetkishi menen

$$v = \frac{c}{n}$$

qatnasınıń járdeminde baylanısqan. Bul formulanı (1)-teńlik penen salıstırıp, mınanı alamız:

$$n = \sqrt{\epsilon\mu}. \quad (2)$$

Solay etip, sındırıw koefficienti n niń mánisi zattıń dielektriklik turaqlısı ϵ menen magnit sińirgishligi μ boyınsha anıqlanadı eken. Eger ϵ menen μ diń elektrostatikalıq hám magnitlik ólshewlerde alınǵan mánislerin paydalansaq, onda bul qatnas uzın elektromagnit tolqınlar ushın jaqsı orınlanadı. Biraq, jaqtılıq ushın ϵ menen μ diń sol mánisleri sındırıw kórsetkishi n ushın durıs emes nátiyjelerdi beredi.

Mısalı, suw ushın $\epsilon = 81$ hám μ diń mánisi is júzinde birge teń. Bunnan (2)-teńlikten

$$n = \sqrt{81} = 9$$

shamasın alamız. Al haqıyqatında, suwdıń sındırıw koefficienti 1,3 ke teń. Tap sol sıyaqlı ortalıqtıń ótkizgishligi menen jaqtılıqtıń jutılıwı arasındaqı qatnas ta orınlanbaydı. Mısalı, sáykes reń berilgende shiysheniń ótkizgishliginiń sezilerliktey ózgerisiniń orın almawı múmkin, Biraq ol jaqtılıqtı kúshli jutıw qábiletligine iye bola aladı.

Bul kórinip turǵan qarama-qarsılıqtıń sebebi mınadan ibarat: sırtqı elektromagnit maydanınıń, biz qarap atırǵan jaǵdayda jaqtılıq tolqınıń maydanınıń úlken jiyiliklerinde ϵ , μ hám σ shamaları jiyilikten kúshli ǵárezli boladı hám sonlıqtan usı ϵ , μ hám σ shamalarınń elektrostatikalıq hám magnitostatikalıq ólshewlerde alınǵan mánislerine teń emes.

Eger ϵ menen μ shamalarınń sırtqı maydan menen úlken sandaǵı atomlar menen molekulalardıń ortashalangán óz-ara tásin táriyipleytuǵınlıǵın esapqa alǵan jaǵdayda bunday ǵárezlikti túsiniwge boladı (II tomdaǵı 146- hám 208-paragraflardı qarańız). Dáwiri atomlardıń ishindegi hám molekulalardıń ishindegi dáwir menen barabar bolǵan qısqa jaqtılıq tolqınları ushın elektromagnit maydannıń atomlar hám molekulalar menen óz-ara tásirlesiwi ástelik penen ótetuǵın processlerdegi bolmaydı hám bunday jaǵdayda ortashalawdıń nátiyjesi pútkilley basqasha boladı. Zatlardıń optikalıq qásiyetleri bolsa jaqtılıq elektromagnit maydanınıń júdá quramalı elektrlik sistema bolıp tabılatuǵın hár bir atom hám molekula menen tásirlesiwinıń ózgesheligin esapqa alıwdıń nátiyjesinde ǵana tolıq tallanadı. II tomda kórip ótkenimizdey, atomlar menen molekulalardıń quramına elektronlar da kiredi hám, solay etip, zatlardıń optikalıq qásiyetlerin tallawdı tek elektronlıq teoriyanıń tiykarında ǵana ótkeriw múmkin boladı. Lorenc

kóp sanlı qubılıslardı sanlıq jaqtan túsiniw ushın atomlar menen molekulalardıń ishinde olar menen kvaziserpimli baylanısqa elektronlardıń, yaǵnıy óziniń teń salmaqlıq orınlarınń átirapında awısıwǵa proporcional bolǵan kúshtiń tásirinde terebele alatuǵın elektronlardıń bar ekenligi haqqındaǵı gipoteza menen shekleniwdiń jetkilikli ekenligin kórsetti.

Keyinirek bul gipotezaniń jetkilikli emes ekenligin hám atomlardıń qurılısınıń ádewir quramalı xarakterge iye ekenligin dıqqat orayına alıwdıń kerek bolatuǵınlıǵın kóremiz.

§ 276. Jaqtılıqtıń jutılıwı. Qálegen zat arqalı ótiwdiń barısında jaqtılıq qanday da bir dárejede jutıladı. Ádette jutılıw selektivlik xarakterge iye, yaǵnıy hár qıylı tolqın uzınlıǵına iye jaqtılıqtıń jutılıwı hár qıylı. Tolqın uzınlıǵı reńdi anıqlaytuǵın bolǵanlıqtan, usıǵan sáykes, hár qıylı reńge iye bolǵan nurlar berilgen zatta hár qıylı bolıp jutıladı.

Kózge kórinetuǵın nurlardıń intervalına kiretuǵın barlıq uzınlıqlardaǵı tolqınlardıń birdey az jutılıwın beretuǵın deneler reńge iye bolmaydı. Mısalı, qalınlıǵı 1 sm bolǵan shiyshe ózi arqalı ótken jaqtılıqtıń shama menen tek 1 procentin ǵana jutadı. Al usı shiyshe ultrafiolet hám uzaqtaǵı infraqızıl nurlardı kúshli jutadı.

Kózge kórinetuǵın nurlardıń sheklerinde jutılıwdıń selektivligine iye bolǵan deneler reńli móldir deneler bolıp tabıladı. Mısalı, jası, kók hám fiolet nurlardı kúshli jutatuǵın hám qızıl hám qızǵılt nurlardı ázzi jutatuǵın deneler "qızıl" reńge iye boladı. Eger usınday shiyshege hár qıylı uzınlıqlarǵa iye tolqınlardıń aralaspasınan turatuǵın aq jaqtılıq kelip túsetuǵın bolsa, onda ol arqalı tek qızıl reń sezimin beretuǵın uzınraq tolqınlar ǵana ótedi, al qısqa tolqınlar jutıladı. Tap sol shiyshe jası yamasa kók reńli jaqtılıq penen jaqtılındırsa, onda ol "qara" bolıp kórinedi, sebebi qızıl reńli shiyshe bunday nurlardı jutadı.

Serpimli túrde baylanısqa elektronlar teoriyasınıń kóz-qarası boyınsha jaqtılıqtıń jutılıwı ótken tolqınnıń májbúriy terbelislerin qozdırwı menen baylanıslı. Elektronlardıń turaqlı túrdegi terbelislerin júzege keltirip turıw ushın energiya jumsaladı hám bunnan keyin bul energiya energiyanıń basqa túrlerine aylanadı. Eger atomlardıń bir biri menen soqlıǵısıwınıń saldarınan elektronlardıń terbelisleriniń energiyası tártipsiz túrdegi molekulalıq qozǵalıstıń energiyasına ótetuǵın bolsa, onda dene qızadı.

Jaqtılıqtıń jutılıwın jaqtılıq tolqınlarınń jutiwshı denelerdiń atomlar menen molekulaları menen tásirlesiwinıń mexanizminiń detallarına kirmey-aq ulıwma túrde energiyalıq kóz-qaraslarda táriyiplewge boladı.

Meyli, bir tekli zat arqalı parallel nurlardıń dástesi tarqalatuǵın bolsın (112-súwret). Bul zatta jaqtılıqtıń tarqalıw baǵıtına perpendikulyar bolǵan qalınlıǵı dl bolǵan bir birine parallel tegislikler menen sheklengen sheksiz juqa qatlamdı ayırıp alamız. Energiyanıń aǵısınıń tıǵızlıǵı u usı qatlam arqalı ótkende $-du$ shamasına ózgeredi. Usı kemeyiwdiń $-du$ shamasın energiyanıń aǵısınıń ózine hám jutiwshı qatlamnıń qalınlıǵı dl ge proporcional dep esaplaw tábiyiy:

$$-du = k u dl. \quad (1)$$

k koefficienti jutiwshı zattıń qásiyetlerine baylanıslı hám onı *jutiw koefficienti* dep ataydı. k koefficientiniń turaqlı bolıwı jutatuǵın hár bir qatlamda usı qatlamǵa jetip kelgen aǵıstıń birdey bolǵan bóliminiń jutılatuǵınlıǵın ańǵartadı.

Qalınlıǵı shekli l bolǵan qatlamdaǵı energiyanıń aǵısınıń tıǵızlıǵınıń kemeyiw nızamın alıw ushın (1)-ańlatpanı

$$\frac{du}{u} = -kdl$$

túrinde kóshirip jazamız hám bunnan keyin onı 0 den l ge shekemgi intervalda integrallaymız:

$$\int_0^l \frac{du}{u} = -k \int_0^l dl.$$

Meyli, qatlamnıń basında ($l = 0$) aǵıstıń tıǵızlıǵı u_0 shamasına teń bolsın. Aǵıs zattıń l tereńligin ótkendeǵı shamasın u arqalı belgileyміз. Bunday jaǵdayda integrallawdıń nátiyjesinde mınanı alamız:

$$\ln u - \ln u_0 = -kl$$

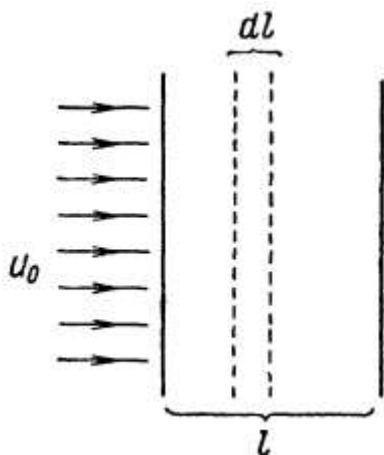
yamasa

$$\ln \frac{u}{u_0} = -kl.$$

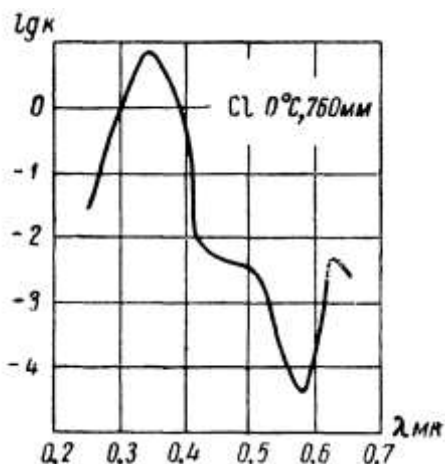
Bunnan

$$u = u_0 e^{-kl} \quad (2)$$

formulasına iye bolamız. Bul teńlikte e arqalı natural logarifmlerdiń tiykarı belgilengen.



112-súwret. Jaqtılıqtıń jutılıw nızamın keltirip shıǵarıwǵa.



113-súwret. Xlor ushın jutıw koefficienti k nıń logarifminiń tolqın uzınıǵı λ den ǵárezligi.

Jutıw koefficienti k nıń mánisi qanshama úlken bolsa, jaqtılıq kúshlirek jutıladı. (2)-ańlatpa boyınsha $l = 1/k$ teńligi orınlanganda

$$u = \frac{u_0}{e} \cong \frac{u_0}{2,72}$$

shamasın alamız. Demek, qalıńlıǵı $1/k$ shamasına teń bolǵan qatlam energıyanıń aǵısınıń tıǵızlıǵın 2,72 ese kemeytedi eken. Hár qanday zatlar ushın jutıw koefficienti k nıń san mánisi keń sheklerde ózgeredi. Atmosferalıq basımdaǵı hawa ushın kózge kórinetuǵın oblast ushın k nıń mánisi shama menen 10^{-5} sm^{-1} ge, shıyshe ushın $k \cong 10^{-2} \text{ sm}^{-1}$ ge, al metallar ushın k nıń mánisi onlaǵan mıńǵa jetedi. Barlıq zatlar ushın k jutıw koefficientiniń mánisi qanday da bir dárejede tolqın uzınıǵınan ǵárezli boladı. 113-súwrette atmosferalıq basımdaǵı hám 0°C temperaturadaǵı qaz tárizli xlor ushın $\lg k$ shamasınıń λ tolqın uzınıǵınan ǵárezligi kórsetilgen.

Kórinip turǵanıday, fiolet oblastta koefficienttiń shaması úlken, bunnan keyin onıń mánisi sarı-kók oblastta keskin kishireydi hám qızıl oblastta qaytadan úlkeyedi.

Tájiriybeler jaqtılıq móldir eritkishte eritilgen zatlarda jutılǵanda jutılıwdıń jaqtılıqtıń eritpedegi jolınıń bir birligindegi jutıwshı molekulalardıń sanına proporcional ekenligin kórsetedi. Uzunlıqtıń bir birligine sáykes keletuǵın molekulalardıń sanı eritpeniń koncentracıyası C ǵa proporcional bolǵanlıqtan, jutıw koefficienti k nıń mánisi C ǵa proporcional boladı hám bunnan $k = \kappa C$ teńligi orınlanadı dep boljawǵa boladı. Bul teńlikte κ arqalı eritpeniń koncentracıyasınan ǵárezsiz hám tek jutatuǵın zattıń molekulalarınıń qásiyetlerinen boyınsha anıqlanatuǵın proporcionallıq koefficient belgilengen. k nıń bul mánisin (2)-formulaǵa qoyıp, mınaǵan iye bolamız:

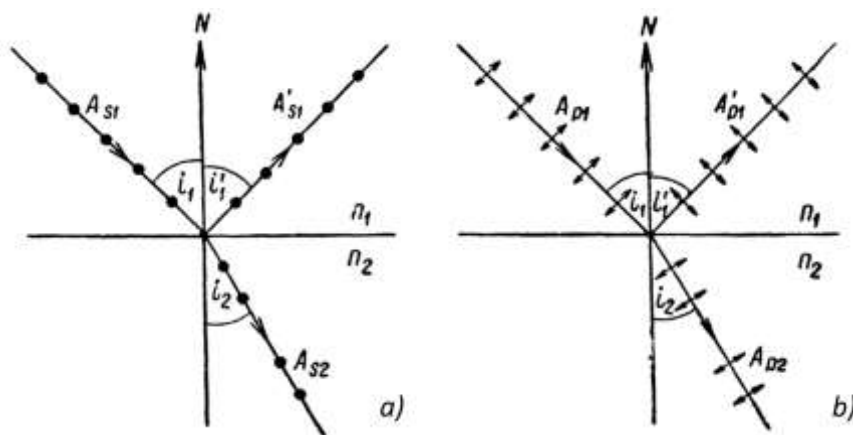
$$u = u_0 e^{-\kappa C l}. \quad (3)$$

κ koefficientiniń shaması eritpeniń kolncentracıyasınan ǵárezli emes degen tastıyıqlaw Beer nızamı dep ataladı. Bun nızam hár bir molekulanıń qásiyetin qońsı molekula ózgerťpeydi degen shárt qoyılǵan

jaǵdayda orınlanadı. Eritpeniń koncentracıyası ádewir úlken bolǵanda molekulardıń bir birine tási biline baslaydı hám bunday jaǵdayda Beer nızamı orınlanbay qaladı. Bul nızam orınlanatuǵın sharayatlarda (3)-qatnas eritpedegi jaqtılıqtıń jutilıwınıń dárejesi boyınsha eritpeniń koncentracıyasın alıqlawǵa boladı.

Jaqtılıqtıń energıyası basqa túrdegi energiyaǵa aylanatuǵın "haqıyqıy" jutiwlardan basqa dástedeги nurlardıń energıyasınıń aǵısınıń energıyanıń hár tárepke qaray shashırawınıń saldarınan kemeyiwi de orın aladı. Jaqtılıqtıń zatlarǵa usınday shashırawın biz tómende qaraymız.

§ 277. Jaqtılıqtıń eki móldir zattıń arasındadı shegara arqalı ótiwi. Joqarıda kórip ótkenimizdey (251-paragraf), jaqtılıq dástesi eki móldir ortalıqtıń arasındadı shegaradan ótkende shaǵılısqan hám sıńǵan dáste bolıp ekige bólinedi. Bul nurlardıń baǵıtı shaǵılısıw hám sıńıw nızamları boyınsha anıqlanadı. Biraq eki móldir zattıń arasındadı shegara arqalı jaqtılıqtıń ótiwi menen baylanıslı bolǵan qubılıslardı tolıq táriyiplew ushın shaǵılısqan hám sıńǵan nurlardıń intensivlikleriniń hám polarizaciya hallarınıń qanday ekenligin kórsetiw kerek boladı. Bul máseleler Frenel tárepinen XIX ásirdeń basında keltirip shıǵarılǵan formulalardıń járdeminde sheshiledi. Joqarıda kórsetip ótkenimizdey, Frenel óziniń formulaların jaqtılıqtı efirdegi serpmili deformaciylardıń sıpatında qaraw jolı menen keltirip shıǵardı. Bunday jaǵdayda Frenel efirge bir birine qayshı keletuǵın qásiyetlerdi beriwge tuwrı keldi. Qarama-qarsılıqlarǵa iye bolmaǵan Frenel formulaların jaqtılıqtıń elektromagnitlik teoriyasınıń járdeminde alıwǵa boladı. Frenel, jaqtılıq terbelislerin qaraǵanda bólekshedlerdiń teń salmaqlıq ornına awısıwına sáykes keletuǵın tek bir vektordan paydalandı. Al, biz elektromagnit tolqınlarınıń $\mathbf{E}$ hám $\mathbf{H}$ vektorları menen táriyiplenetuǵınlıǵın kórsettik. Eger jaqtılıq terbelislerin elektr vektorınıń terbelisleri menen sáykes keledi dep esaplasaq, onda jaqtılıqtıń elektromagnit teoriyası boyınsha alıńǵan formulalar Frenel formulalarına sáykes keledi. Jaqtılıq terbelislerin elektr vektorınıń terbelisleri menen sáykes keledi dep esaplawǵa boladı, sebebi jaqtılıq tolqınlarınıń kóriniwiniń basım kópshiligi (fiziologiyalıq hám fotoximiyalıq tási, fotoeffekt hám lyuminescenciya qubılısı) elektr kernewligi $\mathbf{E}$ vektorı boyınsha anıqlanadı. Magnit vektorı $\mathbf{H}$ tıń terbelisleri elektr vektorı $\mathbf{E}$ nıń terbelisleri menen tıǵız baylanısqan. Biraq, elektromagnit tolqınında bul terbelisler ádette kórinbeydi. Sonlıqtan, bunnan bılay jaqtılıq tolqınındaǵı terbelisler haqqında gáp etkenimizde biz elektr vektorı $\mathbf{E}$ nıń terbelislerin inabatqa alamız.



114-súwret. Jaqtılıq tolqınıń sınıwı hám shaǵılısıwı: a) jaqtılıq túsiw tegisliginde polarizaciyalanǵan, terbelisler túsiw tegisligine perpendikulyar tegislikte júzege keledi; b) jaqtılıq túsiw tegisligine perpendikulyar polarizaciyalanǵan, terbelisler túsiw tegisliginde júzege keledi.

Frenel formulalarına ótiwde úsh jaǵdaydı qaraymız: 1) jaqtılıq túsiw tegisliginde polarizaciyalanǵan; 2) jaqtılıq túsiw tegisligine perpendikulyar tegislikte polarizaciyalanǵan.

259-paragrafta aytilıp ótilgenindey, birinshi jaǵdayda jaqtılıq tolqınındaǵı terbelisler túsiw tegisligine perpendikulyar tegislikte, al ekinshi jaǵdayda túsiw tegisliginde júzege keledi. 114-súwrette súwret tegisligine perpendikulyar terbelisler noqatlar, al súwret tegisliginde jatqan terbelisler strelkalar menen kórsetilgen.

Meyli, túsiw hám sınıw múyeshleri i_1 hám i_2 , hám shaǵılısqan múyeshin $i'_1 = i_1$ bolsın. Bunnan bılay mınaday belgilewlerdi kirgizemiz: túsiwshi nurdaǵı túsiw tegisligindegine perpendikulyar bolǵan terbelislerdiń amplitudaların A_{s1} , al shaǵılısqan nurdaǵı túsiw tegisligindegine perpendikulyar bolǵan terbelislerdiń amplitudaların A'_{s1} , sınǵan nurdaǵı amplitudanı A_{s2} arqalı belgileybiz. Túsiw tegisliginde júzege keletuǵın terbelislerdiń amplitudaları túsiwshi, shaǵılısqan hám sınǵan nurlar ushın sáykes A_{p1} , A'_{p1} hám A_{p2} arqalı belgileybiz. Bunday jaǵdayda Frenel formuları boyınsha

$$\frac{A'_{s1}}{A_{s1}} = \frac{-\sin(i_1 - i_2)}{\sin(i_1 + i_2)}, \quad (1)$$

$$\frac{A_{s2}}{A_{s1}} = \frac{2 \sin i_2 \cos i_1}{\sin(i_1 + i_2)}, \quad (2)$$

$$\frac{A'_{p1}}{A_{p1}} = \frac{\operatorname{tg}(i_1 - i_2)}{\operatorname{tg}(i_1 + i_2)}, \quad (3)$$

$$\frac{A_{p2}}{A_{p1}} = \frac{2 \sin i_2 \cos i_1}{\sin(i_1 + i_2) \cos(i_1 - i_2)}. \quad (4)$$

Túsiw múyeshi menen sınıw múyeshi arasındaqı qatnas sınıw nızamı boyınsha beriledi:

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = n_{21}.$$

Bul teńlikte n_{21} arqalı ekinshi zattır birinshi zatqa salıstırǵanda sındırıw koefficienti belgilengen.

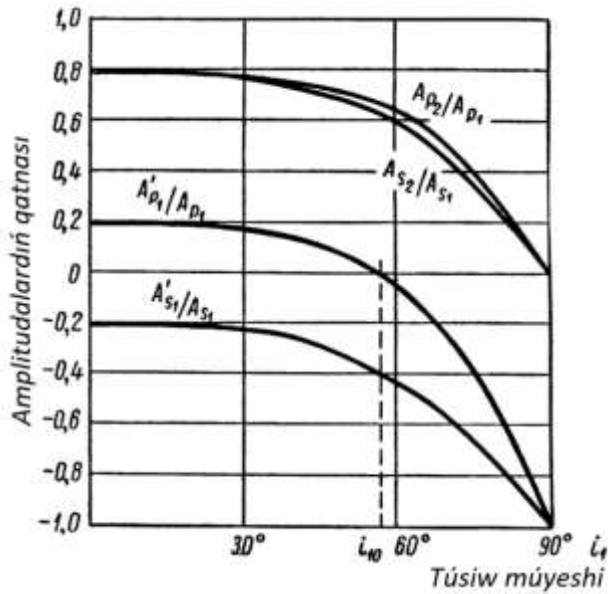
$n_{21} = 1,52$ teńligi orın alatuǵın dara jaǵday bolǵan hawa-shiyshe ushın $\frac{A'_{s1}}{A_{s1}}, \frac{A_{s2}}{A_{s1}}, \frac{A'_{p1}}{A_{p1}}$ hám $\frac{A_{p2}}{A_{p1}}$ shamalarınıń túsiw múyeshi i_1 den ǵárezligi 115-súwrette keltirilgen. Bul súwretten túsiw múyeshiniń bazı bir i_{01} mánisinde $\frac{A'_{p1}}{A_{p1}} = 0$ teńliginiń orın alatuǵınlıǵı kórinip tur. (3)-formuladan kórinip turǵanıday, túsiw múyeshi bolǵan i_{01} shamasınıń mánisiniń

$$\operatorname{tg}(i_1 + i_2) = \infty,$$

yaǵnıy

$$i_1 + i_2 = \frac{\pi}{2}$$

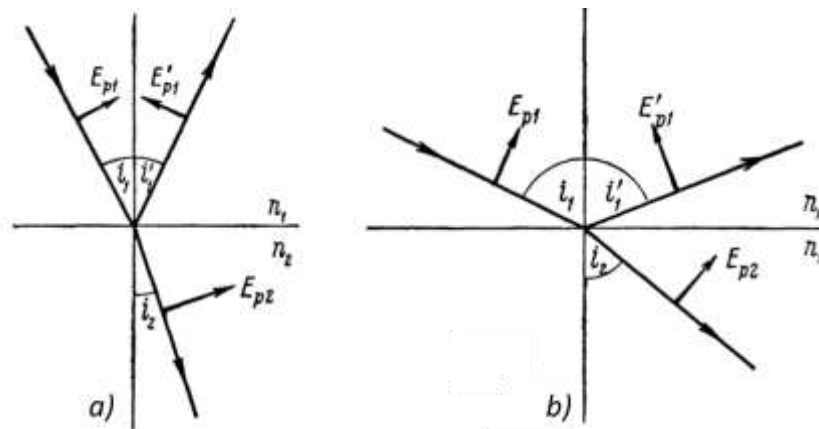
shárti boyınsha anıqlanadı. Bul shárt Bryuster nızamına sáykes keledi (258-súwretke qarańız). Eger shaǵılısqan hám sınǵan nurlar bir birine perpendikulyar bolsa, onda shaǵılısqan nur túsiw tegisliginde tolıq polarizaciyalanǵan (yaǵnıy onda túsiw tegisligine parallel bolǵan terbelisler bolmaydı, $A'_{p1} = 0$).



115-súwret.

Shağılısqan hám túsken tolqınlardağı amplitudaların túsiwshi tolqındağı amplitudağa qatnası.

Eñ aqırında (1)-(4) formulardağı belgilerdiń turqan ornın ayqınlastırıw kerek. Vektordıń qurawshılarınıń belgileri koordinatalardı saylap alıwdan gárezli: (1)-(4) formulalar koordinatalar sistemasın bilayınsha saylap alıwğa sáykes keledi: olardağı $\mathbf{E}$ vektorınıń túsiw tegisligine parallel bolğan qurawshıları túsiwshi, shağılısqan hám sınğan tolqınlarda 116-súwrette kórsetilgenday bolıp bağıtlangan. Bul súwrettegi *a*) kishi túsiw múyeshine, al *b*) úlken túsiw múyeshine tiyisli. Túsiw tegisligine perpendikulyar bolğan qurawshılardıń oń bağıtı barlıq úsh tolqın ushın sızılmanıń argı tárepine qaray bağıtlangan.



116-súwret. Túsiwshi, shağılısqan hám sınğan tolqınlardağı $\mathbf{E}$ vektorınıń qurawshılarınıń bağıtları.

Bunday jaǵdayda (2)- hám (4)-formulalardan qálegen jaǵdayda sınğan nurdıń fazasını ózertpey payda bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Shağılısqan tolqında $n_{21} > 1$ teńsizligi orınlanatuǵın jaǵdaylarda túsiw tegisligine perpendikulyar bolğan terbelislerdiń qálegen túsiw múyeshinde (E_s) fazanıń π shamasına ózgerisi orın aladı [(1)-formuladağı minus belgisi]. Túsiw tegisligine parallel bolğan tegislikler ushın (E_p) shağılısqan tolqında, $n_{21} > 1$, Bryuster múyeshinen kishi bolğan túsiw múyeshlerinde, yaǵnıy $i_1 + i_2 < \pi/2$ teńsizligi orınlanganda (3)-formuladağı $\tan(i_1 + i_2)$ niń mánisi oń hám, usıǵan sáykes E_{pq} hám E'_{p1} qurawshıları qarama-qarsı bağıtlangan. Bryuster múyeshinen úlken bolğan $i_1 + i_2 > \pi/2$ múyeshlerde $\tan(i_1 + i_2)$ niń mánisi teris hám (3)-formula boyınsha E_{pq} hám E'_{p1} shamalarınıń belgileri hár qıylı. 116-b súwrette kórinip

turǵanınday, hár qıylı belginiń endi E_{pq} hám E'_{p1} lardıń bir birine qarama-qarsı baǵıtlanganlıǵın ańǵartadı. Bryuster múyeshine teń múyeshlerde E'_{p1} terbelisleriniń amplitudası nolge teń.

Juwmaqlaymız: Bryuster múyeshinen kishi múyeshlerde de, Bryuster múyeshinen úlken múyeshlerde de optikalıq tıǵızraq bolǵan ortalıqtaǵı jaqtılıq shaǵılısqanda fazanıń π shamasın ózgerisi, yaǵnıy yarım tolqın uzınlıǵınıń joǵalıwı orın aladı. Bul Nyuton saqıynalarınıń orayındaǵı qarańǵı daqtır (kishi múyesh penen túsiw) hám Lloyd tájiriybesindegi (úlken múyeshde túsiw) qarańǵı nollik jolaqtır payda bolıwına alıp keledi.

Shaǵılısqan hám sıǵan tolqınlardaǵı energiyalardıń aǵısın anıqlaw ushın energiya aǵısı W (onıń mánisi Umov vektorınıń aǵıstır kesiminiń maydanına kóbeymesi menen anıqlanadı) amplitudanıń kvadratı A^2 qa, tolqınıń tarqalıw tezligi v ǵa hám energiya alıp ótiletuǵın maydan S ke proporcional (I iomdaǵı 112-paragraf):

$$W = uS \sim A^2 v S.$$

Shaǵılısqan tolqın ushın tarqalıw tezligi menen kese-kesimniń maydanı S túsken tolqınıń tarqalıw tezligi menen kese-kesimniń maydanına teń. Sonlıqtan, shaǵılısqan hám túsken nurlardıń energiyaların aǵısları W'_1 menen W_1 shamaların qatnasları olardıń kvadratların qatnasınday boladı. Bunnan, (1)-formula boyınsha túsiw tegisligine perpendikulyar bolǵan tegisliktegi terbelisler ushın (jaqtılıq túsiw tegistiginde polarizaciyalanǵan, bul jaǵday $\parallel$ belgisi menen ańǵartılǵan) mınaday qatnaslarǵa iye bolamız:

$$\left(\frac{W'_1}{W_1}\right)_{\parallel} = \left(\frac{A'_{s1}}{A_{s1}}\right)^2 = \frac{\sin^2(i_1 - i_2)}{\sin^2(i_1 + i_2)}. \quad (5)$$

Túsiw tegisligine parallel bolǵan terbelisler ushın (jaqtılıq túsiw tegisligine perpendikulyar tegislikte polarizaciyalanǵan) (3)-formula boyınsha mınaday ańlatpanı alamız:

$$\left(\frac{W'_1}{W_1}\right)_{\perp} = \left(\frac{A'_{p1}}{A_{p1}}\right)^2 = \frac{\operatorname{tg}^2(i_1 - i_2)}{\operatorname{tg}^2(i_1 + i_2)}. \quad (6)$$

Jaqtılıq normal baǵıtta túsetuǵın bolsa ($i_1 = i_2 = 0$) (5)- hám (6)-ańlatpalar anıq emes bolǵan túrge iye boladı. Bul anıqsızlıqtı jasırıw ushın kishi múyeshlerde olardıń sinusları menen tangensin múyeshiniń mánisi menen alıstırıwǵa bolatuǵınlıǵın paydalanamız. Bunday jaǵdayda

$$\frac{\sin^2(i_1 - i_2)}{\sin^2(i_1 + i_2)} = \frac{\operatorname{tg}^2(i_1 - i_2)}{\operatorname{tg}^2(i_1 + i_2)} = \frac{(i_1 - i_2)^2}{(i_1 + i_2)^2} = \frac{\left(\frac{i_1}{i_2} - 1\right)^2}{\left(\frac{i_1}{i_2} + 1\right)^2}.$$

Biraq, kishi i_1 hám i_2 múyeshlerinde sınıw nızamın bılayınsha jazıwǵa boladı:

$$\frac{i_1}{i_2} = n_{21}.$$

Bunnan kishi múyeshlerde

$$\frac{\sin^2(i_1 - i_2)}{\sin^2(i_1 + i_2)} = \frac{\operatorname{tg}^2(i_1 - i_2)}{\operatorname{tg}^2(i_1 + i_2)} = \frac{(n_{21} - 1)^2}{(n_{21} + 1)^2}$$

teńlikleriniń orın alatuǵınlıǵın kóremiz.

Bunnan normal túsiw ushın (5)- hám (6)-formulalardan túsiw tegisligine parallel bolǵan jaqtılıq ushın da, perpendikulyar bolǵan jaqtılıq ushın da birdey bolǵan

$$\left(\frac{W'_1}{W_1}\right)_{\perp} = \frac{(n_{21} - 1)^2}{(n_{21} + 1)^2} \quad (6a)$$

qatnasın alamız.

Sıǵan tolqındaǵı energiyanıń aǵısın anıqlaw ushın (2)- hám (4)-formulalardan paydalanıwǵa boladı. Biraq, energiyanı saqlanıw nızamınan paydalanǵan ápiwayıraq. Bul nızam boyınsha jutpaytuǵın zatlar ushın shaǵılısqan hám sıǵan nurlardaǵı energiyalar tıǵızlıǵınıń summası $W'_1 + W_2$ túsiwshi nurdaǵı energiyanıń aǵısı W_1 ge teń, yaǵnıy:

$$W'_1 + W_2 = W_1.$$

Bunnan

$$\frac{W_2}{W_1} = 1 - \frac{W'_1}{W_1} \quad (7)$$

teńligin alamız.

(5)- hám (6)- hám formulalar boyınsha túsiw tegisligine parallel hám perpendikulyar tegisliklerde polarizaciyalanğan jaqtılıq ushın W'_1/W_1 qatnasın bilip, tap sol jaǵday ushın W_2/W_1 qatnasınıń mánisin de tabamız.

Polarizaciyanıń izleri bolmaytuǵın tábiyiy jaqtılıq ushın energiyanıń jartısı túsiw tegisligine parallel bolǵan terbelislerge, al qalǵan yarımı túsiw tegisligine perpendikulyar bolǵan terbelislerge tiyisli dep esaplawǵa boladı. Bunnan (5)- hám (6)-ańlatpalar boyınsha tábiyiy jaqtılıq ushın shaǵılısqan jaqtılıqtaǵı energiyanıń aǵısı

$$\frac{W'_1}{W_1} = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(i_1 - i_2)}{\sin^2(i_1 + i_2)} + \frac{\operatorname{tg}^2(i_1 - i_2)}{\operatorname{tg}^2(i_1 + i_2)} \right] \quad (8)$$

qatnasınıń járdeminde anıqlanadı.

Tábiyiy jaqtılıqtıń normal túsiwi ushın (8)-formula (6-a) formulaǵa ótedi.

117-súwrette túsiw tegisliginde polarizaciyalanğan (I sıziq), túsiw tegisligine perpendikulyar tegislikte polarizaciyalanğan jaqtılıq (III sıziq) hám tábiyiy jaqtılıq ushın W'_1/W_1 qatnasınıń túsiw múyeshi i_1 nen ǵárezligi grafikalıq túrde súwretlengen. Iymeklikler salıstırmalı sındırıw koefficienti $n_{21} = 1,52$ shamasına teń bolǵan hawa-shiyshe shegarasında shaǵılısqan jaqtılıq ushın esaplanǵan. $i_1 = i_{01} = 56^{\circ}41'$ teńligi orınlanǵanda III iymeklik abscissa kósheri menen tiyisedi, bul shaǵıtısqan nurdıń túsiw tegisligindegi tolıq polarizaciyasına sáykes keledi (Bryuster nızamı). $i_1 = 0$ múyeshinde, yaǵnıy jaqtılıq ayırıp turıw shegarasına nomal baǵıtta túskende, jaqtılıqtıń eń kishi muǵları shaǵılısadı; urınba baǵıtta túskende ($i_1 = \pi/2$) jaqtılıq tolıǵı menen shaǵılısadı.

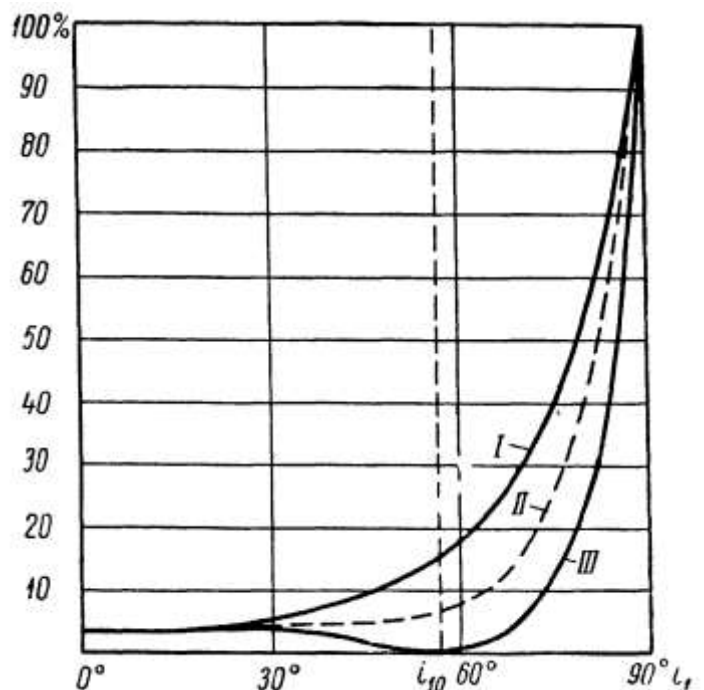
117-súwret.

Shaǵılısqan hám túsken tolqınlar daǵı energiyanıń aǵıslarınıń qatnası.

I - jaqtılıq túsiw tegisliginde polarizaciyalanğan;

II - tábiyiy jaqtılıq;

III - jaqtılıq túsiw tegisligine perpendikulyar tegislikte polarizaciyalanğan.



Frenel formulaların bir neshe paydalanıwdı qaraymız.

1-Mısal. Bazı bir optikalıq ásbapta jaqtılıq sındırıw koefficienti 1,6 ǵa teń izbe-iz shiysheden soǵılǵan altı linza arqalı ótedi. Linzalarǵa túsiw múyeshiniń shaması kishi dep esaplap, ásbap arqalı jaqtılıqtıń qanday bóleginiń ótetuǵınlıǵın anıqlańız.

Sheshimi. (6-a) formula boyınsha bir shağılsqanda shiysheniń betinen túsiwshi jaqtılıqtıń mınaday bólimi shağılsadı:

$$\frac{W'_1}{W_1} = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 = \frac{0,60^2}{2,6^2} = 0,053.$$

Demek, bet arqalı túsiwshi jaqtılıqtıń 0,947 bólegi ótedi eken. Altı linza 12 betke iye bolǵanlıqtan, barlıq sistema arqalı mınaday aǵıs ótedi:

$$W = 0,947^{12} W_0 = 0,52 W_0.$$

Bul teńlikte W_0 arqalı dáslepki aǵıs belgilengen. Solay etip, shaǵılıswdıń saldarınan joǵaltıwdıń saldarınan ásbapqa túsetuǵın jaqtılıqtıń 48 procenti joǵaladı eken.

2-mısal. Quramalı obektiv eki lınzadan turadı. Onıń birewi sınw koefficienti $n_1 = 1,2$ ge teń bolǵan shiysheden, al ekinshisi sındırıw koefficienti $n_2 = 1,6$ ge teń bolǵan shiysheden islengen. Lınzalar bir biri menen sındırıw kórsetkishi $n_3 = 1,54$ bolǵan kanada balzámı menen jelimlengen. Lınzalardıń betine jaqtılıq kishi múyesh penen kelip túsedı dep esaplap, obektivtegi shaǵılıswlardıń saldarınan jaqtılıqtıń joǵalıwın anıqlańız. Bul joǵaltıwları lınzalar bir biri menen jelimlenbegen, al olardıń arasında hawa qatlámı bar bolǵan jaǵday menen salıstırıńız.

Sheshimi. Birinshi bette túsiwshi jaqtılıqtıń mınaday bólimi shağılsadı:

$$\frac{W'_1}{W_1} = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 = \frac{0,52^2}{2,52^2} = 0,043.$$

Birinshi bet arqalı túsiwshi jaqtılıqtıń 0,957 bólimi ótedi.

SHiyshe-kanada balzámı shegarasında shaǵılısqan jaqtılıqtıń muǵdarın esaplaw ushın salıstırmalı sındırıw koefficienti n_{31} di anıqlaw kerek:

$$n_{31} = \frac{n_3}{n_1} = \frac{1,54}{1,52} = 1,013.$$

Bunnan shiyshe-kanada balzámı shegarasında jaqtılıqtıń mınaday bóliminiń shaǵılısatuǵınlıǵın tabamız:

$$\left(\frac{n_{31}-1}{n_{31}+1} \right)^2 = \left(\frac{0,013}{2,013} \right)^2 = 0,00004.$$

Demek, bul jaǵdayda shaǵılısw derlik bolmaydı eken. Solay etip, tek obektivtiń sońǵı betinen shaǵılısqandaǵı jaqtılıqtıń joǵalıwın ǵana esaplaw kerek boladı eken. Bul joǵaltıw mınaǵan teń:

$$\left(\frac{n_2-1}{n_2+1} \right)^2 = \left(\frac{0,60}{2,60} \right)^2 = 0,053,$$

yaǵnıy sońǵı bet arqalı túsiwshi jaqtılıqtıń 0,947 bólimi ótedi. Demek, obektivtiń barlıǵı arqalı túsken jaqtılıqtıń

$$W = 0,957 \cdot 0,947 W_0 = 0,906 W_0$$

bólimi ótedi. Obektivtiń barlıǵında shaǵılıswdıń saldarınan jaqtılıqtıń joǵalıwı 9,4 procentti quraydı. Lınzalardıń arasında hawa qatlámı bolǵanda joǵaltıwdıń shaması 18 procentke teń.

Joqarıda keltirilgen eki mısaldan ulıwmalıq juwmaq shıǵarıwǵa boladı. Shaǵılıstırıwshı betlerge iye bolǵan optikalıq sistemalarda (ásirese jaqtılıq qıya baǵıtta túskende) shaǵılıswdıń nátiyjesindegi jaqtılıqtıń joǵalıwı ádewir sezilerliktey shamalarga jetedi. Bul joǵaltıwları sistemaniń ayırım bólimlerin sındırıw koefficientiniń mánisi shiysheniń sındırıw koefficientine jaqın bolǵan móldir zatlar menen jelimlew arqalı kemeytiwge boladı.

Usınıń menen bir qatarda, orınlangan esaplawlar jáne bir juwmaq shıǵarıwǵa múmkinshilik beredi. Sındırıw koefficientleriniń mánisleri jaqın bolǵan eki zattıń shegarasındaǵı shaǵılısw júdá kishi. Sonlıqtan, eger móldir suyıqlıqqa tap sonday sındırıw koefficientine iye móldir qattı deneni salsaq, onda bul dene kórinbeytuǵın boladı. Bul jaǵdayda balqıtılǵan kvarctı ($n = 1,458$) tórt xlorlı uglerodqa ($n = 1,465$) salǵanda ańsat demonstraciyalawǵa boladı. I.V.Obreimov tárepinen islep shıǵılǵan suyıqlıqlardıń belgili bolǵan sındırıw koefficientleri boyınsha shiyshelerdiń sındırıw koefficientin anıqlaw usılı usı qubılısqqa tiykarlangan.

3-mısal. Túsiw tegisligi menen $\psi = 45^\circ$ múyesh jasap baǵıtlangan tegislikte polarizaciyalangán jaqtılıq shiysheniń betine $i_1 = 30^\circ$ múyesh penen túsedı. Shaǵılısqan nurdaǵı jaqtılıqtıń qaysı tegislikte polarizaciyalangánlıǵın anıqlańız. SHiysheniń sındırıw kórsetkishi $n = 1,46$.

Sheshimi. Meyli (118-súwret) OX túsiw tegisligin, al O_1O_2 polarizaciya tegisligin ańǵartatuǵın bolsın. Túsiwshi jaqtılıqtaǵı A_1 terbelisleri polarizaciya tegisligine perpendikulyar tegislikte júredi. A_1 di eki qurawshıǵa jikleybiz: túsiw tegisligine parallel baǵıttaǵı A_{p1} hám túsiw tegisligine perpendikulyar baǵıttaǵı A_{s1} .

Qoyılǵan shárt boyınsha A_1 tegisligi menen OX tegisliginiń arasındaǵı múyesh 45° shamasına teń bolǵanlıqtan

$$A_{p1} = A_{s1} = \frac{A_1}{\sqrt{2}}$$

teńligine iye bolamız.

Sınıw múyeshi i_2 ni anıqlaymız:

$$\sin i_2 = \frac{\sin i_1}{n} = \frac{\sin 30^\circ}{1,46} = 0,342.$$

Bunnan i_2 niń 60° qa teń ekenligin kóremiz.

(1)- hám (3)-Frenel formulaları boyınsha A'_{s1} hám A'_{s2} qurawshıları ushın shaǵılısqan jaqtılıqtıń amplitudaların alamız:

$$A'_{s1} = -A_{s1} \frac{\sin(30^\circ - 20^\circ)}{\sin(30^\circ + 20^\circ)} = -A_{s1} \frac{\sin(10^\circ)}{\sin(50^\circ)} = -0,227A_{s1};$$

$$A'_{p1} = A_{p1} \frac{\operatorname{tg}(30^\circ - 20^\circ)}{\operatorname{tg}(30^\circ + 20^\circ)} = A_{p1} \frac{\operatorname{tg}(10^\circ)}{\operatorname{tg}(50^\circ)} = 0,148A_{p1}.$$

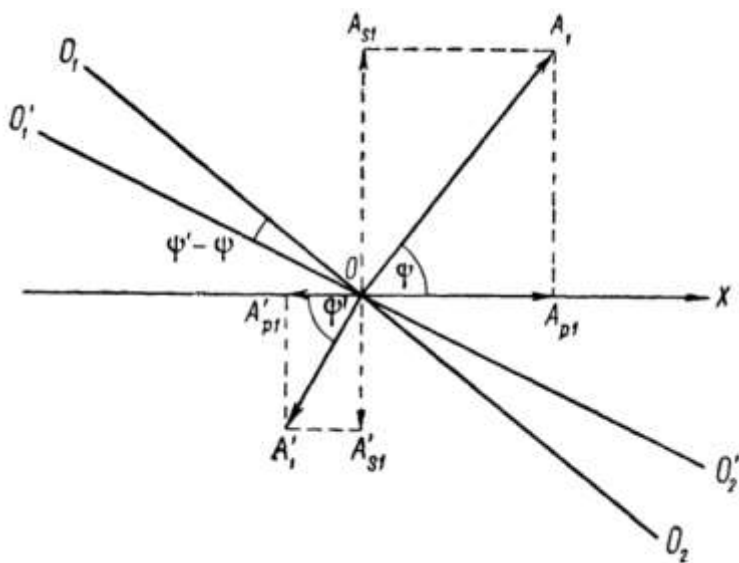
Joqarıda ayılǵanlar boyınsha túsiw múyeshiniń shaması Bryuster múyeshiniń shamasınan kishi bolǵanda eki qurawshı da fazasın π ge ózgertedi. Sonlıqtan, 118-súwrette A'_{s1} hám A'_{p1} shamalarınń baǵıtları A_{s1} hám A_{p1} ge qarama-qarsı etip alınǵan.

118-súwretten shaǵılısqan nurdaǵı A'_1 terbelisleriniń OX kósheri menen

$$\operatorname{tg} \psi' = \frac{0,227}{0,148} = 1,53,$$

yaǵnıy $\psi' = 57^\circ$ múyesh jasaytuǵın tegislikte júzege keletuǵınlıǵı kórinip tur. Shaǵılısqan nurdıń polarizaciya tegisligi $O'_1O'_2$ túsiwshi nurdıń polarizaciya tegisligine salıstırǵanda $\psi' - \psi = 57^\circ - 45^\circ = 12^\circ$ qa burılǵan.

Frenel formulalarınan polarizaciya tegisligi túsiw tegisligine sáykes kelmese yamasa oǵan perpendikulyar bolmasa, onda eki móldir zattıń arasındaǵı shegaradaǵı shaǵılısıw menen sınıwda polarizaciya tegisliginiń burılıwınıń orın alatuǵınlıǵın ańsat kóriwge boladı.



118-súwret.
Jaqtılıqtıń shaǵılısıwındaǵı
polarizaciya tegisliginiń burılıwın
esaplawǵa.

252-paragrafta kórsetip ótilgenindey, jaqtılıq optikalıq jaqtan tıǵızraq ortalıqtan optikalıq jaqtan kemirek tıǵızlıqqa iye ortalıqqa (salıstırmalı sındırıw koefficienti $n_{21} < 1$) sheklik múyeshten úlken bolǵan múyeshlerde túskende sınǵan nur bolmaydı. Bunday jaǵdayda jaqtılıq

tolıǵı menen shaǵılısadı. Bul qubılıstı tolıq ishki shaǵılısıw dep ataydı. Sheklik múyesh bolǵan i_{1sh} shamasınıń mánisi

$$\sin i_{1sh} = n_{21}$$

teńligi boyınsha anıqlanadı.

Tolıq ishki shaǵılısıw qubılısınıń orın alatuǵınlıǵı Frenel formulalarınan kelip shıǵadı. $\sin i_1 = \sin i_{1sh} = n_{21}$ teńligi orınlangan jaǵdayda sınıw nızamı boyınsha $i_1 = \pi/2$, bunnan (5)- hám (6)- Frenel formulaları boyınsha mınaday teńlikler orın alǵanda tolıq shaǵılısıw júzege keledi:

$$\left(\frac{W'_1}{W_1}\right)_{\parallel} = \frac{\sin^2\left(i_{1sh} - \frac{\pi}{2}\right)}{\sin^2\left(i_{1sh} + \frac{\pi}{2}\right)} = 1,$$

$$\left(\frac{W'_1}{W_1}\right)_{\perp} = \frac{\operatorname{tg}^2\left(i_{1sh} - \frac{\pi}{2}\right)}{\operatorname{tg}^2\left(i_{1sh} + \frac{\pi}{2}\right)} = 1.$$

Barlıq $i_1 > i_{1sh}$ múyeshleri ushın sınıw múyeshi i_2 niń sınıw nızamın qanaatlendiratuǵın zatlıq mánisleri bolmaydı. Sonlıqtan $i_1 > i_{1sh}$ teńsizligi orınlı bolǵanda sınǵan nurdaǵı energiyanıń aǵısı nolge teń bolıp qaladı hám W'_1/W_1 qatnası burınǵıday 1 ge teń bola beredi.

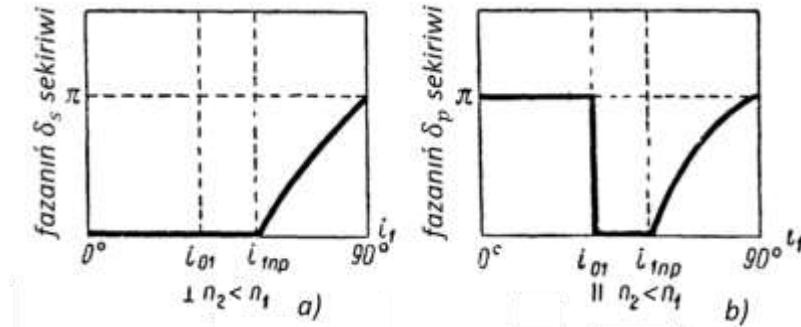
Tolıq ishki shaǵılısıwda túsken nurdıń fazasına salıstırǵanda shaǵılısqan nurdıń fazasınıń sekiriwi orın aladı. Eger elektr vektorı $\mathbf{E}$ túsiw tegisligine perpendikulyar tegislikte terbeletuǵın bolsa, onda fazanıń sekiriwi δ_s tómendegidey qatnastıń járdeminde anıqlanadı:

$$\operatorname{tg} \frac{\delta_s}{2} = \frac{\sqrt{\sin^2 i_1 - n_{21}^2}}{\cos i_1}; \quad (9)$$

Eger elektr vektorı túsiw tegisliginde terbeletuǵın bolsa, onda fazanıń sekiriwi mınaday qatnastıń járdeminde anıqlanadı:

$$\operatorname{tg} \frac{\delta_s}{2} = \frac{\sqrt{\sin^2 i_1 - n_{21}^2}}{n_{21} \cdot \cos i_1}. \quad (10)$$

δ_s hám δ_p fazalarınıń i_1 múyeshinen ǵárezligi $n_{21} = \frac{1}{n_{21}} = \frac{1}{1,52}$ bolǵan jaǵday ushın 119-a hám 119-b suwretlerde keltirilgen.



119-súwret. Optikalıq tıǵızlıǵı kishi bolǵan zatta shaǵılısqandaǵı fazalardıń sekiriwi: a) túsiw tegisligine perpendikulyar bolǵan terbelisler ushın; b) túsiw tegisligine parallel bolǵan terbelisler ushın.

(9)- hám (10)-ańlatpalar boyınsha polarizaciya tegisligine parallel hám perpendikulyar terbelisler arasındaǵı fazalar ayırması $\delta_p - \delta_s$ tiń shaması mınaday qatnaslardıń járdeminde anıqlanadı:

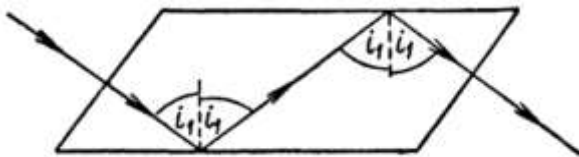
$$\operatorname{tg} \frac{\delta_p - \delta_s}{2} = \frac{\cos i_2 \sqrt{\sin^2 i_1 - n_{21}^2}}{\cos^2 i_1}. \quad (11)$$

(11)-formuladan $i_1 = i_{1sh}$ ($\sin i_{1sh} = n_{21}$) teńligi orınlangan jaǵdayda

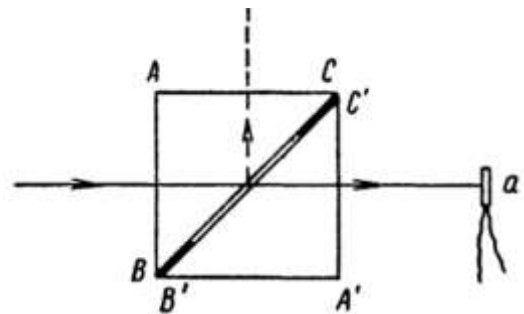
$$\operatorname{tg} \frac{\delta_p - \delta_s}{2} = 0$$

teńliginiń orınlanatuǵınlıǵı kelip shıǵadı, yaǵnıy nur dál shekli múyeshte shaǵılısatuǵın bolsa, onda túsiw tegislighi E'_{1p} hám E'_{1s} ne parallel hám perpendikulyar bolǵan terbelislerdiń arasında hesh qanday ayırma bolmaydı; tegis polyarizaciyalanǵan jaqtılıq tegis polyarizaciyalanǵan bolıp qala beredi. Al ulıwma aytqanda tolıq ishki shaǵılısıwda payda bolǵan nurda elektr vektorınıń E'_{1p} hám E'_{1s} qurawshılarınıń arasında bazı bir fazalar ayırması bar boladı.

Ayırıp turǵan shegaraǵa sheklik múyeshten úlken bolǵan múyesh penen tegis polyarizaciyalanǵan nur túsedı dep boljayıq. Bul nurdıń polyarizaciya tegislighi menen túsiw tegislighiniń arasındaǵı múyeshtiń shaması 0 menen $\pi/2$ den ózgeshe bolsın. Bunday jaǵdayda shaǵılısqan nurdaǵı eki E'_{1p} hám E'_{1s} terbelisleri de bir terbelisten payda boladı, yaǵnıy olar kogerentli boladı. I tomdaǵı 101-paragrafta bir birine perpendikulyar bolǵan terbelislerdi qosqanda ulıwma aytqanda, ellips boyınsha qozǵalısqan payda boladı. Demek, tolıq ishki shaǵılısqan nurda elektr vektorınıń ushı ellipsti sızatúǵınday bolıp ózgeredi. Usınday túrdegi terbelislerge sáykes keletuǵın jaqtılıqtı *ellips tárizli bolıp polyarizaciyalanǵan* dep ataydı. E'_{1p} hám E'_{1s} qurawshıları birdey amplitudaǵa iye bolatuǵın dara jaǵdayda olardıń arasındaǵı fazalar ayırması $\pi/2$ yamasa $3\pi/2$ shamasına teń boladı, ellips dóńgelekke aylanadı hám biz *dóńgelek tárizli polyarizaciyalanǵan* jaqtılıqqa iye bolamız. SHıyshe-hawa shegarasında ($n_{21} = 1,5$) $i_1 = 54^\circ 37'$ bolǵan jaǵdayda fazalar ayırması $\delta_p - \delta_s = 45^\circ$; tap usınday múyesh penen eki qaytara shaǵılısqan $\pi/2$ shamasına teń fazalar ayırmasın beredi, yaǵnıy dóńgelek terbelislerdiń payda bolıwına alıp keledi. Frenel izbe-iz eki ret $54^\circ 37'$ múyesh penen prizmalardıń arasındaǵı hawa qatlamında tolıq eki shaǵılısqan júzege keletuǵın rombnı soqtı (120-súwret). Eger dáslep jaqtılıq tegis polyarizaciyalanǵan bolsa, onda rombdan nur dóńgelek boyınsha polyarizaciyalanǵan bolıp shıǵadı. Ellips yamasa dóńgelek tárizli polyarizaciyalanǵan jaqtılıqtı izertlewdiń usılların tómende qaraymız.



120-súwret. Eki ret tolıq ishki shaǵılısqanda ellips tárizli polyarizaciyalanǵan jaqtılıqtı alıw.



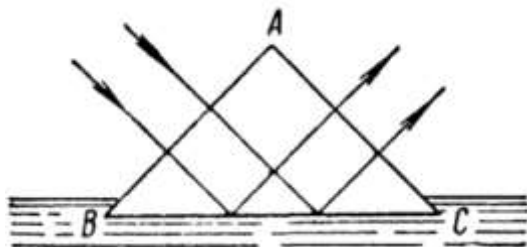
121-súwret. Prizmalardıń arasındaǵı juqa hawa qatlamı arqalı infraqızıl nurlardıń ótiwi.

Tolıq ishki shaǵılısqan elektromagnitlik terbelislerdiń ekinshi ortalıqqa ótetuǵınlıǵınan ibarat ózine tán qubılıs baqlanadı. Biraq, bul terbelisler energiyanıń ayırıp turǵan shegara boyınsha alıp ótiliwin ǵana boldıradı; sıǵın nurlar payda bolmaydı.

Terbelislerdiń ekinshi ortalıqqa ótiw qubılısın eksperimentte tabıwǵa boladı. Eger optikalıq tıǵızlıǵı kem bolǵan zattıń qalınlıǵı tolqın uzınlıǵınıń shaması menen barabar bolsa, al onnan keyin optikalıq jaqtan tıǵız bolǵan zat jaylassa, onda terbelisler oǵan ótedi hám bunnan keyin tolqın ádettegidey bolıp tarqalıwın dawam ete beredi. Bunday eksperimentte basqa jaǵdaylarda tolıq ishki shaǵılısqan orın alatuǵın bet arqalı energiyanıń bir bólimi ótedi. 121-súwrette optikalıq jaqtan tıǵızlıǵı kishi bolǵan qatlam arqalı terbelislerdiń ótetuǵınlıǵın anıqlawǵa múmkinshilik beretuǵın tájiriýbeniń sxeması keltirilgen. Tas duzınan soǵılǵan tolıq ishki shaǵılısqan orın alatuǵın eki prizma (infraqızıl oblastta móldir bolǵanlıǵı ushın tas duzı alınadı, tómendegi tekstti qarańız) bir biri menen qosılǵan. Biraq júdá juqa bolǵan metall folgalardan soǵılǵan prokladkalardıń járdeminde olardıń BC hám $B'C'$ betleriniń arasında juqa hawa katlamı qaldırılǵan. Eger folganıń qalırlıǵı shama menen 5 mkm bolsa, onda hawa qatlamınıń qalırlıǵı kózge kórinetuǵın jaqtılıqtıń tolqın uzınlıǵınan úlken boladı hám kózge kórinetuǵın nurlar BC betinde punktir sızıqtıń baǵıtında tolıq ishki shaǵılısqan ushıraydı. Hawa qatlamınıń tap usınday bolǵan qalırlıǵında jetkilikli dárejede úlken tolqın uzınlıǵına iye infraqızıl nurlar hawa qatlamı arqalı $A'B'C'$ prizmasına ótedi hám onı a termoparasınıń

járdeminde anıqlawğa boladı. Eger hawa qatlamınıń arasındaǵı qalıńlıqtı mikronnıń kishi úleslerine shekem kishireytsek, onda kózge kórinetuǵın nurlar $A'B'C'$ prizmasına ótedi.

Tájiriybeniń basqa variantı L.I.Mandelshtam hám Zeleni tárepinen orındandı. ABC tolıq ishki shaǵılısıw prizması (122-súwret) BC qaptalı menen fluorescenciyanıwshı suyıqlıqqa tiyip turadı. Bunday jaǵdayda terbelistiń bir bólimi suyıqlıqqa ótedi hám juqa qatlamda onıń fluorescenciyasın júzege keltiredi.



122-súwret.

Tolıq ishki shaǵılısıwdaǵı jaqtılıqtıń ekinshi zatqa ótiwin demonstraciyalaw.

§ 278. Jaqtılıqtıń metallarda shaǵılısıwı. Metallar jaqtılıqtı kúshli jutatuǵınlıǵı menen ayrılıp turadı. Jaqtılıqtıń qalıńlıǵı jaqtılıq tolqınıńnıń uzınlıǵınan azmaz ǵana úlken bolǵan metall plenka arqalı sezilerliktey ótiwin ańǵarıwǵa boladı. Bunday jaǵdayda, ulıwma aytqanda, ádewir úlken selektivlik baqlanadı. Misalı, ótken nurda altınıń juqa plenkası jası, al gúmistıń juqa plenkası fiolet bolıp kórinedi. Eger metaldaǵı jutılıw 276-paragraftaǵı

$$u = u_0 e^{-kl} \quad (1)$$

túrinde jazılatuǵın (2)-formulanıń járdeminde táriyiplenetuǵın bolsa, onda k koefficienti ushın onlaǵan, júzlegen mır sm^{-1} shamasındaǵı mánis alınadı. Sonlıqtan metallardaǵı jutılıwdı táriyiplew ushın k menen

$$\kappa = \frac{k\lambda}{4\pi}$$

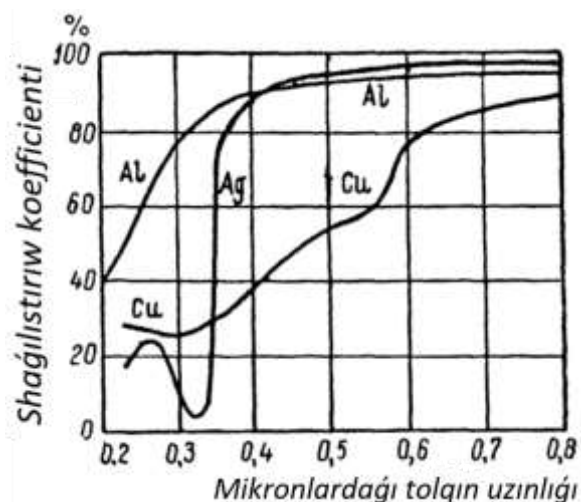
ańlatpası menen baylanısqa basqa κ koefficienti kirgiziledi. Bul ańlatpada λ arqalı biz qarap atırǵan jaqtılıqtıń tolqın uzınlıǵı belgilengen. Bunday jaǵdayda (1)-formula mınaday túрге enedi:

$$u = u_0 e^{-\frac{4\pi}{\lambda} \kappa l}.$$

Jaqtılıq qalıńlıǵı usı jaqtılıqtıń tolqın uzınlıǵına teń metall qatlamı arqalı ótkende energiyanıń aǵısı $e^{4\pi\kappa}$ shamasına kemeyedi. Kópshilik metallar ushın κ nıń mánisi 1,5 penen 5 tiń arasında jaylasadı.

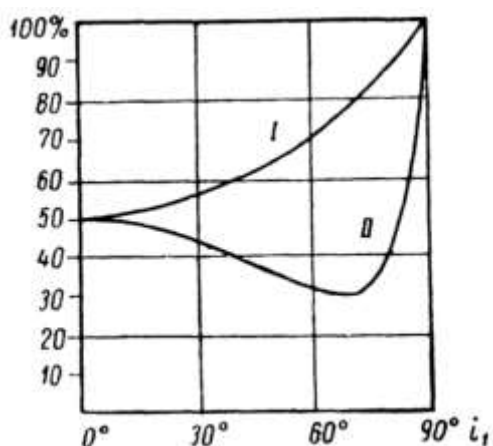
123-súwret.

Alyuminiy, gúmis hám mısıń shaǵılıstırıw koefficientleriniń tolqın uzınlıǵınan ǵárezligi.



Metallar jaqtılıqtı úlken jutıw menen birge úlken shaǵılıstırıw qábiletligi menen de ayrıladı. Is júzinde jaqtılıqtı shaǵılıstırıw koefficienti metaldıń betiniń halınan ǵárezli boladı: korroziyanıń (tat basıwdıń) júdá kishi bolǵan izleri shaǵılıstırıw qábiletligin ádewir kishireyte aladı. Sonlıqtan metallardıń shaǵılıstırıw xarakteristikası ushın taza polirowkalangán betler menen is alıp bariwǵa

tuwrı keledi. Metallardağı shağılısıw da seliktivlikke iye. 123-súwrette alyuminiydiń, gúmistiń hám mistiń shağılıstırıw koefficientiniń tolqın uzınlıǵınan ǵárezligi kórsetilgen. Kórinip turǵanıday, kózge kórinetuǵın oblastta alyuminiy menen gúmistiń shağılıstırıw koefficienti 90 procentten joqarı. Gúmis ushın shağılıstırıw koefficienti fiolet oblastta ($\lambda \cong 0,4$ mkm) sezilerliktey kishireye baslaydı hám ultrafiolet oblastta keskin kishireyedi hám $\lambda = 0,32$ mkm shamasındaǵı tolqın uzınlıǵında minimumǵa jetedi. Alyuminiydiń shağılıstırıw qábiletligi tolqın uzınlıǵınıń ózgeriwine baylanıslı ástelik penen bir tekli ózgeredi hám spektrdiń ultrafiolet oblastında da salıstırmalı joqarı bolıp qaladı. Alyuminiydiń usınday qábiletligi onıń korroziyaǵa qatnası boyınsha úlken turaqlılıǵı onı hár qıylı optikalıq ásbaplar ushın aynalardı soǵıw ushın paydalanıwda ayırıqsha jaramlı etedi. Mistiń shağılıstırıw koefficienti kózge kórinetuǵın oblasttıń ózinde kúshli kishireyedi hám bul jaǵday taza mistiń betiniń ózine tán qızǵısh reńge iye bolatuǵınlıǵın támiyinleydi.



124-súwret.

Mıstaǵı shaǵılısqan hám túsken tolqınlardıń energiya aǵıslarınıń qatnası: I - jaqtılıq túsıw tegisliginde polarizaciyalanǵan, II - jaqtılıq túsıw tegisligine perpendikulyar tegislikte polarizaciyalanǵan ($\lambda = 0,45$ mkm).

Polirovkalangan metall betlerdiń shağılıstırıw koefficientiniń shaması túsıw múyeshinen ǵárezli. Bunday jaǵdayda túsıw tegisligine parallel hám perpendikulyar bolǵan terbelisler ushın shağılıstırıw koefficientiniń mánisleri hár qıylı boladı. 124-súwrette mis ushın ($\lambda = 0,45$ mkm tolqın uzınlıǵındaǵı) shaǵılısqan hám túsken nurlardaǵı energiyalardıń aǵıslarınıń qatnasınıń túsıw múyeshi i_1 den ǵárezligi kórsetilgen. I iymeklik túsıw tegisligine perpendikulyar, al II iymeklik túsıw tegisligine parallel terbelisler ushın sızilǵan. Kórinip turǵanıday, iymeklikler shiysheniń betinde shaǵılısqan jaqtılıq ushın sızilǵan iymeklikke usaydı (117-súwrettegi I hám III iymeklikler). 124-súwrettegi I hám II iymeklikleri $i_1 = 0$ túsıw múyeshinde qosıladı hám túsıw múyeshiniń $i_1 = \pi/2$ shamasında 1 ge umtıladı. Túsıw tegisligine parallel bolǵan terbelislerge tiyisli II iymeklik túsıw múyeshiniń belgili bolǵan $i_1 = i_{10}$ mánisinde minimumǵa jetedi. Mis ushın bul i_{10} múyeshiń shaması $69^{\circ}41'$ qa teń. Biraq, Frenel formulalarına sáykes keletuǵın iymeklikler menen (117-súwret) metallıq shağılıstırıw iymeklikleri arasında ádewir úlken ayırma bar. Birinshiden, metallıq shağılısıw normal túsıwde de úlken, ekinshiden, II iymeklik minimumında nolge jetpeydi. Metallar hesh bir múyeshi shaǵılısqan nurlardıń tolıq polarizaciyasın bermeydi, al, eki móldir zattıń shegarasındaǵı Bryuster múyeshi menen shağılısıw orın alǵan jaǵdayda shaǵılısqan nur túsıw tegisliginde tolıǵı menen polarizaciyalanǵan. Metall bette shaǵılısqanda túsıw tegisligine parallel hám perpendikulyar terbelislerdiń arasında qanday da bir mánistegi fazalar ayırması júzege keledi. Sonlıqtan sıziqlı polarizaciyalanǵan jaqtılıq metaldıń betinde shaǵılısqanda ellips tárizli polarizaciyalanǵan jaqtılıqqa aylanadı.

Metallardıń optikalıq qásiyetleriniń teoriiyası olarda erkin elektronlar bar degen boljawǵa tiykarlanǵan. Bunday jaǵdayda Frenel formulalarınıń ornına mınaday formulalar alınadı:

1) túsıw tegisligine perpendikulyar bolǵan terbelisler ushın shaǵılısqan hám túsıwshi nurlardıń energiyalarınıń aǵıslarınıń qatnası (jaqtılıq túsıw tegisliginde polarizaciyalanǵan) ushın 277-paragraftaǵı (5)-formulanıń ornına:

$$\left(\frac{W_1'}{W_1}\right)_{\parallel} = \left(\frac{A_{s1}'}{A_1}\right) = \frac{(1 - \cos i_1)^2 + \kappa^2}{(1 + \cos i_1)^2 + \kappa^2} \quad (2)$$

túrindegi formula alınadı.

2) túsiw tegisligine parallel bolǵan terbelisler ushın shaǵılısqan hám túsiwshi nurlardıń energiyalarınń aǵıslarınıń qatnası (jaqtılıq túsiw tegisliginde polarizaciyalanǵan) ushın 277-paragraftaǵı (6)-formulanıń ornına:

$$\left(\frac{W_1'}{W_1}\right)_{\perp} = \left(\frac{A_{p1}'}{A_p}\right) = \frac{\left(n - \frac{1}{\cos i_1}\right)^2 + \kappa^2}{\left(n + \frac{1}{\cos i_1}\right)^2 + \kappa^2} \quad (3)$$

túrindegi formula alınadı.

(2)- hám (3)-formulalarda n metaldıń sındırıw koefficientin, al κ shaması bolsa (1a) formula menen anıqlanatuǵın jutıw koefficientin ańǵartadı.

Normal túsiw ushın ($i_1 = 0$) (2)- hám (3)-formulalardıń ekewi de

$$\left(\frac{W_1'}{W_1}\right)_{\parallel} = \left(\frac{W_1'}{W_1}\right)_{\perp} = \frac{(n - 1)^2 + \kappa^2}{(n + 1)^2 + \kappa^2} \quad (4)$$

túrine enedi [277-paragraftaǵı (6a) formulanıń ornına].

XIX ásirdeń aqırında jaqtılıqtıń bazı bir muǵdarın ótkeriwi ushın metallardıń juqa plenkalardıń paydalanıw jolı menen olardaǵı n menen κ shamalarınń mánislerin eksperimentlerde tikkeley anıqlawǵa baǵdarlanǵan jumıslar islendi. n menen κ shamaların tabıwdıń ekinshi usılı usı n menen κ konstantaların metallarda shaǵılısqan jaqtılıqtıń polarizaciyası táriyipleytuǵın shamalardı baylanıstıratuǵın teoriyalıq formulalardı paydalanıwǵa tiykarlanǵan. n menen κ shamalarınń usınday jollar menen tabılǵan mánisleri III keste de berilgen.

Kórinip turǵanıday, bir qatar metallar ushın sındırıw koefficientiniń mánisi 1 den kishi. Absolyut sındırıw koefficienti n niń 1 den kishi mániske iye bolıwınıń múmkinshiligi 282-paragrafta kórsetiledi.

Teoriyalıq jaqtan metallardıń optikalıq n menen κ konstantaları elektr ótkizgishlik σ menen bılayınsha baylanısqa:

$$n\kappa = \frac{\sigma}{v}.$$

Bul formulada v arqalı jaqtılıqtıń jıyılıǵı belgilengen. Bul qatnas alıs infraqızıl oblastlar ushın jaqsı orınlanadı. Kózge kórinetuǵın oblast ushın ádewir úlken alshaqlıqtıń bar ekenligi kórinedi. Bul jaǵday metalǵa kózge kórinetuǵın jaqtılıq kelip túsken de tek erkin elektronlardıń ǵana emes, al baylanısqa elektronlardıń da orınınıń úlken ekenligin ańǵartadı.

III keste. Metallar ushın $\lambda = 0,589$ mkm tolqın uzınlıǵına iye jaqtılıq ushın sındırıw n , jutıw κ hám shaǵılıstırıw r koefficientleriniń mánisleri

Metall	κ	n	r , procentlerde
Temir	1,63	1,51	32,6
Nikel	3,32	1,79	62,0
Mıs	4,26	2,06	70,1
Altın	2,82	0,37	85,1
Gúmis	3,61	0,18	95,0
Natriy	2,64	0,05	99,7

§ 279. Jaqtılıqtıń dispersiyası. *Jaqtılıqtıń dispersiyası* haqqında gáp etkende zattıń sındırıw koefficientiniń jaqtılıqtıń tolqın uzınlıǵınan ǵárezligi túsiniledi. Hár qıylı tolqın uzınlıǵına iye jaqtılıq, yaǵnıy hár qıylı reńge iye jaqtılıq eki móldir deneniń arasındaqı shegarada birdey bolıp sınbaydı. Anıqlıq ushın biz boslıq-berilgen zattıń arasındaqı shegaradaǵı sınıwdı qaraymız, yaǵnıy tolqın uzınlıǵı λ niń sındırıw koefficientiniń absolyut mánisinen ǵárezligi haqqında gáp etemiz.

Bunday jaǵdayda berilgen hár bir zat ushın sınıw koefficienti n niń tolqın uzınlıǵı λ niń belgili bolǵan funkciyası ekenligin jazamız:

$$n = f(\lambda). \quad (1)$$

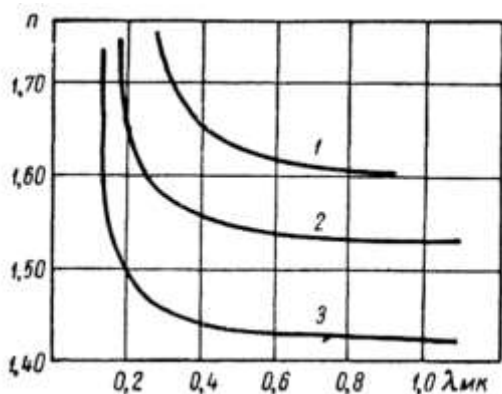
Zattıń dispersiyası dep sınıw koefficienti n niń tolqın uzınlıǵı λ niń ózgeriwi menen qalayınsha tez ózgeretuǵınlıǵın anıqlaytuǵın shamaǵa aytadı. Eger λ_1 hám λ_2 tolqınları ushın sındırıw koefficientleriniń n_1 hám n_2 mánisleri sáykes keletuǵın bolsa, onda tolqın uzınlıǵı λ_1 den λ_2 ge shekemgi uchastka ushın zattıń ortasha dispersiyası mınaday qatnastıń járdeminde beriledi:

$$\bar{v} = \frac{n_2 - n_1}{\lambda_2 - \lambda_1}. \quad (2)$$

Bul qatnasta $\Delta n = n_2 - n_1$ hám $\Delta \lambda = \lambda_2 - \lambda_1$. Berilgen λ tolqın uzınlıǵınıń qasındaǵı zattıń dispersiyasınıń mánisi v di tolqın uzınlıqlarınıń sheksiz kishi intervalına ótiw jolı menen alamız. Bunday jaǵdayda (2)-qatnas

$$v = \frac{dn}{d\lambda} = \frac{d}{d\lambda} f(\lambda) \quad (2a)$$

túrine iye boladı.



125-súwret.

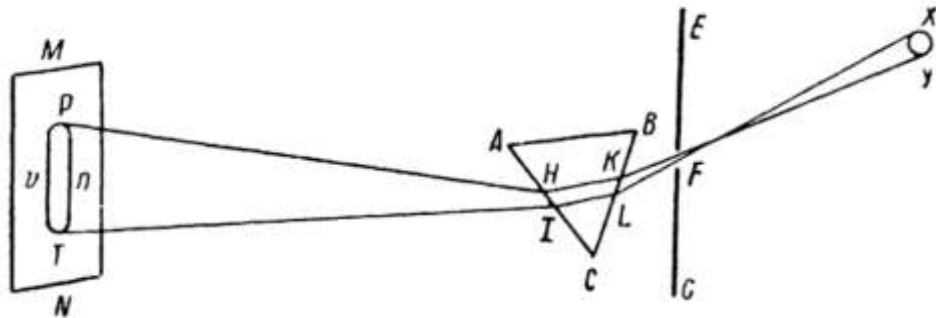
1 - shiyshe (jeńil flint), 2 - kvarc, 3 - flyuorit ushın sınıw kórsetkishi n niń tolqın uzınlıǵı λ den ǵárezligi.

Barlıq móldir zatlar ushın sındırıw koefficienti n niń mánisi tolqın uzınlıǵı λ niń kishireyiwi menen monotonlı túrde úlkeyedi. Bul belgili bolǵan móldir denelerdegi fiolet nurlardıń jasıl nurlarǵa, al jasıl nurlardıń qızıl nurlarǵa salıstırǵanda kúshlierek sinatuǵınlıǵı faktına sáykes keledi. 125-súwrette shiyshe (jeńil flint), kvarc hám flyuorit ushın n niń λ den ǵárezligi kórsetilgen. Kórinip turǵanıday, qısqa tolqın uzınlıqlarında n sındırıw kórsetkishi tolqın uzınlıǵınıń kishireyiwi menen kúshli úlkeyedi. Bunnan, (2a) teńlikten barlıq zatlardıń dispersiyasınıń san mánisi boyınsha tolqın uzınlıǵınıń kishireyiwi menen úlkeyetuǵınlıǵı kelip shıǵadı.

Hár qıylı reńlerge iye nurlar ushın sınıwdıń hár qıylı bolatuǵınlıǵı quramalı jaqtılıqtı onıń monoxromat qurawshılarına jayıwǵa múmkinshilik beredi. Bunday tájiriye 1672-jılı Nyuton tárepinen ótkerildi. Nyutonnnıń tájiriyesiniń sxeması onıń "Optika" kitabınan alınǵan 126-súwrette keltirilgen. Quyashtıń nurı kishi ójireniń EG aynasında soǵılǵan dóńgelek F tesik arqalı ótedi. Bunnan keyin, nur ABC prizmasında sınıp, MN aq qaǵazına túsedi. Bunday jaǵdayda F tesiginiń dóńgelek súwreti boyalǵan TP jolaǵına sozıladı. Jolaqtıń qızıl ushı prizmada eń kem sınǵan $FLIT$ nurına, al fiolet ushın eń kóbirek sınǵan $FKHP$ nurına sáykes keledi. TP reńli jolaǵın Nyuton *spektr* dep atadı. Quyashtıń jaqtılıǵı bir reń ekinshi reńge úzliksiz ótetuǵın tutas spektrdi beredi. Házirgi waqıtlardaǵı kóz-qaraslar boyınsha bul Quyashtıń jaqtılıǵında múmkin bolǵan barlıq tolqın uzınlıqlarına sáykes keletuǵın terbelislerdiń bar ekenligin ańǵartadı¹². Jaqtılıqtıń bazı bir jasalma dereklerin paydalanǵanda (metallardıń duzları menen boyalǵan jalinlar, elektr

¹² Haqıyqatında, Quyashtıń spektrinde onıń atmosferasındaǵı jaqtılıqtıń jutılıwınıń saldarınan payda bolatuǵın ensiz qarańǵı sızıqlar da bar boladı (Fraunhofer sızıqları). Biraq, Nyuton ótkergen tájiriyelerde bul jolaqlar kórinbegen.

razryadında jaqtılıq shıǵaratuǵın gazler h.t.b.) sıızılı spektr alınadı. Ol qarańǵı aralıqlar menen ajratılǵan ayırım jaqtılı jolaqlardan ("sızıqlardan") turadı. Bul bunday dereklerdiń jaqtılıqlarınıń belgili bolǵan tolqın uzınlıqlarına sáykes keletuǵın terbelislerden turatuǵınlıǵın kórsetedi.



126-súwret. Prizmanıń járdeminde spektrdi alıw boyınsha Nyuton ótkergen tájiriýbeniń sxeması.

Sınıw koefficienti n niń tolqın uzınlıǵı λ den ǵárezligin anıqlaytuǵın (1)-funkciyanıń analitikalıq túrin juwıq túrde bılayınsha jazıw ıyınsha jazıw aladı:

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2}. \quad (3)$$

Bunday jaǵdayda zattıń dispersiyası mınaday ańlatpa menen beriledi:

$$v = \frac{dn}{d\lambda} = -\frac{2B}{\lambda^3}.$$

Zattıń jaqtılıqtıń tarqalıwına táseri jaqtılıqtıń usı zat turatuǵın atomlar hám molekulalar menen óz-ara tásirlesiw menen baylanıslı. Bul tásirlesiw jaqtılıqtıń tarqalıw tezligi v nıń ózgerisine, usıǵan sáykes sıdırıw koefficienti $n = v/c$ niń ózgeriwine alıp keledi. Bul teńlikte c arqalı boslıqtaǵı jaqtılıqtıń tarqalıw tezligi belgilengen.

Dispersiya teoriyasınıń tiykarların jaqtılıq tolqınlarınıń atomlar menen molekulalardıń quramına kiretuǵın zaryadlangan bóleksheler (elektronlar hám oń yadrolar) menen tásirlesiwın qarawdıń tiykarında alıw múmkin. Bunday jaǵdayda atomlar menen molekulalardaǵı zaryadlangan bóleksheler ózleriniń teń salmaqlıq orınlarınıń átirapında kvaziserpimli kúshlerdiń tásirinde uslap turıladı dep esaplanadı. Solay etip, hár bir atom yamasa molekula óziniń belgili bolǵan menshikli terbelis jiyiligi ω_0 menen táriyiplenedi. Túsiwshi jaqtılıq tolqınıń tásirinde atomlar menen molekulalardaǵı zaryadlangan bóleksheler túsiwshi tolqınıń jiyiligine sáykes keletuǵın ω jiyiligi menen májbúriy túrde terbeledi.

Kelip túsetuǵın elektromagnit (jaqtılıq) tolqını zat arqalı c tezligi menen tarqalıp, bólekshelerdiń májbúriy terbelislerin júzege keltiredi. Usınıń saldarınan hár bir bóleksheniń átirapında ekinshi tolqınlar payda boladı. Bul ekinshi tolqınların amplitudası menen fazası bólekshelerdiń májbúriy terbelisleriniń amplitudası hám fazası boyınsha anıqlanadı; bólekshelerdiń májbúriy terbelisleriniń amplitudası hám fazası bolsa túsiwshi tolqınıń jiyiligi menen menshikli terbelislerdiń jiyiligi ω_0 dıń arasındadı qatnastan ǵárezli.

I tomnıń 103-paragrafında jiyiligi ω bolǵan májbúrlewshi kústıń amplitudası

$$A = \frac{h}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}} \quad (4)$$

shamasına teń bolǵan májbúriy terbelisti qozdıratuǵınlıǵı kórsetildi. Bunday terbelistiń fazası α nı mınaday formulanıń járdeminde anıqlaydı:

$$\operatorname{tg} \alpha = -\frac{2\beta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}.$$

Bul ańlatpalarda h - konstanta hám β - sistemanıń sóniwin táriyipleytuǵın koefficienti. β koefficientiniń kishi mánisinde sóniwdiń tutqan ornı menshikli terbelistiń jiyiligi ω_0 ge jaqın bolǵan májbúrlewshi kúshtiń jiyiligi ω ushın ǵana sezilerliktey boladı. Sonlıqtan ázzi sóniwde ω_0 ge júdá jaqın bolmaǵan barlıq jiyilikler ushın juwıq túrde mınaday ańlatpanı jazıwǵa boladı:

$$A = \frac{h}{\omega_0^2 - \omega^2}. \quad (4a)$$

Májbúriy terbelislerdiń amplituda menen fazası ω_0 hám ω jiyilikleriniń qatnasınan ǵárezli boladı. Rezonanstıń qasında A nıń mánisi úlken. $\omega \ll \omega_0$ bolǵan jaǵdayda A nıń mánisi ádewir kishi hám ω nıń kishireyiwi menen nolge teń bolmaǵan turaqlı shekke umtıladı. Eger $\omega \gg \omega_0$ teńsizligi orınlanatuǵın bolsa májbúriy terbelislerdiń amplitudası A májbúrlewshi kúshtiń jiyiligi ω nıń úlkeyiwi menen nolge shekem kemeyedi. Jiyilik ω nıń mánisi nolden ω_0 den kóp úlken mániske shekem úlkeygende májbúriy terbelislerdiń fazası nolgen $-\pi$ ge shekem ózgeredi. Rezonanstıń qasında (sóniw kishi bolǵanda) fazanıń shaması $-\pi/2$ ge jaqın. Tap usınday juwmaqlar ekinshi tolqınlardıń amplitudası menen fazasına da tiyisli.

Ekinshi tolqınlar birinshi tolqın menen qosılıp amplitudası hám fazası birinshi tolqınnıń amplitudası menen fazasına ózgeshe bolǵan qosındı tolqındı payda etedi. Bul tolqınnıń zat arqalı tarqalǵanda fazalıq tezliginiń boslıq arqalı tarqalǵandaǵı fazalıq tezliginen ózgeshe bolatuǵınlıǵına alıp keledi. Bólekshelerdiń májbúriy terbelisleri qanshama kúshli bolsa, tezliklerdiń arasındaǵı ayırma da sonshama úlken boladı.

Bunnan, jiyiligi atomlar menen molekulalardıń terbelisleriniń menshikli jiyiliklerinen kishi bolǵan jaqtılıqtıń (elektromagnit tolqınnıń) zat arqalı is júzinde jiyilikten ǵárezsiz, Biraq jaqtılıqtıń boslıqtaǵı tezliginen basqa bolǵan tezlik penen tarqalatuǵınlıǵı kelip shıǵadı (sebebi $A \approx const \neq 0$)¹³.

Jiyiligi atomlardıń menshikli terbelis jiyiliklerinen sezilerliktey úlken bolǵan joqarı jiyilikli jaqtılıq ushın, ekinshi tolqınlardıń amplitudaları nolge jaqın hám ol zat arqalı jaqtılıqtıń boslıqtaǵı tarqalıw tezligine jaqın tezlik penen ótedi. Onıń ushın sındırıw koefficientiniń mánisi 1 ge jaqın. Teoriyadan qarap ótilgen eki jaǵdayda da jaqtılıqtıń jutılıwınıń kishi bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı. ω_0 ge jaqın bolǵan ω jiyiliklerde zattaǵı jaqtılıqtıń tezligi jaqtılıqtıń boslıqtaǵı tezliginen úlken shamaǵa ózgeshe boladı. Usınıń saldarınan usınday jiyiliklerde sınıw koefficienti de 1 den kúshli ayırmaǵa iye: $\omega < \omega_0$ teńligi orınlanǵan jaǵdayda onıń mánisi "anomallıq" úlken mániske, al $\omega > \omega_0$ teńligi orınlanǵan jaǵdayda "anomallıq" kishi mániske iye boladı. Sonıń menen birge ω_0 ge jaqın bolǵan ω jiyiliklerde májbúriy terbelislerdiń úlken mánisleriniń saldarınan jutıw da úlken mániske iye boladı.

Eger zat menshikli terbelis jiyilikleriniń mánisleri ω_{0i} diń jıynaǵınan turatuǵın atomlar menen molekulalardan turatuǵın bolsa, onda bunday zat ózi arqalı ensiz oblastlarǵa ("sızıqlarǵa") iye bolǵan spektrge iye jaqtılıqtı ótkeredi. Jutıw sızıqlarınan uzaqta jaylasqan oblastlarda sındırıw koefficientiniń mánisi turaqlı boladı hám jiyiliktiń ózgeriwi menen tez ózgeredi, jaqtılıqtıń zat penen tásirlesiwi kúshli bolǵan hár bir jutılıw sızıǵınıń qasında 1 den úlken shamaǵa ózgeshe ayrıladı.

Dispersiya teoriyasın sındırıw koefficienti n menen dielektriklik turaqlı ϵ arasındaǵı baylanıs tiykarında da dúziwge boladı.

Jaqtılıqtıń elektromagnitlik teoriyası boyınsha, sındırıw koefficientiniń mánisi 275-paragraftaǵı (2)-teńliktiń járdeminde anıqlanadı:

$$n = \sqrt{\epsilon\mu}.$$

Barlıq móldir dielektrikler ushın magnit sińirgishligi μ dıń mánisi 1 ge teń. Sonlıqtan

¹³ Bul tezlik 275-paragraftaǵı (1)-formulanıń járdeminde anıqlanadı. Bunday jaǵdayda dielektriklik turaqlı ϵ nıń mánisi ushın elektrostatikalıq tájiriybelerde alıńǵan mánisti alıwǵa, al $\mu = 1$ shamasına teń boladı.

$$n^2 = \varepsilon$$

teńligine iye bolamız.

275-paragrafta atap ótilgendey, dielektriklik turaqlı ε mánisi degende onıń statikalıq yamasa ástelik penen ózgeretuǵın elektrlik processlerdegi mánisi túsınıledi. II tomda biz zatlardıń dielektriklik qásiyetleriniń olardıń polyarizaciyası menen, al polyarizaciyanıń óziniń zatlardaǵı atomlar menen molekulalardıń ishindegi zaryadlangan bólekshelerdiń teń salmaqlıq ornınan awısıwınıń saldarınan payda bolatuǵınlıǵın kórdik. Jaqtılıq tolqınında orın alatuǵın tez ózgeretuǵın elektr maydanları ushın bul awısıwlar (4)- yamasa (4a) tipindegi aǵzalar menen ańlatıladı. Sonlıqtan, mayda-shúydesine shekem esapqa alıp ótkerilgen esaplawlar sındırıw koefficientiniń kvadratınıń

$$n^2 = 1 + \frac{a_1}{\omega_{01}^2 - \omega^2} + \frac{a_2}{\omega_{02}^2 - \omega^2} + \dots \quad (5)$$

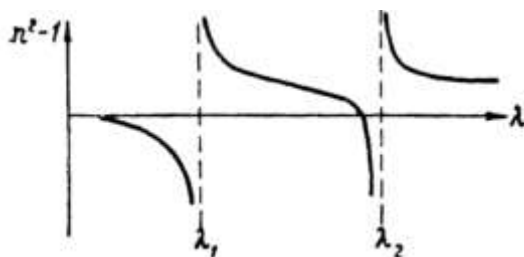
túrindegi ańlatpanıń járdeminde anıqlanatuǵınlıǵın kórsetedi. Bul ańlatpada ω_{01} , ω_{02} , ... arqalı atomlar menen molekulalardıń menshikli terbelisleriniń jiyilikleri, a_1 , a_2 , ... arqalı belgili bolǵan koefficientler belgilengen. Tolqın uzınlıǵı λ niń mánisi cikllıq jiyilik penen

$$\lambda = \frac{2\pi c}{\omega}$$

túrindegi ańlatpa arqalı baylanısqa bolǵanlıqtan (c arqalı boslıqtaǵı jaqtılıqtıń tezligi belgilengen), (5)-formulaǵa mınaday túrdi beriwge boladı

$$n^2 = 1 + \frac{b_1 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_1^2} + \frac{b_2 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_2^2} + \dots \quad (5a)$$

Bul teńlikte b_1 , b_2 , ... ler arqalı jańa konstantalar belgilengen, al λ_1 , λ_2 , ... ler arqalı dál rezonansqa sáykes keletuǵın tolqın uzınlıqları belgilengen. (5a) formula jutıw sızıqlarınıń arasındaqı sındırıw koefficientiniń júrisin beredi. Eger (5a) formulada eki aǵza menen sheklensek (eki menshikli terbelis jiyiliklerine iye bolǵan zat), onda $n^2 - 1$ shamasınıń λ den 127-súwrette kórsetilgen ǵárezligi alınadı. Punktir sızıqlar zattıń λ_1 hám λ_2 sızıqlarınıń orınların anıqlaydı. Jutıw iymekligine jaqın orınlarda dispersiya iymekligi keskin túrde mayısadı. Hár bir jutıw sızıǵınıń qasında kishi tolqın uzınlıqları tárepinde ($\lambda < \lambda_i$) sındırıw koefficienti n kishi mánislerge, al uzın tolqınlar tárepinde ($\lambda > \lambda_i$) júdá úlken mánislerge iye boladı. (5a) formula boyınsha λ_i tolqın uzınlıǵınan kishi hám oǵan dım jaqın tolqın uzınlıǵı ushın n^2 shamasınıń teris mánisi alınadı, al ol n ushın jormal mánisti beredi. Bul sóniw koefficienti β nı esapqa almaǵannıń aqibeti bolıp tabıladı. Sonlıqtan (5a) formulanı β júdá kishi bolǵan jaǵdaylarda ǵana paydalanıwǵa boladı. Jutıw sızıǵınan alista n sınıw koefficientiniń mánisi turaqlı shamaǵa jaqınlasadı.

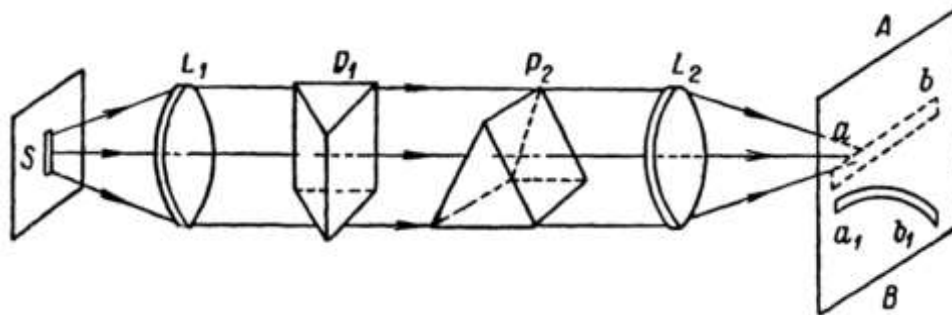


127-súwret.

λ_1 hám λ_2 jutıw sızıqlarınıń qasındaǵı sındırıw koefficienti n niń tolqın uzınlıǵı λ den ǵárezligi.

127-súwrette kórsetilgen jutıw sızıǵınıń qasında ózine tán iymekliklerge iye bolǵan dispersiyanıń ulıwmalıq júrisin "anomallıq" dispersiya dep ataydı. Haqıykatında bul jaǵdayda hesh qanday "anomallıq" joq, kerisinshe, ol qubılıstıń fizikalıq mánisine juwap beretuǵın ózine tán júristi kórsetedi. Eki jutıw sızıǵınıń arasındaqı sınıw koefficientiniń monotonlı ózgeriwiniń oblastı móldir zatlardıń dispersiyanıń xarakterin beredi (125-súwret) hám *normal dispersiya* atamasına iye.

§ 280. Dispersiyanı baqlaw. Ótken paragrafta bayanlangan Nyutonniń prizmadaǵı jaqtılıqtıń sınırı boyınsha ótkergen tájiriybeleri dispersiyanı baqlaw boyınsha ótkerilgen eń birinshi tájiriybelerden bolıp tabıladı. Nyuton prizmalardıń járdeminde dispersiyanı baqlawdıń bir qatar usılların islep shıqtı. Olardıń ishinde dispersiyanıń júrisin kórgizbeli túrde tabatuǵın atanaq túrinde prizmalar usılı bolıp tabıladı. Kese qoyılǵan prizmalar usılınıń sxeması 128-súwrette keltirilgen. Aq jaqtılıq vertikal baǵıttaǵı S sańlaǵı hám sındırıwshı qabırǵaları óz-ara perpendikulyar bolǵan eki P_1 jáne P_2 prizmaları arqalı ótedi. Sındırıwshı qabırǵası vertikal baǵıtta jaylasqan tek bir P_1 prizması bar bolǵan jaǵdayda AB ekarında ab punktir sızıǵı menen súwretlengen gorizont baǵıtındaǵı tutas spektr alıńǵan bolar edi. Ekinshi prizma bolǵan jaǵdayda P_2 prizmasınıń sındırıw koefficienti qanshama úlken bolsa nur tómengge qaray sonshama kóbirek awıstırıladı. Usınıń saldarınan barlıq ab spektri tómengge qaray awısqan hám a_1b_1 awhalın iyelegen bolar edi. Onıń qızıl ushı tómengge qaray eń kem, al fiolet ushı hámмесinen kóp awısadı. Tap sol sıyaqlı spektrdiń hár bir basqa ornı spektrdiń usı ornına sáykes keletuǵın tolqın uzınlıǵı ushın sındırıw koefficienti qansha úlken bolsa, soǵan sáykes kóbirek awısadı. Barlıq jolaq iymeygen boladı hám P_2 prizmadaǵı dispersiyanıń júrisin kórgizbeli túrde kórsetedi.



128-súwret. Atanaq túrde qoyılǵan prizmalar usılı.

SHiyshelerdiń, kvarctıń, flyuorittiń hám basqa da kóp sanlı zatlardıń spektrdiń kózge kórinetuǵın oblastındaǵı dispersiyası tiykarınan ultrafiolet oblastta kúshli jutılıw jolaǵınıń bar ekenligi menen anıqlanadı. Bul zatlardaǵı jutılıwdıń ekinshi oblastı alısaraq infraqızıl oblastta jatadı hám kemirek kórinedi. Spektrdiń kózge kórinetuǵın oblastı ushın n^2 shamasınıń λ den ǵárezligin juwıq túrde 279-paragraftaǵı (5a) formulanıń járdeminde mınaday bir aǵza menen beriwge boladı:

$$n^2 \cong 1 + \frac{b}{1 - \frac{\lambda_1^2}{\lambda^2}}.$$

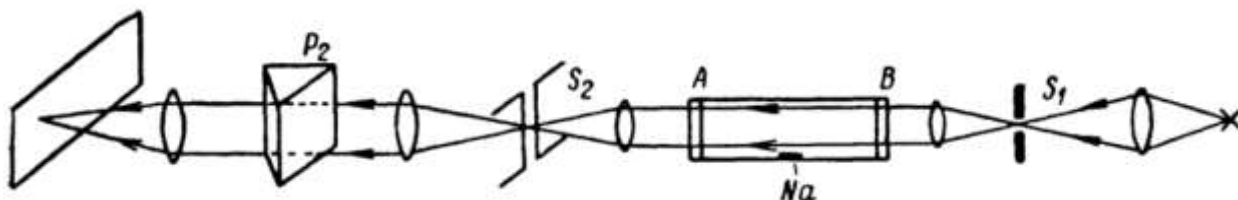
Bul formulanıń oń tárepini qatarǵa jaysaq, mınanı alamız:

$$n^2 \cong 1 + b \left[1 + \left(\frac{\lambda_1}{\lambda} \right)^2 + \left(\frac{\lambda_1}{\lambda} \right)^4 + \dots \right].$$

$\frac{\lambda_1}{\lambda} \ll 1$ shárti orınlanganda sońǵı ańlatpa n ushın juwıq túrdegi

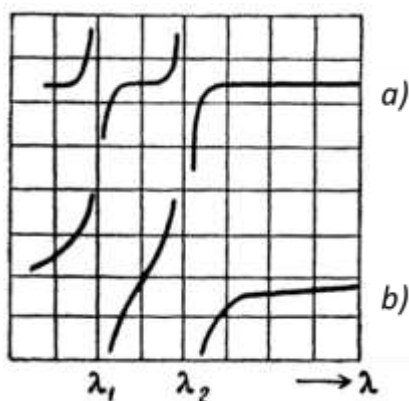
$$n^2 \cong A + \frac{B}{\lambda^2} \quad (1)$$

ańlatpasın beredi. Bul ańlatpada A, B arqalı bazı bir konstantalar belgilengen. (1)-formula bunnan burınǵı paragraftıń (3)-formulasına sáykes keledi. Solay etip, móldir zatlar ushın juwıq formulanıń qollanıwǵa bolatuǵınlıǵı teoriyalıq jaqtan dálillenedi.



129-súwret. Natriydiń puwlarındaǵı anomallıq dispersiyanı baqlaw usılı.

Anomallıq dispersiya spektrdiń kózge kórinetuǵın oblastında keskin túrdegi jutılıw sızıqların beretuǵın metallardıń puwlarında barlıǵınan ańsat baqlanadı. Mısalı, sarı oblastta natriydiń puwları tolqın uzınlıqları $\lambda_1 = 0,5890$ mkm hám $\lambda_2 = 0,5896$ mkm bolǵan júdá intensivli bolǵan bir birine jaqın jaylasqan eki jutılıw sızıqların beredi. Natriydiń puwlarındaǵı "anomallıq" dispersiyanı baqlaw ushın Vud atanaq túrde qoyılǵan prizmalar usılın paydalandı. Onıń tájiriybesiniń sxeması 129-súwrette kórsetilgen. Tutas spektrge iye derekten shıqqan jaqtılıq gorizont baǵıtındaǵı sańlıq arqalı hám bunnan keyin parallel dáste túrinde ishinde metall natriy bar hawası sorıp alıńǵan AB ıdı arqalı ótedi. ıdı arqalı ótken nur S_2 sańlaq arqalı ótip P_2 prizmada spektrge jayıladı. Prizmanıń sındırıwshı qabırǵası S_2 sańlaǵına parallel hám spektr gorizont baǵıtındaǵı jolaq túrinde alınadı. Gorizont baǵıtındaǵı sańlaqtıń bolǵanlıǵı sebepli bul jolıq tar. Eger metall natriydi AB ıdısında qızdırsaq hám usınıń menen bir waqıtta usı ıdıstıń joqarǵı bólimin salqınlatısaq, onda onıń ishinde natriydiń puwlarınıń bir tekli bolmaǵan baǵanası alınadı. Tómende puwdıń tıǵızlıǵı úlken, al joqarıda kishi boladı. Puwlardıń usınday bir tekli bolmaǵan baǵanası sındırıwshı qabırǵası joqarıda hám ıdıstıń uzınlıǵına perpendikulyar bolǵan prizma sıpatında xızmet etedi. Nátiyjede P_2 prizmaǵa atanaq túrde jaylastırılǵan natriydiń puwlarınan alıńǵan "prizma" alınadı. Joqarıda ayılǵanday, bul prizma spektrdiń barlıq oblastın jılistiradı. Biraq, endi natriydiń puwlarınıń dispersiyasınıń anomallıq xarakterine baylanıslı awıstırılǵan spektr monotonlı túrde iymeygen bolmaydı, al λ_1 hám λ_2 tolqın uzınlıqlarınıń qasında mayısqan bolıp shıǵadı. λ_1 hám λ_2 tolqın uzınlıqlarına juwap beretuǵın orınlarda qarańǵı jutılıw jolaqları payda boladı. 130a súwrette alınatuǵın spektrdiń mayısıwı kórsetilgen. Jutılıw sızıǵınıń úlken tolqın uzınlıqları tárepinde spektr tómengen qaray kúshli awısqan. Bul jaǵday bul oblasttaǵı natriydiń sındırıw koefficientiniń úlken mánislerine sáykes keledi. Jutılıw sızıǵınıń qısqa tolqın uzınlıqları tárepinde spektr joqarı qaray mayısqan. Bul sındırıw koefficientiniń $n < 1$ bolǵan mánisine sáykes keledi. Jutılıw sızıqlarınıń ekewiniń arasında sındırıw koefficientiniń mánisi tolqın uzınlıǵınıń úlkeyiw tárepine qaray keskin kishireydi. Puwdıń úlken tıǵızlıqlarında spektrdiń mayısıwı úlkeyedi hám 130b súwrettegi túrge iye boladı.



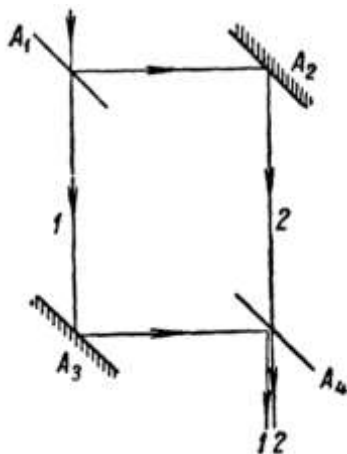
130-súwret.

Natriydiń puwlarındaǵı jutılıw sızıqlarınıń qasındaǵı anomallıq dispersiya: a) natriy puwlarınıń kishi hám b) natriy puwlarınıń úlken koncentraciyalarındaǵı.

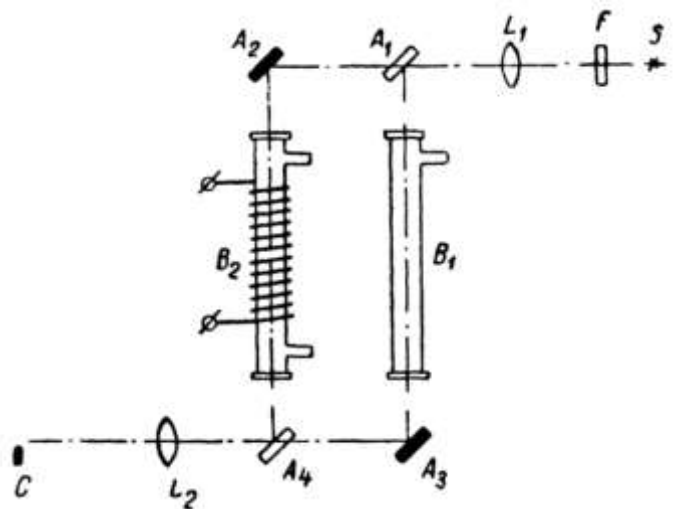
Anomallıq dispersiyanı úyreniwdiń basqa usılı D.S.Rojdestvenskiy tárepinen usınıldı. Bul usılda Jamenniń ózgerilgen interferometri qullanıldı (264-paragraf). 1 hám 2 dásteleri bir birinen kóp santimetrge ajralatuǵınday etip ózgerilgen. Rojdestvenskiydiń interferometri 131-súwrette keltirilgen. Bul súwrette A_1 , A_2 , A_3 hám A_4 ler tórt tegis ayna, olardıń ishindegi A_2 menen A_3 aynaları tutas, al qalǵan

ekewi yarım móldir. A_1 menen A_2 aynalarındaǵı shaǵılıswlarda kúshli ajratılǵan 1 hám 2 jaqtılıq dásteleri alınadı. Bunnan keyin olar A_3 hám A_4 aynalarınıń járdeminde qaytadan jıynaladı hám interferenciyanaladı.

D.S.Rojdestvenskiy óziniń interferometrin anomallıq dispersiyanı úyreniw ushın paydalandı. Rojdestvenskiydiń usılınıń mánisi mınadan ibarat: interferometrdiń eki shaqasına birdey bolǵan eki B_1 hám B_2 kyuvetaları jaylastırıladı (132-súwret). Kyuvetalarınıń birine, misalı B_2 ge izertlenetuǵın metallirgiziledi; bul kyuvetanı zárúrli bolǵan basımda onıń ishindegi metaldıń puwları payda bolǵansha elektr qızdırǵışınıń járdeminde qızdırıladı. Ekinshi kyuvetanıń ishindegi hawa sorıp alınadı. Interferometr arqalı tutas spektrge iye bolǵan S dereginen shıqqan jaqtılıq ótedi. Payda bolǵan interferenciyalıq súwret L_2 linzasınıń járdeminde spektrografınıń C sańlaǵına proekciyanaladı. B_2 kyuvetası qızdırılmaǵan hám onda puwlar joq dep boljayıq. Bunday jaǵdayda interferometr spektrograftıń sańlaǵında sańlaqtıń uzınlıǵına perpendikulyar bolǵan jolaqtar túrindegi bir qatar interferenciyalıq maksimumlar menen minimumlardı beredi. Nollık júrisler ayırmasına sáykes keletuǵın maksimumnıń ornı tolqın uzınlıǵınan ǵárezli emes. Bunnan spektrograf tárepinen beriletuǵın tutas spektrdegi bul maksimumǵa spektr boyınsha jayılǵan gorizont baǵıtındaǵı jaqtılı jolaqtıń juwap beretuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Júrisler ayırması bir, eki, úsh h.t.b. tolqın uzınlıqlarına sáykes keletuǵın maksimumlar bolsa túsiwshi tolqınnıń hár qıylı uzınlıqları ushın sańlaqtıń hár qıylı biyikliklerinde jaylasadı. Olarǵa nollık jolaqtıń ústinde hám astında jaylasqan jáne spektrdiń kók oblastınan qızıl oblastına jelpiwishtey (veerdey) bolıp ashılǵan jaqtılı jolaqlar juwap beredi. Jaqtılı jolaqlardıń arasında sańlaqqa qaray jiberilgen interferenciyalıq súwrettegi minimumlarǵa sáykes keletuǵın qarańǵı jolaqlar jaylasadı. Nátiyjede tutas spektr barlıq uzınlıǵı boyınsha izbe-iz jaqtılı hám qarańǵı jolaqlar menen sızilǵan bolıp alınadı.



131-súwret. D.S.Rojdestvenskiy interferometrinin sxeması.

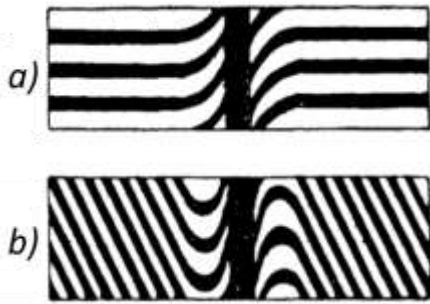


132-súwret. Anomallıq dispersiyanı baqlawdıń D.S.Rojdestvenskiy usılı.

Eger endi B_2 kyuvetasın onıń ishinde izertlenip atırǵan metaldıń puwları payda bolaman degenshe qızdırsaq, onda bul puwlardıń baǵanaları qosımsha júrisler ayırmasın beredi hám interferenciyalıq jolaqlar usı qosımsha júrisler ayırmasına proporcional bolǵan shamaǵa jılasadı. Puwlardıń berilgen baǵanasındaǵı júrisler ayırması $n - 1$ shamasına proporcional (n arqalı puwlardıń sındırıw koefficienti belgilengen). Usınıń saldarınan spektrograftaǵı interferenciyalıq jolaqlardıń awısıwı barlıq baqlanatuǵın oblasttıń dispersiyasınıń júrisin tikleydi. Eger bul oblastqa izertlenetuǵın puwdıń qanday da bir jutıw sızıǵı kiretuǵın bolsa, onda interferenciyalıq jolaqlar onıń átirapında 133a súwrette kórsetilgendey bolıp iymeydi. Olardıń iymeyiwı jutılıw sızıǵınıń qasındaǵı sındırıw kórsetkishiniń júrisin kórgizbeli etip súwretleydi.

Keyinirek Rojdestvenskiy joqarıda kórsetilgen usıldı dál sanlı ólshewlerdi júrgiziwge bolatuǵınday dárejede jetilistirdi. Ol eger interferometrdiń ekinshi shaqasına shiysheden soǵılǵan tegis parallel plastinkanı ornalasır, onda spektrograftaǵı interferenciyalıq jolaqlardıń iyiletuǵınlıǵın hám jutılıw sızıǵınıń qasında ózine tán "ilmeklerdiń" payda etetuǵınlıǵın kórsetti (133b súwret). SHıyshe plastinkanıń berilgen qalınlıǵında "ilmeklerdiń" ornı puwlardıń qarap atırılǵan jutılıw sızıǵınıń qasındaǵı dispersiyanıń shaması menen anıqlanadı. Sızıqtıń qasındaǵı puwlardıń dispersiyası qanshama kúshli bolsa, "ilmekler"

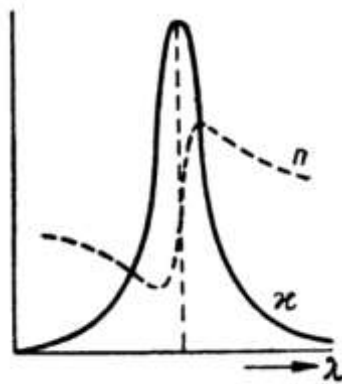
sızıqtan alısıraqta payda boladı. Solay etip, "ilmeklerdiń" turǵan ornı boyınsha jutılıw sızıǵınıń qasındaǵı puwlardıń dispersiyasınıń shamasın tikkeley ólsheuge boladı eken.



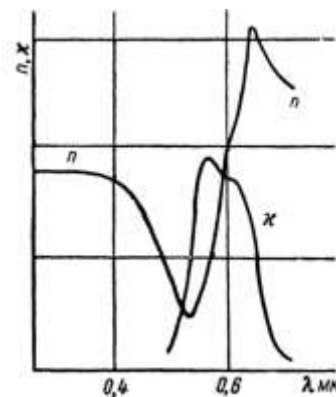
133-súwret.

Jutılıw sızıǵınıń qasındaǵı interferenciyalıq iymekliklerdiń iyiliwi.

279-paragraftaǵı (5)-dispersiya formulası elektronlardıń terbelisleriniń sóniwi kishi dep esaplangan jaǵdaylar ushın alınǵan.



134-súwret. Jutıw jolaǵı oblastındaǵı jutıw koefficienti κ menen sındırıw koefficienti n niń tolqın uzınlıǵı λ den ǵárezligi.



135-súwret. Cianin ushın jutıw koefficienti κ menen sındırıw koefficienti n niń tolqın uzınlıǵı λ den ǵárezligi.

Sóniwdi esapqa alıw sındırıw koefficienti n niń jıyılık ω dan ǵárezliginiń 279-paragraftaǵı (5)-formula beretuǵın ǵárezlikten ádewir quramalı bolǵan ǵárezlikti beredi. Eger κ arqalı 278-paragraftaǵı (1a) formula menen anıqlanatuǵın jutıw koefficienti belgilengen bolsa, onda n menen κ shamalarınıń arasındaǵı baylanıs mınaday túrge iye boladı:

$$\left. \begin{aligned} 2n^2\kappa &= \sum_i \frac{a_i g_i \omega}{(\omega_{0i}^2 - \omega^2)^2 + g_i^2 \omega^2}; \\ n^2(1 - \kappa^2) &= 1 + \sum_i \frac{a_i(\omega_{0i}^2 - \omega^2)}{(\omega_{0i}^2 - \omega^2)^2 + g_i^2 \omega^2}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Bul formulalardaǵı a_i, g_i hám ω_{0i} ler belgili bolǵan konstantalar. $g_i = 0$ teńligi orınlanganda bul formulalardıń birinshisi $\kappa = 0$ teńligin beredi, al ekinshisi bolsa 279-paragraftaǵı (5)-formulaǵa ótedi. Bir neshe jutılıw jolaqları bar bolǵan jaǵdayda (2)-formulalarǵa i indeksiniń hár qıylı mánislerine sáykes keletuǵın aǵzalardıń qosındısı kiredi.

(2)-formulalar keń jutıw jolaǵınıń ishindegi sındırıw koefficientiniń qalayınsha júretuǵınlıǵın anıqlawǵa múmkinshilik beredi. 134-súwrette punktir sızıq n niń λ den, al tutas sızıq κ niń λ den ǵárezligin súwretleydi. Kórinip turǵanıday, bul jaǵdayda sındırıw koefficienti uzın tolqınlar tárepte úlken mánislerge, al qısqa tolqınlar tárepte kishi mánislerge iye boladı. Jutılıw jolaǵınıń ishinde bolsa sındırıw koefficientiniń úlken mánisinen kishi mánisine bir tegis ótiwi orın aladı. Jolaqtıń ishinde sındırıw koefficienti tolqın uzınlıǵınıń kishireyiwi menen kishireyedi, yaǵnıy móldir denelerdegi júriske qatnası boyınsha keri ("anomallıq") júristi beredi.

Eger sındırıw koefficientiniń júrisine tásir etiw ushın zattıń jutıwı ádewir úlken bolıwı kerek. Mısalı, boyalğan shiyshelerde ádette dispersiyanıń "anomallıq" júrisi baqlanbaydı. Sebebi ultrafiolet hám infraqızıl oblastlarındaǵı kúshli jutılıw tiykargı orındı iyeleydi. Jutıwdıń dispersiyanıń júrisine táhiri eksperimentallıq usıllar menen XIX ásirdeń aqırında kúshli boyawshı zatlarda (fuksin, cianin) úyrenildi. Ólshewlerdi jutılıw jolaǵınıń ishinde júrgiziw ushın boyawshı zatlardı juqa qatlamlar túrinde alıw kerek.

135-súwrette cianin ushın (2)-formula menen jaqsı sáykes keletuǵın jutıw koefficienti κ menen sındırıw koefficienti n di eksperimentallıq ólshewdiń nátiyjeleri keltirilgen. Ólshewler shiyshenge jelimlengen qattı cianinniń júdá juqa ótkir prizmalarında ótkerildi.

Dispersiyalıq formulanı keltirip shıǵarǵanda túsiwshi tolqınıń tásirinde májbúriy terbeletuǵın zaryadqa qońsıl as atomlar menen molekulalardaǵı zaryadlar tásir etpeydi dep boljanadı. Jetkilikli dárejede úlken basımlarda turǵan gazler ushın, bunday jaǵdayda suyıq hám qattı deneler ushın bunday boljaw duris emes. Bunday jaǵdayda hár bir berilgen zaryadqa qońsıl as zaryadlardıń tásirin esapqa alıw zárúr. Bunday esapqa alıw jaqtılıqtıń sınıw koefficientiniń kólem birligindegi bólekshelerdiń sanınan, yaǵnıy zattıń tıǵızlıǵınan ǵárezlikke alıp keledi. Teoriya bunday jaǵdayda zattıń sındırıw koefficienti n menen onıń tıǵızlıǵı δ arasında salıstırmalı ápiwayı qatnastıń orın alatuǵınlıǵın kórsetedi:

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \cdot \frac{1}{\delta} = \text{const.} \quad (3)$$

(3)-qatnas 1880-jılı bir waqıtta hám bir birinen ǵárezsiz G.A.Lorenc hám L.Lorentc tárepinen keltirip shıǵarıldı hám Lorenc-Lorentc formulası atamasına iye boldı. $\frac{n^2-1}{n^2+2} \cdot \frac{1}{\delta}$ shamasın *zattıń refrakciyası* R dep ataladı. Tájiriybeler haqıyqatında da, kóp jaǵdaylarda basımnıń astında, temperatura ózgergende hám hátte agregat hal ózgergende móldir zattıń tıǵızlıǵı ózgergende R refrakciyanıń turaqlı bolıp qalatuǵınlıǵın kórsetedi.

IV keste.

δ , tıǵızlıq	Refrakciya, $R \cdot 10^7$	$(n - 1) \cdot 10^4$
1	1953	2,8
42,1	1959	12,4
96,2	1961	28,4
149,5	1956	44,2

IV kestede kózge kórinetuǵın spektrdiń orta bólimi ushın hár qıylı basımdaǵı hawanıń refrakciyası R diń mánisleri keltirilgen.

Kórinip turǵanıday, hawanıń tıǵızlıǵı 150 ese úlkeygende refrakciya R baqlawlardıń dálligi sheklerinde ózgerissiz qaladı, al sonıń menen bir waqıtta $n - 1$ shaması (n arqalı sındırıw koefficienti belgilengen) kúshli ózgeredi. Aralaspalar payda bolǵanda R refrakciya additivli túrde qosıladı. Eger R_i arqalı aralaspanıń bir qurawshısınıń refrakciyasın hám m_i arqalı usı qurawshınıń massasını belgilesek, onda aralaspanıń refrakciyası R mınaǵan teń boladı:

$$mR = \sum_i m_i R_i. \quad (4)$$

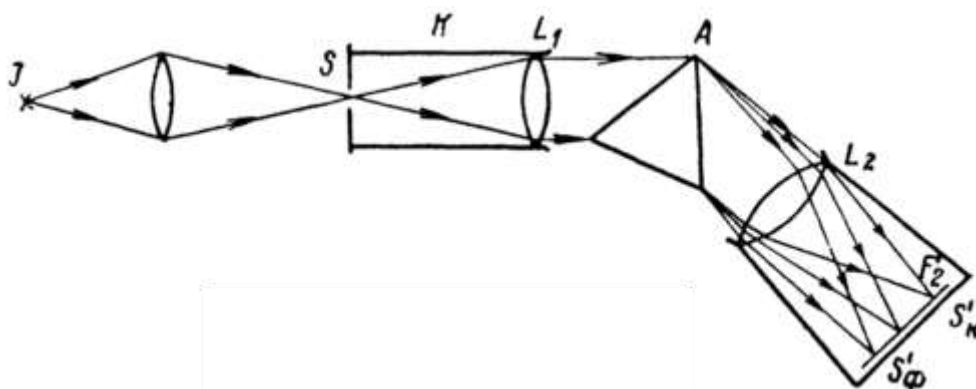
Bul teńlikte m arqalı aralaspanıń kólem birliginiń massası belgilengen.

Fizikalıq ximiyada kóp jaǵdaylarda quramalı zattıń refrakciyasın onı qurawshı elementlerdiń refrakciyalarınıń qosındısı túrinde tabıw múmkin boladı. Atomlıq refrakciya degende berilgen ximiyalıq elementtiń R_i refrakciyası menen onıń atomlıq salmaǵı A_i nıń kóbeymesine aytadı. Tap sol sıyaqlı, molekulalıq refrakciya haqqında ǵáp etkende quramalı zattıń R refrakciyasınıń molekulalıq salmaq M menen kóbeymesin názerde tutadı. Molekulalıq refrakciya berilgen birikpeni payda etetuǵın elementlerdiń atomlıq refrakciyalarınıń qosındısınan ibarat. Eger molekulada berilgen atomnıń sanı k_i bolsa, onda molekulalıq refrakciya ushın mınaǵan iye bolamız:

$$MR = \sum_i k_i A_i R_i. \quad (5)$$

(4)- hám (5)-qatnasların orınlanatuǵı tek berilgen sorttaǵı bólekshelerdiń arasında óz-ara tásirlesiwdiń orın alatuǵı kórsetedi. Hár qıylı sorttaǵı bóleksheler bir biri menen tásirlesetuǵın bolsa, onda refrakciyalardıń additivli túrde qosılıw qaǵıydası orınlanbaydı.

§ 281. Prizmalıq spektrallıq ásbaplar. 279-paragrafta Nyutonniń spektrdi prizmanıń járdeminde alıw boyınsha tájiriýbeleri táriyiplendi. Házirgi waqıtları spektrlerdi úyreniw ushın vizuallıq baqlawlar ótkeriw yamasa spektrlerdiń fotosúwretlerin túsiriw ushın paydalanılatuǵın spektroskoplar yamasa spektrograflar dep atalatuǵın prizmalıq ásbaplar jiýi qollanıladı.



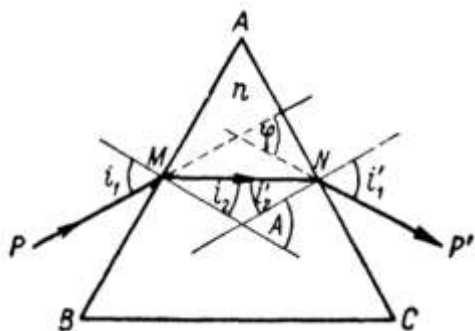
136-súwret. Prizmalıq spektrograftıń sxeması.

Prizmalıq spektrograftıń sxeması 136-súwrette keltirilgen. Bul súwrette S - sańlaq, K arqalı L_1 obektivi bar kollimatorlıq truba belgilengen, A - prizma, L_2 - fokallıq tegisliginde spektr payda bolatuǵın ekinshi obektiv. S sańlaǵı linzaniń járdeminde úyreniletuǵın I dereginen kelip túsетуǵın jaqtılıq penen jaqtılandırıladi. Kollimatordıń maqseti nurlardıń parallel dástesin alıwdan ibarat bolıp, bul dáste bunnan keyin prizmaǵa kelip túsedi. Meyli, sańlaq qanday da bir monoxromat jaqtılıq, misalı qızıl jaqtılıq penen jaqtılandırılatuǵın bolsın; bunday jaǵdayda prizma nurlardı tek buradı hám L_2 obektivi óziniń bas fokallıq tegisliginde sańlaqtıń súwreti S'_q tı payda etedi. Eger sańlaqtı tolqın uzınlıǵı basqa bolǵan monoxromat nur menen jaqtılandırısaq (misalı, fiolet jaqtılıq penen), onda prizma nurlardı kúshlirek buradı hám sańlaqtıń súwreti S'_f basqa orında alınadı. Eger derek tolqın uzınlıǵı hár qıylı bolǵan $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$ monoxromat nurlarınıń jıynaǵınan turatuǵın bolsa, onda spektr ayırım jaqtılı sızıqlardan turadı, olardıń hár qaysısı sáykes tolqın uzınlıǵına iye jaqtılıqtaǵı sańlaqtıń súwreti bolıp tabıladi (sızıqlıq spektr). Sańlaq aq jaqtılıq penen jaqtılandırılatuǵın bolsa, onıń hár qıylı reńlerdegi súwretleri bir biriniń ústine túsip, úzliksiz boyalǵan jolaqtı beredi (tutas spektr).

Kózge kórinetuǵın hám jaqın infraqızıl oblasttaǵı spektrlerdi úyreniw ushın spektrograftıń prizmaları shiysheden soǵıladı. Ultrafiolet oblasttaǵı spektrlerdi úyreniw ushın linzalar menen prizmalar soǵılatuǵın zatlar ultrafiolet oblastta móldir bolıwı kerek; usınday zatlar sıpatında ádette kvarc paydalanıladı.

Spektrograftıń jumıs islewiniń sanlıq xarakteristikasınıń beriw ushın simmetriyalı úsh qaptalı prizmadaǵı jaqtılıqtıń sınıwın qaraymız (137-súwret). PM monoxromat nurı prizmada sınıp, onnan túsken nurdıń baǵıtı menen φ múyeshin jasaytuǵın NP' baǵıtta shıǵadı. Berilgen prizma ushın awısıw múyeshi φ diń shaması PM nurınıń prizmaǵa túsıw múyeshi i_1 den ǵárezli. Bul i_1 múyeshiniń bazı bir belgili bolǵan mánisinde awısıw múyeshi φ diń shaması minimum bolǵan φ_0 shamasına jetedi. φ_0 diń bul mánisin *eń kishi awısıw múyeshi* dep ataydı.

Sáykes esaplaw nurdıń prizma arqalı simmetriyalı ótkende, yaǵnıy MN nurı prizmanıń tiykarı BC ǵa parallel bolǵanda $\varphi = \varphi_0$ teńligi orınlanadı. Endi usı jaǵdayǵa itibar beremiz hám eń kishi awısıw múyeshi φ_0 diń shamasın prizmanıń sındırıwshı múyeshi A menen prizma soǵılǵan zattıń sındırıw koefficienti menen baylanıstıramız.



137-súwret.
Jaqtılıqtıń prizmadaǵı sınırı.

Prizmanıń birinshi AB qaptalındaǵı nurdıń sınırıw múyeshin i_1 arqalı belgileymiz. Meyli, MN nurı AC qaptalına túsiw múyeshin i'_2 arqalı belgileyik. 137-súwretten mınaday jaǵdayǵa iye bolamız:

$$i_1 + i'_2 = A.$$

MN nurı prizma arqalı simmetriyalı túrde ótkende $i'_2 = i_2$ teńligi orınlanadı hám sońǵı teńlikten mınanı tabamız:

$$i_2 = \frac{A}{2}. \quad (1)$$

Bunnan keyin, súwretten mınaday teńlikti alamız:

$$\varphi_0 = (i_1 - i_2) + (i'_1 - i'_2).$$

Eń kishi burılıw múyeshinde $i'_2 = i_2$ hám $i'_1 = i_1$ teńlikleri orınlanatuǵın bolǵanlıqtan

$$\varphi = 2i_1 - 2i_2$$

teńligine iye bolamız.

Bul teńlikke i_2 niń ornına onıń (1)-teńlik boyınsha alınǵan mánisin qoyıp

$$\varphi_0 = 2i_1 - A$$

yamasa

$$i_1 = \frac{A + \varphi_0}{2} \quad (2)$$

formulaların alamız.

Sınıw nızamı boyınsha

$$n = \frac{\sin i_1}{\sin i_2}$$

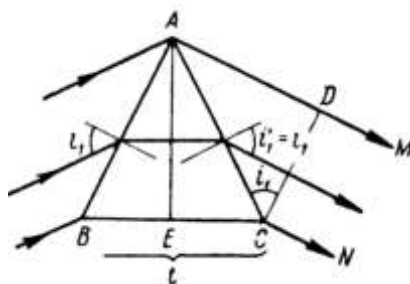
añlatpasına iye bolamız. Bul añlatpada n arqalı prizmanıń materialınıń sındırıw koefficienti belgilengen.

Sınıw nızamına (1)- hám (2)-añlatpalar boyınsha i_1 menen i_2 shamalarınıń mánislerin qoyıp mınanı alamız:

$$n = \frac{\sin \frac{A + \varphi_0}{2}}{\sin \frac{A}{2}}. \quad (3)$$

(3)-teńlik eń kishi burılıw múyeshi φ_0 di prizmanıń sındırıwshı múyeshi A , hám prizma soǵılǵan materialdıń sındırıw koefficienti n menen baylanıstıradı.

Ádette spektrograflarda prizmanı eń kishi burılıw múyeshine sáykes jaylastıradı. Bunday jaǵdayda hár qaysısına hár qıylı sındırıw koefficienti n sáykes keletuǵın hár qıylı tolqın uzınlıqlarına iye nurlar (3)-teńlikke sáykes hár qıylı φ_0 múyeshlerine burıladı.



138-súwret.
Prizmanıń ajırata alıw kúshi ushın añlatpanı
keltirip shıǵarıwǵa.

Burıw múyeshiniń shamasınan tolqın uzınlıǵı boyınsha alınǵan tuwındıǵa teń D shamasın *múyeshlik dispersiya* dep ataydı:

$$D = \frac{d\varphi}{d\lambda}. \quad (4)$$

Burılıw múyeshi φ (berilgen i_1 túsiw múyeshindegi) n nen ǵárezli, al n bolsa λ den ǵárezli. Sonlıqtan mınaday ańlatpanı jazıwǵa boladı:

$$D = \frac{\delta\varphi}{\delta n} \frac{dn}{d\lambda}. \quad (4a)$$

(3)-formulanıń onń hám shep tárepinen φ_0 boyınsha tuwındı alsaq, onda

$$\frac{\delta\varphi}{\delta\varphi_0} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\cos \frac{A+\varphi_0}{2}}{\sin \frac{A}{2}}$$

ańlatpasına iye bolamız, bunnan D dispersiyası ushın (4a) boyınsha mınanı tabamız:

$$D = \frac{d\varphi_0}{d\lambda} = \frac{2 \sin \frac{A}{2}}{\cos \frac{A+\varphi_0}{2}} \cdot \frac{dn}{d\lambda}. \quad (5)$$

Bul ańlatpanı túrlendiriwge boladı. Onıń ushın dáslep (2)-ańlatpa boyınsha mınaday teńliktiń orın alatuǵınlıǵın ańǵaramız:

$$\cos \frac{A+\varphi_0}{2} = \cos i_1 = \sqrt{1 - \sin^2 i_1}.$$

Bunnan keyin (1)-teńlikti paydalanıp sınıw nızamı boyınsha

$$\sin i_1 = n \sin i_2 = n \sin \frac{A}{2}$$

ańlatpaların alamız, bunnan keyin $\cos \frac{A+\varphi_0}{2}$ ushın mınaǵan iye bolamız:

$$\cos \frac{A+\varphi_0}{2} = \sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{A}{2}}.$$

$\cos \frac{A+\varphi_0}{2}$ ushın jazılǵan bul ańlatpanı (5) ke qoyıp prizmanıń múyeshlik dispersiyası ushın mınaday formulanı alamız:

$$D = \frac{d\varphi_0}{d\lambda} = \frac{2 \sin \frac{A}{2}}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{A}{2}}} \cdot \frac{dn}{d\lambda}. \quad (6)$$

$dn/d\lambda$ shaması zattıń dispersiyası dep ataladı hám onıń shaması prizma soǵılǵan zattıń qásiyetlerinen ǵárezli. (6)-formula sındırıw múyeshi A berilgen prizmanıń múyeshlik dispersiyasınıń usı prizma soǵılǵan zattıń sındırıw koefficienti n menen dispersiyası $\frac{dn}{d\lambda}$ qanshama úlken bolsa, sonshama úlken bolatuǵınlıǵın kórsetedi. Sonlıqtan spektrograflardıń prizmaların sındırıw koefficienti menen dispersiyası múmkin bolǵanında úlken bolǵan shiyshelerden soǵadı (awır flintler dep atalatuǵın shiyshelerden). Prizmanıń berilgen materialında prizmanıń sındırıw múyeshi A úlkeygen sayın múyeshlik dispersiyası úlkeyedi. Ámelde sındırıwshı múyeshti ádette 60° qa teń etip aladı. Sebebi úlken múyeshlerde prizmaǵa júdá qıya túsetuǵın jaqtılıq dástesi menen is alıp bariwǵa tuwrı keledi.

271-paragrafta ayılǵanday, spektrograftıń xarakteristikası ushın onıń ajırata alıw kúshi de qaraladı. Bul paragraftıń basında biz hár bir sızıqtıń jaqtılıǵında spektrde sańlaqtıń súwretiniń payda bolatuǵınlıǵın kórdik. Sheksiz tar S sańlaǵı ushın hám spektrograftıń optikalıq sisteması aberraciyaǵa tolıq korrekciyalanǵanda ajırata alıw kúshiniń shegine difrakciyalıq qubılıslardıń bolıwı tásir etedi. Prizmalı spektrograftıń obektivi L_2 ge (tolqın uzınlıǵı berilgen λ ge sáykes keletuǵın jaqtılıqta) nurlardıń AM , CN parallel dásteleri túsetuǵın bolsın (136- hám 138-súwretler). Bul dáste prizmanıń gabaritleri menen sheklengen, nátiyjede ol keńligi CD bolǵan sańlaq arqalı ótken dáste menen birdey kúshke iye. L_2 obektiviniń F'_2 fokallıq tegisliginde ol biz 269-paragrafta tallaǵan bir sańlaqtıń beretuǵın difrakciyalıq súwretine sáykes keledi.

Bul difrakciyalıq súwrettegi bas maksimum menen birinshi minimumnıń arasındǵı múyeshlik qashılıq $\delta\varphi$ mınaǵan teń:

$$\delta\varphi = \frac{\lambda}{d}. \quad (7)$$

Bul teńlikte d arqalı CD dástesiniń kese-kesimi belgilengen.

Eger usınıń menen bir waqıtta prizmaǵa basqa tolqın uzınlıǵına iye bolǵan jaqtılıq túsetuǵın bolsa (mısalı, tolqın uzınlıǵı $\lambda' = \lambda + \delta\lambda$ shamasına teń), onda bul jaqtılıq ta óziniń difrakciyalıq súwretin beredi. Bul difrakciyalıq súwret birinshisine salıstırǵanda bir qansha jılısqan boladı. Reley kriteriyi boyınsha (271-paragraf) eger, olardıń maksimumlarınıń arasındaǵı múyeshlik qashıqlıq $\delta\varphi$ ge teń bolsa, onda bul difrakciyalıq súwretlerdi bir birinen ajıratıwǵa boladı.

Ekınshi tárepten, tolqın uzınlıqlarınıń arasındaǵı ayırma $\delta\lambda$ shamasına teń bolsa, onda sızıqlardıń arasındaǵı múyeshlik qashıqlıq $\delta\varphi$ ge teń boladı. Onıń shamasın (6)-formula boyınsha taba alamız:

$$\delta\varphi = \frac{A \sin \frac{A}{2}}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{A}{2}}} \cdot \frac{dn}{d\lambda} \delta\lambda.$$

$\delta\varphi$ ushın jazılǵan bul ańlatpanı usı $\delta\varphi$ ushın jazılǵan (7)-teńlemege teńlestirip bir birinen azmaz ajıralatuǵın spektrallıq sızıqlardıń (Releydiń kriteriyi mánisinde) tolqın uzınlıqlarınıń ayırması $\delta\lambda$ qanaatlandırıwı kerek bolǵan shárttiń

$$\frac{A \sin \frac{A}{2}}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{A}{2}}} \cdot \frac{dn}{d\lambda} \delta\lambda = \frac{\lambda}{d}$$

yamasa

$$\delta\lambda = \frac{\lambda \sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{A}{2}}}{2d \sin \frac{A}{2}} \cdot \frac{1}{\frac{dn}{d\lambda}} \quad (8)$$

túrine iye bolatuǵınlıǵın kóremiz.

Bul ańlatpanı túrlendiremiz. 138-súwretten mınaǵan iye bolamız:

$$d = AC \cos i_1 = AC \sqrt{1 - \sin^2 i_1}.$$

Awısıwdıń minimumı ushın $\sin i_1 = n \sin i_2 = n \sin \frac{A}{2}$. Usınıń nátiyjesinde d ushın jazılǵan ańlatpanı bılayınsha kóshirip jazıwǵa boladı:

$$d = AC \sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{A}{2}}.$$

Bunnan keyin t arqalı prizmanıń ultanın BC belgilesek, onda

$$AC = \frac{CE}{\sin \frac{A}{2}} = \frac{t}{2 \sin \frac{A}{2}}$$

teńligin alamız. Bunnan d ushın mınaday ańlatpanı alamız:

$$d = \frac{t \sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{A}{2}}}{2 \sin \frac{A}{2}}.$$

d nıń bul mánisin (8) ge qoyıp $\delta\lambda$ ushın mınaday ańlatpaǵa iye bolamız:

$$\delta\lambda = \frac{\lambda}{t \cdot \frac{dn}{d\lambda}} \quad (9)$$

(9)-formuladan prizmanıń ultanı t qansha úlken bolsa hám prizma soǵılǵan zattıń dispersiyası $\frac{dn}{d\lambda}$ qanshama úlken bolsa, onda prizma bir birine jaqın bolǵan spektrallıq sızıqlardı bir birinen ajırata alatuǵınlıǵı kelip shıǵadı.

(9)-formuladan prizmanıń *ajırata alıw kúshi* ushın (9)-ańlatpa boyınsha

$$\frac{\lambda}{\delta\lambda} = t \cdot \frac{dn}{d\lambda} \quad (9a)$$

ańlatpasın alamız.

Solay etip, prizmanıń ajırata alıw kúshi tek onıń ultanı t nıń shaması menen zattıń dispersiyası boyınsha anıqlanadı eken. Ultanıńnıń uzınlıǵı birdey bolǵan, Biraq sındırıw múyeshe A hár qıylı bolǵan prizmalar birdey ajırata alıw kúshine iye boladı. (9a) formulanıń prizma jaqtılıq dástesi menen tolıq tolǵan degen boljawda keltirip shıǵarılǵanlıǵın názerde tutıw kerek.

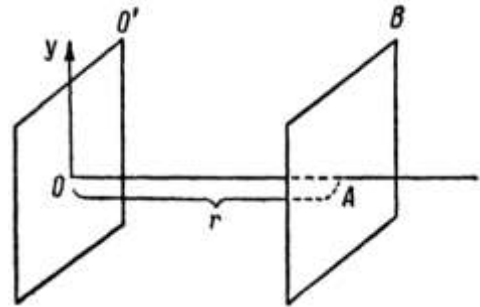
§ 282. Jaqtılıqtıń gruppalıq tezligi. I tomdaǵı 108-paragraftaǵı

$$y = a \cos \left(t - \frac{r}{v} \right)$$

teńleme menen táriyiplenetuǵın monoxromat tolqın barlıq keńislikti toltırıp turatuǵın hám sheksiz uzaq dawam etetuǵın keńisliklik-waqtılıq dáwirli process bolıp tabıladı. r kesindisi bazı bir baslanǵısh OO' tegisligine salıstırǵandaǵı AB birdey fazalar betiniń ornın anıqlaydı (139-súwret). Birdey fazalar betlerine normal bolǵan hár bir tuwrı boylap awısıw y sheksiz kosinusoida menen beriledi. v shaması *qalıplesken tolqınlıq processte hár bir birdey fazaǵa iye bolǵan AB tegisligi qozǵalatuǵın tezlik bolıp tabıladı*; joqarıda aytılıp ótilgenindey, bul shama *fazalıq tezlik* dep ataladı. Gyuygens principi boyınsha sınıw nızamın keltirip shıǵarǵanda (255-súwret) tolqınlardıń fazalıq tezlikleri qaraldı. Sonlıqtan sındırıw koefficienti $n_{21} = v_1/v_2$ ushın anlatpadaǵı v_1 hám v_2 tezlikleri fazalıq tezlikler bolıp tabıladı.

Sındırıwshı zatta monoxromat bolmaǵan jaqtılıq tarqalǵanda onıń monoxromat bolmaǵan ayırım kosinusoidalıq qurawshıları hár qıylı tezlikler menen tarqaladı hám bul jaǵdayda da, fazalıq tezlik penen bir qatarda gruppalıq tezlikte de qaraw kerek (I tom, 114-paragraf). Gruppalıq tezlik haqqında aytqanda ayırım monoxromat tolqınlardı qosıwdıń nátiyjesinde alınatuǵın quramalı terbelmeli processtıń terbelisleriniń maksimumı tarqalatuǵın tezlik názerde tutiladı (mayda shrift penen jazılǵan tekstte bul anıqlamanıń dálilgi joqarılatıladı). Eger ayırım tolqınlar hár qıylı tezlikler menen tarqalatuǵın bolsa, onda bul maksimum fazalıq tezliklerge teń bolmaǵan tezlik penen tarqaladı. Qálegen tolqın uzınlıǵına iye tolqınlardıń tezlikleri birdey bolatuǵın zatta gruppalıq hám fazalıq tezlikler bir birine sáykes keledi. Solay etip, qálegen dispersiyalaytuǵın zattaǵı monoxromat bolmaǵan jaqtılıq ushın gruppalıq hám fazalıq tezliklerdi ayırıw kerek.

139-súwret.
Birdey fazalar beti.



I tomnıń 114-paragrafında gruppalıq tezlik u dıń mınaǵan teń ekenligi kórsetilgen edi:

$$u = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}. \quad (1)$$

Bul anlatpada v - fazalıq tezlik, λ - tolqın uzınlıǵı. (1)-formuladan $\frac{dv}{d\lambda} > 0$ teńsizligi orınlanatuǵın, yaǵnıy v tezliginiń shaması λ nıń ósiwi menen úlkeyetuǵın jaǵdayda u gruppalıq tezliginiń v fazalıq tezlikten kishi bolatuǵınlıǵı kórinip tur. Bul jaǵdayǵa tolqın uzınlıǵınıń úlkeyiwi menen sındırıw koefficienti n nıń kemeyiwi sáykes keledi. Bul jaǵday móldir zatlarda orın aladı (normal dispersiya).

Solay etip, normal dispersiya oblastında gruppalıq tezlik fazalıq tezlikten kishi boladı. Tolqın uzınlıǵı úlkeygen jaǵdayda sındırıw koefficienti úlkeyetuǵın oblastta (kúshli jutılıwdaǵı "anomallıq" dispersiya) gruppalıq tezlik fazalıq tezlikten úlken boladı.

Is júzinde jaqtılıq terbelisleri barlıq waqıtta (belgili bolğan reńdegi jaqtılıq ajratıp alınğan jaǵdayda) quramalı terbelis bolıp, onı Fure teoreması boyınsha kosinusoidalardıń sheksiz kóp sanlı kópligine jayıwǵa boladı. Hár bir kosinusoidaǵı energiyanıń sheksiz kishi mánisi sáykes keledi. Misalı, usınday quramalı jaqtılıqqa qaqpıqtı ashıw jolı menen bazı bir waqıt momentinen baslap belgili bolğan baǵıtta tarqalıw múmkinshiligin beremiz. Dispersiyalaytuǵın ortalıqta onıń hár qıylı qurawshıları hár qıylı tezliklerde tarqaladı hám baqlawshıǵa hár qıylı waqıtlarda kelip jetedi. Hár bir ayırım qurawshı sheksiz kishi muǵdardaǵı energiyanı alıp keledi, al energiyanıń tiykarǵı bólimi terbelisler maksimumı bolğan oblast tárepinen alıp júriledi. Maksimumı kelip jetken waqıtta baqlawshı terbelislerdi sezedi. Bunnan *energiyanıń bir orınnan ekinshi orınǵa alıp beriliwi ushın ketetuǵın waqıttıń ishinde tolqınıń tarqalıw tezligin ólshegende gruppalıq tezliktiń ólshenetuǵınlıǵı túsiniكلي boladı*. Biraq, jaqtılıqtıń tezligin ólshew boyınsha joqarıda táriyiplengen usıllardıń (254-paragraf) barlıǵı da usınday usılǵa kiredi: Yupiterdiń joldaslarınıń tutılıw usılı, Fizo usılı, aylanıwshı aynalar hám prizma usılları. Juldızlıq aberraciya usılı boyınsha bazı bir gúmannıń payda bolıwı múmkin, Biraq, tereń ótkerilgen tallawdıń bunday jaǵdayda da gruppalıq tezliktiń ólshenetuǵınlıǵın kórsetedi. Solay etip, jaqtılıqtıń tezligin tikkeley ólsheytuǵın usıllardıń barlıǵında da onıń gruppalıq tezligin ólsheydi.

Hawa ushın dispersiya júdá kishi bolǵanlıqtan, gruppalıq tezlik is júzinde fazalıq tezlikke sáykes keledi. Fazalıq hám gruppalıq tezliklerdiń ayırması kózge kórinetuǵın oblastta úlken dispersiyaǵa iye bolğan kúirtli uglerod ushın Maykelson tárepinen tabıldı. Maykelson boslıqtaǵı hám kúirtli uglerodtaǵı jaqtılıqtıń tezlikleriniń qatnası ushın 1,76 shamasın aldı. Al, kúirtli uglerodtıń jaqtılıqtıń boslıqtaǵı tezliginiń fazalıq tezlikke qatnasın beretuǵın sındırıw kórsetkishi 1,64 ke teń.

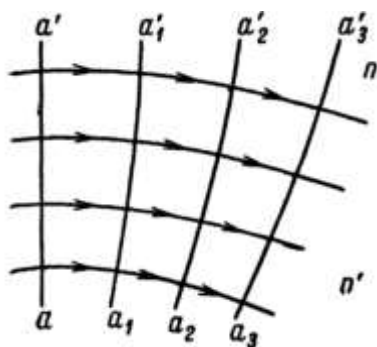
Intensivli jutılıw jolaǵınıń ishinde $\frac{dn}{d\lambda}$ shaması on mániske iye (134-súwret), demek $\frac{dv}{d\lambda} > 0$ ($n = \frac{c}{v}$). Usınnan basqa, rezonanslıq tolqın uzınlıǵınan kóp kishi bolmaǵan tolqın uzınlıqlarında $n < 1$, demek, fazalıq tezlik $v > c$. Bunnan (1)-formula boyınsha jutılıw jolaǵınıń ishinde gruppalıq tezliktiń c dan úlken bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Biraq, bul juwmaq salıstırmalıq teoriyasına qayshı kelmeydi (salıstırmalıq teoriyası boyınsha energiyanı jaqtılıqtıń boslıqtaǵı tezliginen úlken tezlik penen alıp beriw múmkin emes). Másele sonnan ibarat, zatlardıń jaqtılıqtıń tarqalıw tezligine tásiiri jaqtılıq tolqınıń atomlar menen molekullardıń quramına kiretuǵın zaryadlangan bóleksheler menen tásirlesiwı boyınsha anıqlanadı. Óz-ara tásirlesiwdiń júzege keliwi ushın tolqınıń sáykes bólekshelerge jetip keliwi kerek. Bólekshelerdiń arasında jaqtılıq boslıqta tarqalatuǵın tezlik penen tarqaladı.

Bunnan, hátte gruppalıq tezliktiń shaması c dan úlken bolğan jaǵdayda da qálegen zatta, yaǵnıy dispersiyalaytuǵın zat arqalı tolqın frontınıń boslıqtaǵı jaqtılıqtıń tezligindey tezlik penen tarqalatuǵınlıǵı, energiyanıń bir orınnan ekinshi orınǵa jaqtılıqtıń boslıqtaǵı tezliginen úlken tezlik penen alıp beriliwiniń múmkin emes ekenligi kelip shıǵadı. Qatań teoriya qálegen zattaǵı tolqınıń frontınıń tezliginiń boslıqtaǵı jaqtılıqtıń tezligine teń ekenligin tastıyıqlaydı. Al, energiyanıń tarqalıw tezligine keletuǵın bolsaq (terbelislerdiń maksimumınıń tezligi), onda (1)-formula boyınsha anıqlanǵan gruppalıq tezliktiń dispersiya normal bolğan orınlarda ǵana energiyanıń tarqalıw tezligine sáykes keletuǵınlıǵın kóremiz. Anomallıq dispersiya oblastında bolsa energiyanıń tarqalıw tezligi gruppalıq tezlikten sezilerliktey ayırmaǵa iye boladı hám barlıq waqıtta c dan kishi.

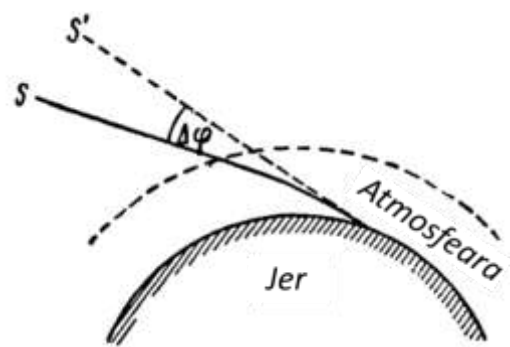
§ 283. Optikalıq jaqtan bir tekli bolmaǵan zattaǵı jaqtılıqtıń tarqalıwı. Optikalıq jaqtan bir tekli bolmaǵan zat haqqında ǵáp etkende sındırıw koefficienti n bir noqattan ekinshi noqatqa ótkende úzliksiz ózgeretuǵın zattı názerde tutadı. Bunday zatta tolqın frontınıń hár qıylı bólimleri hár qıylı tezlik penen tarqaladı, usınıń nátiyjesinde fronttıń beti úzliksiz túrde deformacijalanadı. Birdey fazalar betine ortogonal bolğan nurlar bul jaǵdayda *iyilgen* bolıp shıǵadı. Sındırıw koefficienti n nen n' ke shekem úzliksiz ózgeretuǵın zattı qaraymız (140-súwret). Anıqlıq ushın $n < n'$ teńsizligi orınlanadı dep esaplaymız. Meyli, bazı bir waqıt momentinde tolqın frontı súwret tegisligine perpendikulyar bolğan aa' tegisligi kórinisine iye bolğan bolsın. Tolqınıń bunnan bılay

tarqalıwında n kishi bolğan orınlarda aa' tezirek, al n kishirek bolğan orınlarda ásterek jılısadı. Sonlıqtan bunnan keyingi waqıt momentlerindeki onıń orınları iymek $a_1a'_1, a_2a'_2$ h.t.b. betler menen súwretlenedi. 140-súwrette tolqın frontınıń hár bir ornın normal bağıtta kesip ótetuǵın nurlar tómenge qarap iymeyedi.

Bir tekli bolmağan zattıń mısalı sıpatında jetkilikli dárejede qalıń qatlamda qaralatuǵın jerdiń atmosferası xızmet ete aladı. Biyiklikke baylanıslı atmosferanıń basımınıń ózgerisi biyiklikke baylanıslı sındırıw koefficientiniń ózgerisin júzege keltiredi. Úlken biyikliklerdegi sındırıw koefficientiniń mánisi kishi, al Jerdiń betindegi sındırıw koefficientiniń mánisi úlken. Usınıń saldarınan qanday da bir juldızdan Jerge kelip túsetuǵın nur atmosferada sınıp, iymeyedi (141-súwret). Juldızdıń kózge kórinetuǵın ornı S' onıń haqıyqıy ornı S ke salıstırǵanda jılısqan. Bul qubılıstı *astronomiyalıq refrakciya*, al múyeshlik awısıw $\Delta\varphi$ *difrakciya múyeshi* dep ataladı. Zenitte jaylasqan juldızlar ushın astronomiyalıq refrakciya múyeshi $\Delta\varphi$ nolge, al gorizontta jaylasqan juldızlar ushın maksimallıq mániske teń. Bul jaǵdayda onıń mánisi $35'$ qa jetedi.



140-súwret. Bir tekli bolmağan zattaǵı nurlardıń iymeyiwi.



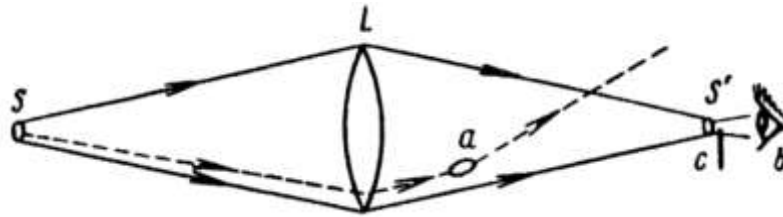
141-súwret. Jer atmosferasındaǵı nurlardıń iymeyiwi.

Astronomiyalıq refrakciyaǵa baylanıslı gorizonttıń qasında Quyash jalpayǵan bolıp kórinedi hám onıń ornı haqıyqıy ornınan kóterilgen boladı; bul jaǵday kúnniń uzınlıǵınıń bazı bir shamaǵa sozılıwına alıp keledi. Atmosferadaǵı nurlardıń sınırıw úlken qashılıqlardaǵı geodeziyalıq ólsheplerde esapqa alıwǵa tuwrı keledi. Atmosferadaǵı tosınnan júzege keletuǵın jergilikli bir tekli bolmağan orınlardıń payda bolıwı juldızlardıń jıltıldawına alıp keledi. Jerdiń yamasa teńizdiń qızǵan betinde orın alatuǵın atmosferanıń temperaturasınıń biyiklik boyınsha bir tekli bolmawı sındırıw koefficientiniń ózgeriwine alıp keledi hám bul qubılıs mirajdıń payda bolıwın túsindiredi. Qızǵan bettiń ústinde nurdı tarqalıwǵa májbúrlep, mirajdı jasalma túrde payda etiwge boladı.

Sındırıw koefficienti úzliksiz ózgeretuǵın oblastlardaǵı jaqtılıqtıń sınırıwına móldir denelerdegi úlken bolmağan jergilikli bir tekli bolmağan orınlardı tabıw usılı tiykarlanǵan (shiyshedege, hawadaǵı h.t.b.). Bul usıldıń sxeması 142-súwrette keltirilgen. Uzun fokuslı L linzası S' noqatında jaqtılıqtıń kishi bolǵan S dereginıń haqıyqıy súwretin payda etedi (mısalı, ushqınıń yamasa volt dugasınıń krateriniń). Eger S' súwretiniń artındaǵı b noqatında kózdi súwretten shıqqan jaqtılıq oǵan túsetuǵında etip jaylastırsaq hám kózdi L linzasınıń betine fokuslasaq, onda linzanıń betiniń barlıǵı teń ólshewli jaqtılandırǵan bolıp kórinedi. S' súwretiniń bir bólimin c móldir bolmağan ekran menen japqan jaǵdayda da linzanıń betiniń barlıǵı burınıday jaqtılandırǵan bolıp kórinedi. Sebebi S' súwretiniń hár bir noqatı L linzanıń barlıq orınları arqalı ótken nurlar menen payda boladı. Biraq, ekrannıń nurlardıń bir bólimin irkiwiniń saldarınan linzanıń jaqtılandırılǵanlıǵı hálsiregen boladı. Eger L linza menen c ekrannıń arasında qorshaǵan ortalıqqa salıstırǵanda jaqtılıqtı basqasha sındıratuǵın qanday da bir tekli bolmağan a ornı bar bolsa, onda usı orın arqalı ótetuǵın nur awısa. Usınıń saldarınan c ekrannıń qasınan bunday orın bolmağan jaǵdayǵa salıstırǵanda kóbirek yamasa kemirek jaqtılıq ótedi (bir tekli bolmağan orınıń jaqtılıqtı qaysı bağıtta awıstıratuǵınlıǵına baylanıslı). Nátiyjede bir tekli bolmağan oblast linzanıń betine salıstırǵanda jaqtıraq yamasa qarańǵıraq boladı. Usınday usıldıń járdeminde sındırıw koefficientiniń mánisi zattıń qońsılas

uchastkalarınıń sındırıw koefficientiniń mánisinen júdá kishi bolǵan bir tekli bolmaǵan orınlardı tabıwǵa boladı.

Usıldıń dáliligin joqarılatıw ushın baqlawdı kóriw trubasınıń járdeminde ótkeriwge yamasa kózdi L linzaniń betine fokuslangan fotokamera menen almasıwǵa boladı.

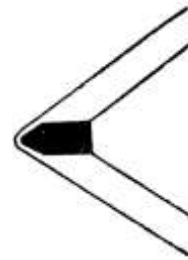


142-súwret. Móldir zatlardáǵı bir tekli bolmaǵan orınlardı anıqlaw usılı.

Joqarıda keltirilgen usıldı optikalıq shiysheniń sapasın qadaǵalaw ushın paydalanadı. Bunday shiyshede bir tekli bolmaǵan orınlardıń bolıwı (olardı sviller dep ataydı) olardı dál optikalıq ásbaplardı soǵıw ushın jaramsız etedi. Eger ushqınnıń járdeminde júdá qısqa waqıt jaqtılandırıw paydalanılsa, onda waqıtqa baylanıslı ornı ózgerip turatuǵın bir tekli bolmaǵan uchastkalardıń bir zamatlıq orınlarınıń fotosúwretin túsiriwge múmkinshilik tuwıladı. Usınday jollar menen ses tolqınlarındáǵı, hawada qozǵalatuǵın predmetler tárepinen payda etiletuǵın partlanıw tolqınlarındáǵı, mısalı ushıwshı oq tárepinen payda etilgen tolqınlardáǵı qoyıwlasıw menen siyreklenetuǵın orınlardıń fotosúwreti túsiriledi (143-súwret).

143-súwret.

Hawada ushatuǵın oq payda etken tolqınnıń fotosúwretin túsiriw.



§ 284. Gúńgirt zat arqalı jaqtılıqtıń ótiwi. Jaqtılıq nurlarınıń dástesi gúńgirt zat (duman, qalqıp júrgen bóleksheleri bar suyıqlıq, kolloidlıq eritpe h.t.b.) arqalı ótkende jaqtılıqtıń bir bólimi qaptal táreplerge qaray shashıraydı; usınıń saldarınan qaptaldan baqlaǵanda dáste kórinetuǵın boladı.

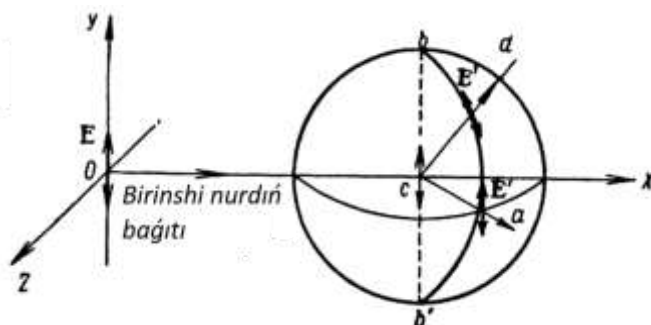
Gúńgirt zattaǵı qaptalǵa qaray shashırawdıń saldarınan tarqalıw baǵıtında energiya aǵısınıń tıǵızlıǵı tek jutıw bar bolǵan jaǵdayǵa salıstırǵanda tezirek kemeyedi. Sonlıqtan gúńgirt zat ushın jaqtılıqtı jutıw nızamınıń ańlatpasında [276-paragraftaǵı (2)-formula] haqıyqıy jutıw koefficienti k menen bir qatarda shashıraw menen baylanıslı bolǵan qosımsha k' koefficienti de boladı:

$$u = u_0 e^{-(k+k')l}. \quad (1)$$

k' koefficientin *ekstinkciya koefficienti* dep ataydı.

Gyuygens-Frenel principi boyınsha boslıqta yamasa bir tekli zatta tarqalatuǵın tolqın frontınıń hár bir noqatın ekinshi elementar tolqınlardıń deregi dep qarawǵa boladı. Bul ekinshi tolqınlar olardıń tarqalıw baǵıtında bir birin kúsheytedi hám basqa baǵıtlarda sóndiredi. Is júzinde, qálegen zattaǵı onıń atomlıq qurılısı tárepinen payda etilgen bir tekli emes orınlar hesh qanday orındı iyelemeydi. Sebebi, olardıń ólshemleri jaqtılıq tolqınıń uzınlıǵınan kóp kishi (jaqtılıq tolqınıń tolqın uzınlıǵı $\lambda \cong 10^{-5}$ sm, suyıq hám qattı denelerdegi atomlardıń arasındáǵı qashıqlıq 10^{-8} sm, al gazlerde bolsa normal sharayatlarında 10^{-7} sm). Eger bir tekli zatqa bir birinen tolqın uzınlıǵınan úlken qashıqlıqlarda jaylasqan bóleksheler kirgizilgen bolsa (bólekshelerdiń ózleriniń ólshemleriniń tolqın uzınlıǵınan kishi bolıwı múmkin) jaǵday basqasha boladı. Bul jaǵdayda hár bir bólekshede shaǵılısqan tolqınlar belgili bolǵan fazalar ayırmasına iye bolmaydı hám barlıq

bağıtlarda bir birin azı-kemli kúsheytedi. Solay etip, qaptal táreplerge qaray shashırağan jaqtılıq payda boladı.



144-súwret.

SHashırağan tolqınıń payda bolıwı; birinschi tolqın tegis polarizaciyalanğan.

Jaqtılıq tolqınıń elektr vektorınıń tásirinde shashırıwshı bólekshedegi elektronlar májbúriy túrde terbeledi hám olardıń ózleri tolqınlardı shıgara baslaydı. Eger bólekshe jaqtılıq tolqınıń tolqın uzınlıǵınan kishi bolsa, ondaǵı terbelislerdiń jıynaǵın bir elektr dipolınıń terbelisi menen almasıwǵa boladı. Ápiwayılıq ushın jaqtılıqtı tuwrı sıızılıq polarizaciyalanğan hám $\mathbf{E}$ vektorı OY kósherine parallel terbeledi dep boljaymız (144-súwret). Bunday jaǵdayda izotrop C bólekshesindegi májbúriy elektr terbelisleri de usı OY kósherine parallel baǵıtta júzege keledi. Olar ekinshi polarizaciyalanğan sferalıq tolqınıń payda bolıwına alıp keledi. Bul shashırağan tolqındaǵı hár bir baǵıtta $\mathbf{E}'$ elektr vektorı dipoldıń kósheri bb' nı óziniń ishine alatuǵın tegislikte jatadı; jaqtılıq tolqınlarınń kóldenerligine baylanıslı $\mathbf{E}'$ vektorı sonıń menen birge tolqınıń tarqalıw baǵıtına perpendikulyar (misalı, Ca yamasa Cd baǵıtlarına perpendikulyar). Ekinshi tolqınıń amplitudası XOZ tegisliginde jatatuǵın baǵıtlarda maksimal; dipoldıń kósheri bb' tıń baǵıtında ol nolge teń. Nátiyjede biz mınaǵan iye bolamız: eger birinschi dáste tegis polarizaciyalanğan bolsa, onda shashırağan jaqtılıq ta tegis polarizaciyalanğan bolıp, hár qıylı baǵıtlarda hár qıylı intensivliklerge iye boladı. 145-súwrette birinschi dásteniń tarqalıw baǵıtına (144-súwrette YOZ tegisligine parallel) perpendikulyar bolǵan tegisliktegi shashırağan jaqtılıqtıń intensivlikleriniń tarqalıwınıń vektorlıq diagramması kórsetilgen.

Tegis polarizaciyalanğan dáste gúńgirt zatta tarqalǵanda oǵan qaptaldan birinschi dásteniń polarizaciya tegisligi tárepinen qaraǵanda dáste jaqsı kórinedi, eger oǵan birinschi dásteniń polarizaciya tegisliginde perpendikulyar baǵıtta qaraǵanda dáste pútkilley kórinbeydi¹⁴.

SHashırıwshı bólekshedegi májbúriy terbelislerdiń jıyilıǵı v túsiwshi tolqındaǵı terbelislerdiń jıyilıǵına teń boladı. Sonlıqtan *shashırağan jaqtılıqtıń jıyilıǵı birinschi dástedegi jaqtılıqtıń jıyilıǵındey boladı*. Jaqtılıqtıń elektromagnit teoriyası boyınsha elektr dipoli tárepinen nurlandırılatsuǵın tolqınıń amplitudası onıń terbelis jıyilıǵınıń kvadratı bolǵan ν^2 shamasına proporcional. Energiyanıń aǵsınıń tıǵızlıǵı menen ólshenetuǵın jaqtılıqtıń intensivligi amplitudanıń kvadratına proporcional. Bunnan *shashırağan jaqtılıqtıń intensivliginiń jıyiliktiń tórtinshi dárejesine proporcional bolatuǵınlıǵı* yamasa basqa sóz benen *aytqanda tolqın uzınlıǵınıń tórtinshi dárejesine keri proporcional ekenligi* kelip shıǵadı:

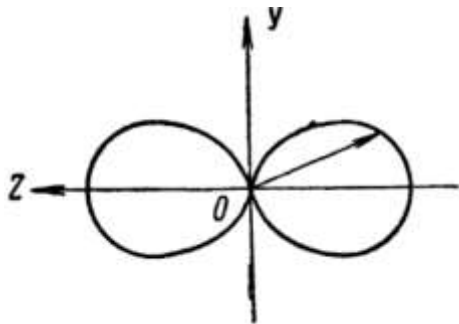
$$I \sim \nu^4 \sim \frac{1}{\lambda^4}. \quad (2)$$

Bul qatnas Reley nızamı dep ataladı.

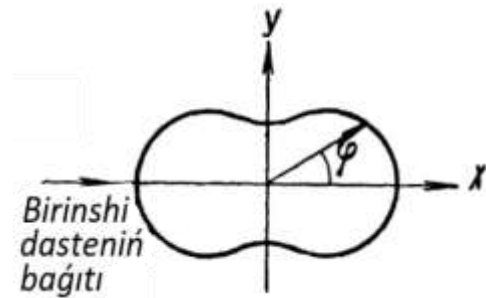
Mayda bólekshelerge iye bolǵan gúńgirt zatta aq jaqtılıq shashıraǵanda shashırağan jaqtılıq aspan kók bolıp kórinedi, sebebi, Reley nızamı boyınsha kishi tolqın uzınlıǵına iye bolatuǵın aspan kók hám kók nurlar sarı hám qızıl nurlarǵa salıstırǵanda kúshlirek shashıraydı. Al gúńgirt zat arqalı

¹⁴ Polarizaciya tegisliginiń elektr vektorı $\mathbf{E}$ terbeletuǵın tegislikke perpendikulyar ekenligin esletip ótemiz. 144-súwrette XOZ tegisligi birinschi dásteniń polarizaciya tegisligi bolıp tabıladı.

ósetuǵın aq jaqtılıq kishi tolqın uzınlıǵına iye bolǵan nurlardıń kúshlirek shashırawınıń saldarınan qızǵısh reńge iye boladı.



145-súwret. SHashıraǵan jaqtılıqtaǵı intensivliktiń tarqalıwı.



146-súwret. SHashıraǵan jaqtılıqtıń intensivliginiń φ múyeshinen ǵárezligi.

Eger birinschi dásteдеgi jaqtılıq polarizaciyalanǵan bolmasa, onda shashıraǵan jaqtılıqtıń intensivligi túsiwshi dástege perpendikulyar bolǵan tegislikte jatatuǵın barlıq baǵıtlarda birdey boladı. Tek shashıraǵan jaqtılıqtıń intensivliginiń birinschi dásteniń baǵıtı menen shashırav baǵıtınıń arasındaǵı φ múyeshinen ǵárezligi ǵana qaladı.

Intensivliktiń φ múyeshinen ǵárezligi mınaday xarakterge iye boladı:

$$I \sim (1 + \cos^2 \varphi);$$

Bul ǵárezlik grafikte birinschi dástege hám oǵan perpendikulyar bolǵan sıziqqa simmetriyalı iymeklik penen ańǵartıladı (146-súwret).

Birinschi jaqtılıq polarizaciyalanbaǵan bolsa da shashıraǵan jaqtılıq polarizaciyalanǵan boladı. Bul jaqtılıq tolqınlarınń kóldeneńliginiń nátiyjesi bolıp tabıladı. Haqıykatında da, birinschi dáste OX kósheriniń baǵıtında tarqalǵanda (144-súwret) elektr vektorı E niń terbelisleri YOZ tegisliginde boladı. Birinschi dástege perpendikulyar bolǵan baǵıtta shashıraǵan jaqtılıqtı baqlaǵanda (mısalı OZ kósheriniń baǵıtındaǵı) shashıratıwshı bólekshelerдеgi májbúriy terbelislerdi eki qurawshıǵa jiklewge boladı: birinsisi OY baǵıtındaǵı, ekinshisi OZ baǵıtındaǵı. Jaqtılıq tolqınlarınń kóldeneńliginiń nátiyjesinde OZ kósheriniń baǵıtında shashıraǵan jaqtılıq tolqınlarındaǵı terbelisler bólekshelerdiń tek OY kósheriniń baǵıtındaǵı terbelisleriniń nátiyjesinde júzege keledi. Solay etip, shashıraǵan jaqtılıqtaǵı E' elektr vektorı OY kósherine parallel baǵıtta terbeledi hám jaqtılıq tolıq polarizaciyalanǵan boladı. Birinschi dástege salıstırǵanda qıya baǵıtta shashıraǵan jaqtılıq yarımlay polarizaciyalanǵan.

Eger shashıratatuǵın bólekshelerdiń ólshemleri jaqtılıqtıń tolqın uzınlıǵınan úlken bolǵan jaǵdaylarda jokarıda keltirilgen nızamlıqlar orınlanbaydı. Bunday bóleksheler ushın shashıraǵan jaqtılıqtıń intensivligi tolqın uzınlıǵınıń kvadratına keri proporcional. Iri shashıratıwshı bóleksheler bar bolǵan jaǵdayda shashıraǵan aq jaqtılıq Reley nızamı orınlanatuǵın mayda shashıratatuǵın bóleksheler bolǵan jaǵdayǵa salıstırǵanda aspan kók reńge kemirek iye boladı. Bul mınaday jaqsı belgili bolǵan faktke sáykes keledi: mayda tamshılardan turatuǵın duman kók bolıp, al irirek bolǵan tamshılardan turatuǵın duman aq bolıp kórinedi.

Iri bóleksheler bolatuǵın jaǵdayda shashıraǵan tek yarımlay polarizaciyalanǵan hám polarizaciya dárejesi bólekshelerdiń ólshemleri menen formalarınan ǵárezli boladı. Usınıń menen birge shashıraǵan jaqtılıqtıń intensivliginiń shashırav baǵıtınan ǵárezligi de ádewir quramalı xarakterge iye.

Usı paragraftıń basında bir tekli zattıń jaqtılıqtı shashıratpaytuǵınlıǵı kórsetilgen edi. Biraq, haqıyqatında, oǵada muqiyatlı túrde shańlardan tazartılǵan hám ózge bólekshelerge iye bolmaǵan zatlar da bazı bir dárejede jaqtılıqtı shashıratadı. L.I.Mandelshtam menen M.Smoluxovskiylar onıń sebebinıń tıǵızlıqtıń fluktuaciýaların

bar bolıwı menen baylanıslı ekenligin anıqladı. Tıǵızlıqtıń fluktuaciyaları zattıń qurılısınıń molekulaq-kinetikalıq tábiyatı menen baylanıslı bolǵanlıqtan (I tomǵa qarańız), fluktuaciyalardaǵı shashırawdı *molekulalıq shashıraw* dep ataydı.

Molekulalıq shashıraw gazlerde de, suyıqlıqlarda da, qattı denelerde de orın aladı. Ol júdá ázzi bolıp, kópshilik jaǵdaylarda onıń kólem birligindegi shaması birinshi dásteniń energiyasınıń 10^{-6} - 10^{-7} bólegin ǵana quraydı.

Molekulalıq shashırawdıń intensivligi temperaturaǵa baylanıslı joqarılaydı. Sebebi, temperatura joqarılaǵanda tıǵızlıqtıń fluktuaciyaları kúshlirek boladı.

Usı belgisi boyınsha molekulaq shashıraw ózge bólekshelerdiń bar bolıwı menen baylanıslı bolǵan shashırawdan ózgeshelikke iye. Ózge bólekshelerdiń bar bolıwı menen baylanıslı bolǵan shashıraw temperaturadan ǵárezli bolmaydı. Birinshi dáste tegis polarizaciyalanǵan bolǵan jaǵdayda fluktuaciyalarda shashıraǵan jaqtılıq polarizaciyalanǵan, Biraq yarımday. Onıń depolarizaciya dárejesi molekularıń anizotropiyasınıń dárejesinen ǵárezli.

Aspannıń kók reńi molekulaq shashıraw menen túsindiriledi. Molekulalıq qozǵalıslarǵa baylanıslı atmosferadaǵı úziksiz túrde payda bolatuǵın hawanıń qoyıwlasqan hám siyreklesken orınları Quyashtıń jaqtısın shashıratadı. Bunday jaǵdayda, Reley nızamı boyınsha aspan kók hám kók reńli nurlar sarı hám qızıl nurlarǵa salıstırǵanda kúshlirek shashıraydı. Aspan gúmbezi tárepinen shashıratılǵan jaqtılıq yarımday polarizaciyalanǵan; bul polarizaciyanıń shaması menen xarakteri teoriyalıq esaplaw usılı menen alınǵan nátiyjelerge sáykes keledi.

Teoriya ekstinkciya koefficienti k' tıń mánisin de beredi. Gazdegi molekulaq shashıraw ushın ekstinkciya koefficienti

$$k' = \frac{8\pi^3}{3N\rho} \cdot \frac{(\varepsilon - 1)^2}{\lambda^2}$$

túrine iye. Bul anlatpada N - Avagadro sanı, ρ - tıǵızlıq, ε - dielektriklik tıǵızlıq.

1912-jılı Tenerife shıńında ótkerilgen baqlawlar boyınsha atmosferada shań bolmaǵan sharayatlarda hawa ushın k' koefficientiniń mánisi $5,6 \cdot 10^{-7} \text{ sm}^{-1}$ (normal basım menen temperaturadaǵı $\lambda = 0,375 \text{ mkm}$ tolqın uzınlıǵındaǵı jaqtılıq ushın) shamasına teń bolıp shıqtı. Bunnan, Avagadro sanı ushın $N = 6,6 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ shaması alınadı. Bul shama baqlawlardıń qáteliginiń sheklerinde haqıyqıy mánisine sáykes keledi.

Ádewir úlken bolǵan fluktuaciylardıń payda bolıwı ushın sharayat zatlardıń kritikalıq hallarınıń qasında payda boladı. Bul fluktuaciylardıń bar bolıwınıń nátiyjesinde jaqtılıqtıń intensivli túrde shashırawı orın aladı. Haqıyqatında da, kritikalıq temperaturada jaqtılıqtıń intensivli túrdegi shashırawı orın aladı hám onı *kritikalıq opalescenciya* dep ataydı. Intensivli túrdegi molekulaq shashırawdıń eritpelerde aralasıwdıń kritikalıq temperaturasında baqlanadı. Aralasıwdıń kritikalıq temperaturası degende belgili bolǵan proporciyada alınǵan eki suyıqlıq bir tekli aralaspanı payda etetuǵın temperaturanı túsinedi. Aralasıwdıń kritikalıq temperaturasına jaqınlaǵanda koncentraciyanıń úlken fluktuaciylarınıń payda boladı hám bul jaǵday jaqtılıqtıń intensivli túrdegi shashırawına alıp keledi.

L.I.Mandelshtam suyıqlıqtıń betinde de jaqtılıqtıń shashırawınıń orın alatuǵınlıǵı anıqladı. Molekularıń jıllılıq qozǵalıslarınıń aqıbetinde suyıqlıqtıń beti ideal ayna bolmaydı hám sonıń menen birge bazı bir gúńgirtlikke iye boladı. Biraq, ádettegi sharayatlarda bet kerimi kúshleriniń bar bolıwınıń saldarınan bul gúńgirtlik júdá ázzi kórinedi.

Bet kerimi koefficientleriniń mánisleri bir birine jaqın bolǵan eki suyıqlıqtıń arasındaǵı shegarada bet kerimi kúshleriniń tutqan ornı ádewir kishi. Haqıyqatında da, eki suyıqlıqtıń shegarasında jaqtılıqtıń ádewir úlken bolǵan shashırawı baqlanadı.

SHashıraǵan jaqtılıqtı úyreniw fizikalıq ximiyadaǵı qanday da bir zatlarda júzip júrgen kolloidlıq bólekshelerdiń fizikalıq qásiyetlerin izertlegende áhmiyetli orındı iyeleydi.

SHashırağan jaqtılıqtıń bolıwı eritpede kolloidlıq bólekshelerdiń bar ekenligin kórsetedi. Reley nızamı boyınsha shashırağan jaqtılıqtıń intensivligi tolqın uzınlıǵınıń tórtinshi dárejesine keri proporcional hám shashıratıwshı bólekshelerdiń kóleminiń kvadratına tuwrı proporcional (bólekshelerdiń ólshemleri tolqın uzınlıǵınan kishi bolǵan sharayatlarda). Solay etip, shashırağan jaqtılıqtıń intensivligi hám reńi boyınsha kolloidlıq bólekshelerdiń ólshemleri haqqında gáp etiwge boladı.

Tolqın uzınlıǵınıń tórtinshi dárejesine keri proporcionallıq nızamı metallardıń kolloidlıq bóleksheleri ushın orınlanbaydı. Bunday bóleksheler jaqtılıqtıń tek shashıratıp ǵana qoymay, selektivli túrde jutadı da.

Demek, kolloidlıq bólekshelerdiń eritpesi arqalı ótetuǵın jaqtılıqtıń reńi eki sebepten ǵárezli eken: bólekshelerdegi nurlardıń shashırawınan hám olardaǵı jutılıwınan. Bul ótken jaqtılıqtıń reńiniń bólekshelerdiń ólshemlerinen quramalı túrdegi ǵárezligine alıp keledi. Mısalı, gúmistiń kolloidlıq eritpesi bólekshelerdiń ólshemlerine baylanıslı qızıl yamasa jasıl reńge boyalıwı múmkin.

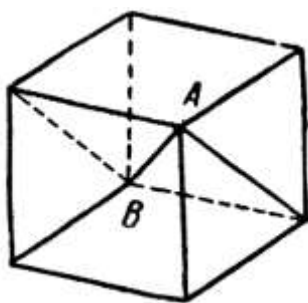
Qanday da bir móldir qattı deneniń ishindegi kolloidlıq bólekshelerde de jaqtılıqtıń shashırawı baqlanadı. Mısalı, shiyshede kolloidlıq bólekshelerdiń bolıwı oǵan qızǵısh-kók ("rubin") reńin beredi.

XXV BAP

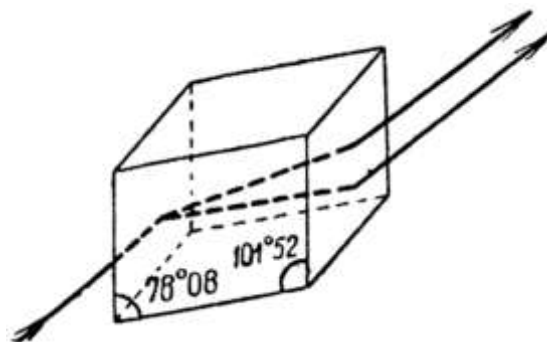
JAQTILIQTIŇ ANIZOTROP ZATLAR ARQALI ÓTIWI

§ 285. Jaqtılıqtıń anizotrop zatlar arqalı ótiwi. Jaqtılıqtıń anizotrop zatlar (kristall) arqalı ótiwi bir qatar ózine tán qubılıslar menen baylanıslı. 1670-jıldıń ózinde Erazm Bartolominus jaqtılıq nurı island shpatı arqalı ótkende eki nurǵa ajralatuǵınlıǵın baqladı. Bul qubılıs qos nur sıdırıw atamasına iye boldı¹⁵.

Islandiya shpatı kristallı romboedrı payda etip, belgili bolǵan tegislikler boyınsha bólinedi (bóliniw tegislikleri) (147-súwret). Bunday kristaldaǵı sınıwdıń nátiyjesinde jaqtılıqtıń jıńışke dástesi hár qıylı bolǵan bir neshe baǵıtlarda eki dásteni beredi. Eger dásteler jetkilikli dárejede jıńışke bolsa, onda kristaldan shıqqanda eki dáste de kelip túsken dástege parallel boladı. Al kristal jetkilikli dárejede qalıń bolsa, onda eki dáste bir birinen keńislikte kóbirek ajralǵan boladı (148-súwret). Kóz benen usınday kristall arqalı qanday da obektke qarasa, ol ekilenedi. Mısalı, aq qaǵazǵa qara noqattı túsirsek hám oǵan islandiya shpatı kristallı arqalı qarasaq, onda eki noqattı kóremiz.



147-súwret. Tábiyiy islandiya shpatı kristallı; AB kósherine parallel bolǵan qálegen tuwrı optikalıq kósher bolıp tabıladı.



148-súwret. Islandiya shpatı kristallındaǵı qos nur sıdırıw.

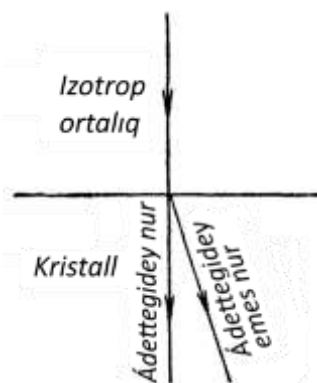
Basqa móldir kristallardıń kópshiligi qanday da bir shamada qos nur sıdırıw qásiyetine iye boladı. Kublıq sistemaǵa kiretuǵın kristallar qos nur sıdırıw qásiyetine iye emes (mısalı tas duzı kristalları).

Qanday da bir jollar menen kristaldan tegis parallel plastinkanı kesip alıp, ondaǵı qos nur sıdırıwda payda bolǵan eki nurdıń baǵıtların izertlegende olardıń biri ushın túsiw múyeshi ózgergende túsiw múyeshiniń sinusınıń sınıw múyeshiniń sinusına qatnası $\frac{\sin i_1}{\sin i_2}$ shamasınıń turaqlı bolıp qalatuǵınlıǵına kóz jetkeriwge boladı; bul nur túsiwshi nur, nurdıń túsiw noqatında plastinkanıń betine túsirilgen normal menen bir tegislikte jatadı. Solay etip, bul nur ádettegi sınıw nızamın qanaatlандıradı. Bul nurdı *ádettegidey nur* dep ataydı. Ekinshi nurdı *ádettegidey emes nur* dep ataydı. Túsiw múyeshiniń shaması ózgergende onıń ushın $\frac{\sin i_1}{\sin i_2}$ qatnası turaqlı bolıp kalmaydı. Hátte jaqtılıq plastinkanıń betine normal baǵıtta túsken de ádettegidey emes nur dáslepki baǵıtınan burıladı (149-súwret). Bunday jaǵdayda $\sin i_1 = 0$, al $\sin i_2 \neq 0$ hám $\frac{\sin i_1}{\sin i_2}$ qatnası da nolge teń boladı. Ádettegidey emes nurdıń kristaldan hawaǵa ótiwinde túsiw múyeshiniń sinusınıń sınıw múyeshiniń sinusına qatnası sheksizlikke teń bolıwı múmkin.

¹⁵ Kómir qıshqıl qalciydiń ($CaCO_3$) geksagonallıq sistemaǵa kiretuǵın kristallı.

Ádettegidey emes nur, ádette, túsiw tegisliginde, yaǵnıy túsiwshi nur hám betke túsirilgen normal menen bir tegislikte jatpaydı. Ádettegidey emes nurdıń sınıw múyeshi, sonıń menen birge onıń menen túsiw tegisliginiń arasındadı múyesh tek ǵana baslanǵısh nurdıń túsiw múyeshinen ǵana emes, al kristaldıń optikalıq kósherine salıstırǵandaǵı (tómende qarańız) plastinkanıń sındırıwshi beti menen túsiw tegisliginiń orientaciyasınan da ǵárezli.

Nurlardıń ekewi de, *ádettegi nur da, ádettegidey emes nur da bir birine perpendikulyar bolǵan tegisliklerde tolıq polarizaciyanı alǵan.*



149-súwret.

Kristaldıń sındırıwshi betine normal baǵıtta kelip túsken degi ádettegidey emes nurdıń burılıwı.

Túsiwshi nurdıń baǵıtın ózertip kristaldıń ishinde nurlardıń ekige bólinbey tarqalatuǵın baǵıtlardıń bar ekenligine kóz jetkeriwge boladı. Islandiya shpatında tábiyiy romboedrıń doǵal múyeshin tutastıratuǵın *AB* diagonalına parallel bolǵan baǵıt usınday baǵıt bolıp tabıladı (147-súwret). Kristaldıń qálegen noqatınan qos nur sındırıw orın almaytuǵın baǵıtta túsirilgen tuwrı *optikalıq kósher* dep ataladı. Optikalıq kósher menen berilgen nur jatatuǵın tegislik usı nurǵa sáykes keletuǵın *bas kesim* yamasa kristaldıń *bas tegisligi* dep ataladı. Álbette, kristall arqalı sheksiz kóp sandaǵı optikalıq kósherlerdi hám sheksiz kóp sandaǵı bas kesimlerdi ótkeriwge boladı. Qálegen eki bas kesimniń kesilisiw sızıǵı optikalıq kósher bolıp tabıladı.

*Ádettegidey nur oǵan sáykes keletuǵın bas kesim tegisliginde, al ádettegidey emes nur bolsa oǵan sáykes keletuǵın bas kesim tegisligine perpendikulyar baǵıtta polarizaciyanı alǵan*¹⁶.

Ulıwma aytqanda, ádettegidey hám ádettegidey emes nurlardıń bas kesimleri bir birine sáykes kelmeydi. Biraq, kópshilik jaǵdaylarda ádettegidey hám ádettegidey emes nurlardıń bas kesimleri tegislikleriniń arasındadı múyesh kishi hám, soǵan sáykes, eki nurdıń polarizaciya tegislikleriniń arasındadı múyesh $\pi/2$ ge jaqın.

Eger optikalıq kósher túsiw tegisliginde jatsa, onda eki bas kesim bir birine sáykes keledi.

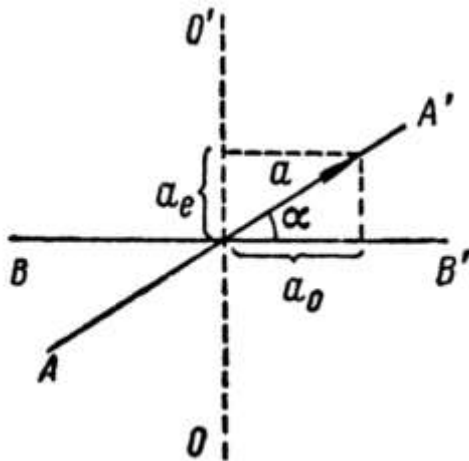
Qos nur sındırıw tek bir baǵıtta orın almaytuǵın kristallardı *bir kósherli* kristallar dep ataladı. Qos nur sındırıw orın almaytuǵın eki baǵıt bar kristallar da bar, olardı *eki kósherli* kristallar dep ataydı.

Móldir bir kósherli kristallardıń kópshiliginde ádettegidey hám ádettegidey emes nurlardıń jutılıwı birdey boladı. Biraq, nurlardıń biri kúshlirek jutılauǵın kristallar da bar. Bunday hár qıylı jutıwdı *dixroizm* dep ataydı.

¹⁶ Eger kristaldaǵı bir baǵıt boyınsha dáslep singan nurlardıń biri, al keyninen ekinshisi ótetuǵınday etip túsiwshi nurdıń baǵıtın ózertetuǵın bolsa, onda ádettegidey hám ádettegidey emes nurlardıń polarizaciya tegislikleri qatań túrde bir birine perpendikulyar boladı. Eger ádettegidey hám ádettegidey emes nurlar bir waqıtta bir túsiwshi nurdan payda bolatuǵın bolsa (ádette usınday jaǵday orın aladı), onday jaǵdayda olardıń polarizaciya tegisligi, ulıwma aytqanda bir birine tolıq perpendikulyar bolmaydı (tómende qarańız). Sebebi ádettegidey hám ádettegidey emes nurlar ushın, ulıwma aytqanda bas kesimler bir birine sáykes kelmeydi.

Kózge kórinetuǵın nurlarda turmalin kristallında júdá kúshli dixroizm baqlanadı. Qalınlıǵı 1 mm bolǵan turmalin kristallarında ádettegidey nur derlik tolıq jutıladı. Turmalinniń bul qásiyeti polarizaciyalıq jaqtılıqtı alıw ushın qollanıladı.

Tábiyiy qattı kristallar menen bir qatar da qos nur sıdırıw suyıq kristallar dep atalatuǵın zatlar da, deformaciyalanǵan jaǵdayda amorf denelerde hám elektr maydanına jaylastırılǵan suyıqlıqlarda baqlanadı (293-paragraf).



150-súwret.

Ádettegidey hám ádettegidey emes nurlardaǵı terbelislerdiń amplitudaları.

Usı waqıtqa shekem biz kristalǵa tábiyiy jaqtılıq túsedı dep boljadıq. Bunday jaǵdayda sınǵan ádettegidey nurlar da, ádettegidey emes nurlar da tolıq polarizaciyalanǵan hám birdey jarıqlıqqa iye edi (dexroizm bolmaǵan jaǵdayda). Endi kristalǵa qanday da bir belgili bolǵan tegislikte polarizaciyalanǵan jaqtılıq kelip túsedı dep boljaymız. Ulıwma aytqanda, bul jaǵdayda da eki nur payda boladı. Biraq olardıń jarıqlıǵı birdey bolmaydı. Meyli, AA' (150-súwret) túsiwshi tolqınıń elektr vektóri terbeletuǵın tegislik bolsın (bul tegislik túsiwshi tolqınıń polarizaciya tegisligine perpendikulyar). Ádettegidey hám ádettegidey emes nurlardıń bas kesimleriniń arasındǵı ayırmanı esapqa almaymız hám bul tegisliklerdi bir birine sáykes keletuǵın tegislikler dep boljaymız. Meyli, OO' eki nurdıń bas kesiminiń tegisligi bolsın (eki nurdıń da). Ádettegi nur kristaldıń bas kesimi OO' tegisliginde polarizaciyalanǵan, demek, ádettegi tolqındaǵı elektr vektóri OO' tegisligine perpendikulyar bolǵan BB' tegisliginde terbeledi. Shaǵılısw menen jutılıwdıń saldarınan joǵaltıwları esapqa almaǵandaǵı ádettegidey nurdıń BB' baǵıtındaǵı amplitudası a_0 mınaǵan teń:

$$a_0 = a \cos \alpha.$$

Bul teńlikte α arqalı ádettegidey nurdaǵı túsiwshi, sınǵan nurlardıń terbelis tegislikleriniń arasındǵı múyesh belgilengen. Energiyanıń aǵısı amplitudanıń kvadratına proporcional bolǵanlıqtan, ádettegidey nurdıń aǵısı W_0 ushın mınaday ańlatpanı alamız:

$$W_0 = W \cos^2 \alpha. \quad (1)$$

Bul ańlatpada gde W - túsiwshi nurdaǵı energiyanıń aǵısı.

Ádettegidey emes nur kristaldıń bas kesimine perpendikulyar tegislikte polarizaciyalanǵan, ondaǵı terbelisler bas kesim OO' tegisliginiń ózinde júzege keledi. Sonlıqtan ádettegidey emes nurdıń amplitudası a_e

$$a_e = a \sin \alpha$$

hám, usıǵan sáykes, energiyanıń aǵısı W_e mınaǵan teń:

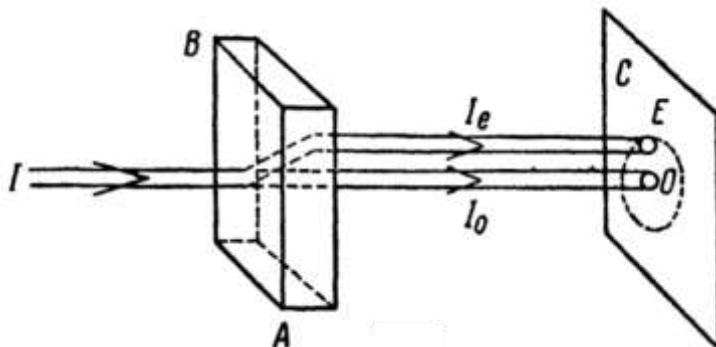
$$W_e = W \sin^2 \alpha. \quad (1a)$$

Bir tegis polarizaciyalanğan nurdan payda bolğan ádettegidey hám ádettegidey emes nurlardaǵı energiyanıń aǵısın anıqlaytuǵın (1)- hám (1a) formulardı Malyu nızamı dep ataydı¹⁷. Tegis polarizaciyalanğan nur ushın ádettegidey hám ádettegidey emes nurlardaǵı aǵıslardıń qatnası ushın (1)- hám (1a) formulalar boyınsha

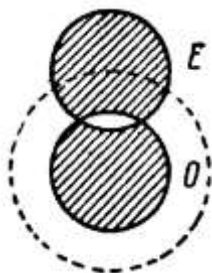
$$\frac{W_e}{W_0} = \operatorname{tg}^2 \alpha \quad (2)$$

formulasına iye bolamız.

151-súwret. Tegis polarizaciyalanğan nurdan payda bolğan ádettegidey hám ádettegidey emes nurlardıń intensivliklerin salıstırıw.



Eki nurdaǵı aǵıslardıń qosındısı túsiwshi nurdaǵı aǵısqa teń
 $W \cos^2 \alpha + W \sin^2 \alpha = W$.
 Bul teńlik energiyanıń saqlanıw nızamınan kelip shıǵadı.



152-súwret.
 Ádettegidey hám ádettegidey emes nurlardıń intensivlikleriniń qosındısınıń turaqlı bolıwı.

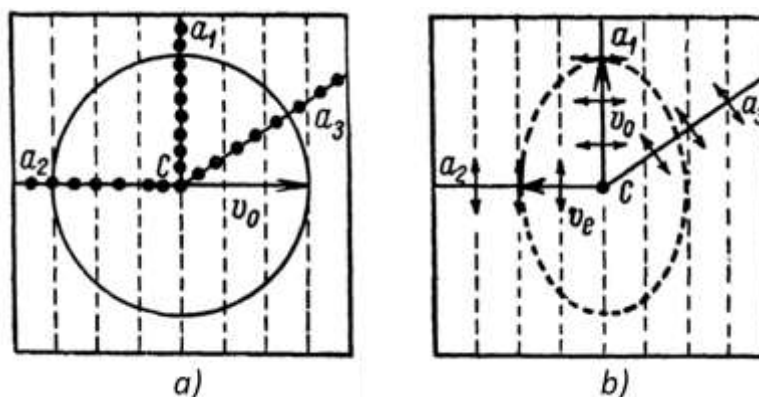
Biz alğan nátiyjelerdi tájiriyyede ańsat illyustraciyalawǵa boladı. Meyli, tegis polarizaciyalanğan jaqtılıqtıń jıńışke dástesi plastinka túrinde kesip alınğan kristaldıń AB qaptalına normal baǵıtta kelip túsetuǵın bolsın (151-súwret). Eger kristaldıń optikalıq kósheri AB qaptalına normal baǵıtta túspeytuǵın, sonıń menen birge parallel de emes bolsa, onda ádettegidey emes I_e nuri kristalda burıladı hám onnan ádettegidey nur I_o ge parallel bolıp shıǵadı. Eki nur C ekranında O hám E dóńgeleklerin beredi. Kristaldı ádettegidey nur I_o menen sáykes keletuǵın kósherdiń dógereginde burǵanda ekrandaǵı O dóńgelegi qozǵalıssız qaladı, al E dóńgelegi 151-súwrette kórsetilgendey bolıp jılıyadı. Bunday jaǵdayda dástelerdiń jarıqlıǵı ózgeredi. Eger kristaldı onıń bas kesimi túsiwshi jaqtılıqtıń polarizaciya tegisligine parallel jaylastırısaq ($\alpha = 0$), onda I_o nuri maksimallıq jarıqlıqqa iye boladı, al I_e nuri sónedi. Kristaldı burǵanda ádettegidey emes I_e nuri payda boladı hám onıń jarıqlıǵı $\alpha = \pi/2$ teńligi orınlanǵanda maksimallıq mániske jetedi; bunday jaǵdayda ádettegidey nur bolmaydı. $\alpha = \pi$ teńligi orınlanǵanda ádettegidey nur qaytadan maksimallıq jariq bolıp, ádettegidey emes nur sónedi h.t.b.

¹⁷ Rus tilindegi fizikalıq ádebiyatta (1) hám (1a) formulalar geypara waqıtları Malyus nızamı dep te ataladı. Bul formulalar 1810-jılı francuz fizigi Malus tárepinen keltirip shıǵarıldı (Malyu dep oqıladı) hám eksperimentte Arago tárepinen tastıyıqlandı.

Usınıń menen bir qatarda eki nurdıń jarıqlıǵınıń qosındısıń turaqlı bolıp qalatuǵınlıǵın ańsat tekserip kóriwge boladı. Onıń ushın jaqtılıqtıń túsiwshi nurın C ekranındaǵı O hám E nurları bir biri menen bazı bir dárejede betlesetuǵın bolıwı ushın túsiwshi nurdı keńeytemiz (152-súwret). Bunday jaǵdayda kristaldı burǵanda dóńgeleklerdiń hár biriniń jarıqlıǵı ózgeredi, Biraq olar bir biri menen betlesetuǵın oblastta jarıqlıq barlıq waqıtta ózgerissiz qaladı.

§ 286. Bir kósherli kristaldaǵı tolqınlıq betler. Bir kósherli kristallardaǵı qos nur sındırıw qubılısı birinshi ret Gyuygens tárepinen onıń 1690-jılı jarıq kórgen "Jaqtılıq haqqındaǵı traktat" kitabında túsindirildi. Gyuygens kristaldaǵı ádettegidey nurǵa sfera tárizli tolqınlıq bet, al ádettegidey emes nurǵa aylanıw ellipsoidi túrindegi bet sáykes keledi dep boljadı. Gyuygenstiń gipotezası jaqtılıqtıń tábiyatı hám kristallardıń qurılısı haqqındaǵı házirgi zaman kóz-qaraslarına sáykes keledi.

Kristallardıń anizotropiyası olardıń tek makroskopiyalıq qásiyetlerinde ǵana emes (serpimlilik, jıllılıq keńeyiwi h.t.b.), al olar turatuǵın bólekshelerdiń qásiyetlerinde de kórinedi. Kristallardı payda etetuǵın atomlar menen ionlar, ádette, anizotrop vibratorlar bolıp tabıladı. Anizotrop vibrator óziniń menshikli terbelis jiyiligi menen birge (izotop vibrator sıyaqlı) bir birine perpendikulyar tolıq belgili bolǵan úsh baǵıtta hár qıylı ω_1 , ω_2 hám ω_3 menshikli terbelis jiyiliklerine iye boladı.



153-súwret. Kristaldaǵı eki túrli tolqınlıq betlerdiń payda bolıwı: a) sferalıq hám b) - ellips tárizli.

Vibratorlardıń usınday anizotropiyası olardıń asimmetriyası (simmetriya bolmaǵan qurılısqa iye molekullar) yamasa kristallıq pánjeredeǵı hár bir bólekshege tásir etetuǵın kúshlerdiń xarakterı menen baylanıslı boladı. Eger jaqtılıq tolqınındaǵı elektr vektorınıń terbelisleriniń baǵıtı, misalı, joqarıda esletilip ótilgen birinshi baǵıt penen sáykes keletuǵın bolsa, onda májbúriy terbelislerdiń amplitudası jaqtılıqtıń jiyiligi ω nıń kvadratı menen ω_1 menshikli terbelis jiyiliginiń kvadratınıń ayırması menen anıqlanadı. Eger kristall elektr vektorınıń baǵıtı basqa baǵıtlardıń birine sáykes keletuǵın, misalı, ekinshi baǵıtqa sáykes keletuǵın bolsa, onda májbúriy terbelislerdiń amplitudası $\omega^2 - \omega_0^2$ ayırmasıń mánisi boyınsha anıqlanadı. Bul jaqtılıq tolqınındaǵı terbelislerdiń hár qıylı baǵıtlarına jutıw jolaǵınıń hár qıylı tásiriniń bolatuǵınlıǵına, usıǵan baylanıslı hár qıylı tarqalıw tezlikleriniń sáykes keletuǵınlıǵına alıp keledi (279-paragraf). Bir kósherli kristallar ushın úsh menshikli terbelislerdiń ekewi bir birine sáykes keledi. Sonlıqtan tek eki jiyilik bir birine teń emes.

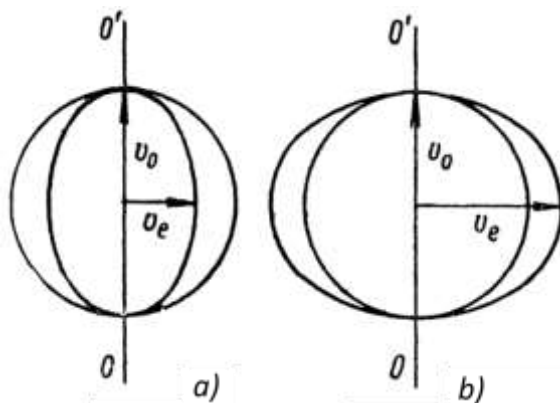
Kristaldı payda etetuǵın bóleksheler usı kristaldıń optikalıq kósheriniń boyındaǵı terbelisler ushın ω_1 menshikli terbelis jiyiligine, al optikalıq kósherge perpendikulyar baǵıtta ω_2 menshikli terbelisler jiyiligine iye bolsın.

Kristalda bas kesim tegisligin ayırıp alamız hám bazı bir C noqatınan bul tegisliktegi hár qıylı baǵıtlarda tarqalatuǵın nurlardı qaraymız (153-súwret). Meyli, bul nurlardıń hár qaysısı tolıq

polýarizaciýalángan hám nurlardıń hár qaysısı kristaldıń biz qarap atırǵan bas kesimine perpendikulyar baǵıtta terbeletuǵın bolsın.

153-a súwrette optikalıq kósherge parallel bolǵan baǵıtlar punktir sızıqlar menen, al elektr vektorınıń terbelisleriniń baǵıtı noqatlar menen belgilengen. Kórinip turǵanıday, Ca_1 , Ca_2 h.t.b. nurlardıń qálegeni ushın terbelisler optikalıq kósherge perpendikulyar. Usınıń saldarınan jaqtılıq tolqını vibratorlardı menshikli terbelis jıyılıǵı ω_2 bolǵan jıyılıq sáykes keletuǵın optikalıq kósherge perpendikulyar baǵıtta terbeltedi; demek, terbelisleri bas kesim tegisligine perpendikulyar bolǵan barlıq nurlar birdey v_0 tezligi menen tarqaladı. C orayınan shıqqan barlıq nurlar birdey waqıt aralıǵında jetip keletuǵın noqatlardıń geometriyalıq ornı 153-a súwrette tutas sızıq penen kórsetilgen sheńberdi payda etedi. Eger biz C noqatı arqalı ótetuǵın múmkin bolǵan barlıq bas kesimlerdiń jıyınǵın qarasaq, onda barlıq nurlardıń ushlarınń geometriyalıq ornı sfera bolıp tabıladı. Polýarizaciya tegisligi elektr vektorınıń terbelisleri júzege keletuǵın tegislikke perpendikulyar bolǵanlıqtan, biz qarap ótken jaǵday bas kesim tegisliginde polýarizaciýalángan jaqtılıqqa sáykes keledi. Bunnan biz mınaday juwmaqqa kelemiz: kristaldıń bas kesimleriniń tegisliginde polýarizaciýalángan nurlar barlıq táreplerde birdey v_0 tezligi menen tarqaladı. Olar beti izotrop ortalıqlardaǵıday sfera tárizli bolǵan tolqın frontın payda etedi hám usıǵan sáykes ádettegidey sınıw nızamına baǵınadı. Bul nurlar ushın sınırıw koefficienti $n = \frac{c}{v}$, bul teńlikte c arqalı sınıw koefficienti belgilengen.

Endi elektr vektorınıń terbelisleri bas kesim tegisliginde terbeletuǵın nurlardı qaraymız (153-b súwret). Bul kristaldıń bas kesimi tegisligine perpendikulyar bolǵan tegislikte polýarizaciýalángan jaqtılıqqa sáykes keledi. Súwrette kórinip turǵanıday, hám qıylı bolǵan Ca_1 , Ca_2 , Ca_3 nurları ushın terbelisler optikalıq kósherge hár qıylı múyeshler menen júzege keledi. Mısalı, Ca_1 nurındaǵı terbelisler optikalıq kósherlerge perpendikulyar, al Ca_2 nurındaǵı terbelisler optikalıq kósherge parallel. Bul nurlardıń birinshisi vibratorlardıń amplitudası ω_2 jıyılıǵı menen anıqlanatuǵın terbelisin payda etedi hám, sonlıqtan, v_0 tezligi menen tarqaladı. Ekinshi Ca_2 nurı vibratorlardıń amplitudası ω_2 jıyılıǵı menen anıqlanatuǵın terbelisin payda etedi hám sonlıqtan onıń tezligi Ca_1 nurınıń tezliginen ózgeshe bolıwı kerek; bul tezlikte v_e arqalı belgileybiz. Qanday da bir basqa baǵıtta tarqalatuǵın nur, mısalı Ca_3 nurı v_e menen v_0 tezlikleriniń arasındǵı tezlik penen tarqaladı. Solay etip, kristaldıń bas kesimine perpendikulyar tegislikte polýarizaciýalángan nurlarǵa hám qıylı baǵıtta hár qıylı bolǵan tezlikler sáykes keledi. Usınıń nátiyjesinde tolqınlıq bet izotrop zattaǵıǵa salıstırǵanda basqasha formaǵa, atap aytqanda aylanıw ellipsoidınıń formasına iye boladı. Onıń bas tegisliklerdegi kesimleriniń biri 153-b súwrette keltirilgen (ádettegidey emes nurlardıń tolqınlıq betiniń haqıyqatında da aylanıw ellipsoidı bolatuǵınlıǵınıń dálili 287-paragrafta qarańız). Usınday tolqınlıq betke sáykes keletuǵın nurlar ádettegidey sınıw nızamına baǵınbaydı.



154-súwret.
a) oń hám b) teris kristallardaǵı tolqınlıq betler.

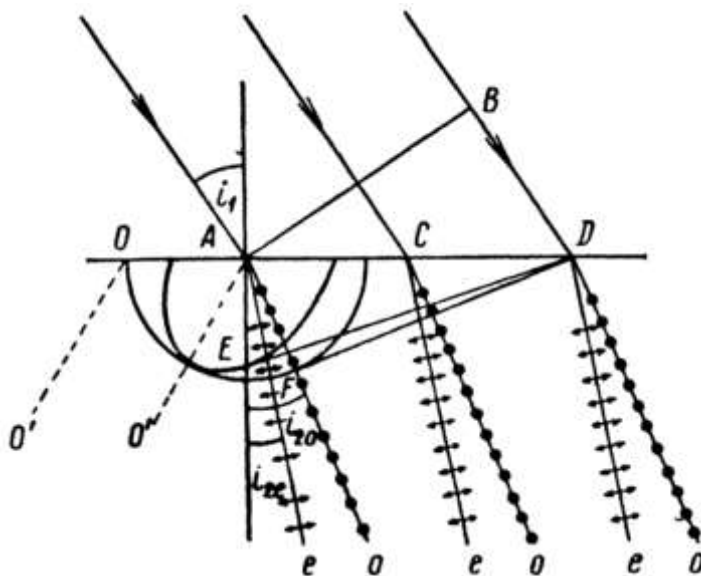
Bazı bir kristallar ushın optikalıq kósherge parallel bolǵan terbelislerdiń tarqalıw tezligi optikalıq kósherge perpendikulyar bolǵan terbelislerdiń tarqalıw tezligine salıstırǵanda kishi ($v_e < v_o$). Bunday kristallardı *oń kristallar* dep ataydı, olar ushın ellipsoid tárizli tolqın betiniń úlken yarım kósheri sferalıq tolqınlıq bettiń radiusına sáykes keledi (154-a súwret). *Teris* dep atalatuǵın basqa kristallar ushın ellipsoidtiń kishi yarım kósheri sferalıq tolqınlıq bettiń radiusı menen sáykes keledi (154-b súwret). Eki jaǵdayda da OO' optikalıq kósheri ellipsoid hám sfera tárizli betlerdiń tiyisiw noqatı arqalı ótedi, bul kósher arqalı qálegen tegislikte polarizaciyalanǵan nurlardıń tarqalıw tezlikleri birdey.

§ 287. Bir kósherli kristallardaǵı ádettegidey hám ádettegidey emes nurlardı tabıw. Bir qatar dara jaǵdaylar ushın bunnan aldırıǵı paragrafta ornatılǵan sfera hám ellipsoid tárizli tolqınlıq betler haqqındaǵı kóz-qaraslardı bir kósherli kristallardaǵı ádettegidey hám ádettegidey emes nurlardı qurıw ushın paydalanamız.

1. *Túsiw tegisliginde OO' optikalıq kósheri kristaldıń sındırıwshı qaptalına súyir múyesh jasaydı* (155-súwret). Meyli, kristaldıń sındırıwshı qaptal betine tegis AB tolqın frontı túsetuǵın bolsın. Túsiw múyeshi i_1 shamasına teń. B frontınıń oń sheti birinshi ortalıqta D noqatına tarqalaman degenshe kristalda A noqatınıń dógeriginde sferalıq hám ellipsoidalıq bolǵan eki tolqınlıq bet payda boladı. Olar bir biri menen AO' optikalıq kósheriniń baǵıtında tiyisedi. 155-súwrette ellipsoida tárizli bet óziniń barlıq noqatları menen sfera tárizli bettiń ishinde jaylasadı. Bul jaǵday oń kristalǵa sáykes keledi. A menen D noqatlarınıń ortasındaǵı barlıq noqatlardan da tolqınlıq betler payda boladı, Biraq bul betlerdiń ólshemleri kishi. Gyuygens principi boyınsha biz DF - sferalarǵa urınba hám DE ellipsoidlarǵa urınba bolǵan eki betti ótkeriwimiz kerek. Birinshisi sıǵan ádettegidey tolqınnıń frontın, ekinshisi ádettegidey emes sıǵan tolqınnıń frontın beredi. Ádettegidey sıǵan Ao , Co hám Do nurların sferalıq betlerdiń DF tegisligi menen kesilisiw orınlarına sıyıqlardı júrgiziw arqalı alamız. Ádettegidey emes nurlardaǵı elektr vektorınıń terbelisleri súwret tegisligine parallel bolǵan kristaldıń bas kesimine perpendikulyar tegisligine perpendikulyar baǵıtta júzege keledi; olar noqatlardıń járdeminde belgilengen. Sıǵan ádettegidey emes Ae , Ce hám De nurların ellips tárizli betlerdiń DE tegisligi menen tiyisetuǵın noqatları arqalı sıyıq júrgiziw jolı menen alamız. Biz qarap atırǵan jaǵdayda olar túsiw tegisliginde jatadı, Biraq olar tolqın frontına *normal baǵıtlanǵan emes*. Ádettegidey emes nurlarda elektr vektorınıń terbelisleri kristaldıń bas kesimi tegisliginde júredi (strelkalardıń járdeminde kórsetilgen). Solay etip, súwrette hár qıylı baǵıtlarda tarqalatuǵın ádettegidey hám ádettegidey emes nurlardıń eki sistemasınıń payda bolatuǵınlıǵı kórsetilgen.

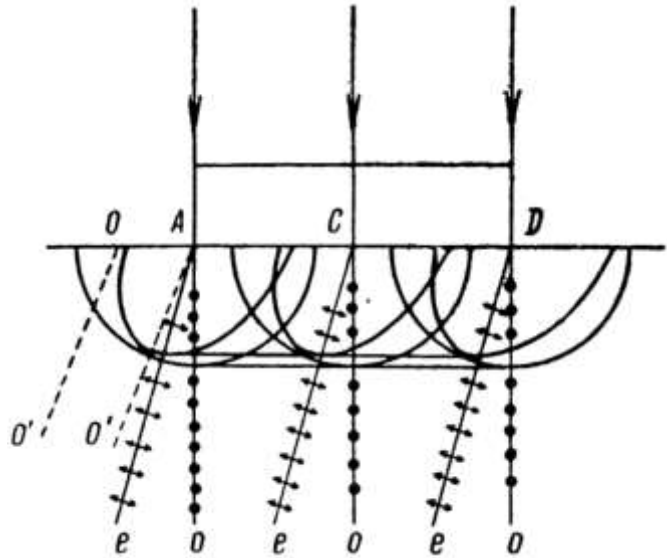
155-súwret.

Ádettegidey hám ádettegidey emes nurlardı qurıw: OO' optikalıq kósheri túsiw tegisliginde sındırıwshı qaptal bet penen súyir múyesh jasap jatır.



156-súwret.

Ádettegidey hám ádettegidey emes nurlardı qurıw: jaqtılıq sıdırıwshı qaptal betke normal bağıtta kelip túsedi, OO' optikalıq kósheri sıdırıwshı qaptal bet penen súyir múyesh jasaydı.



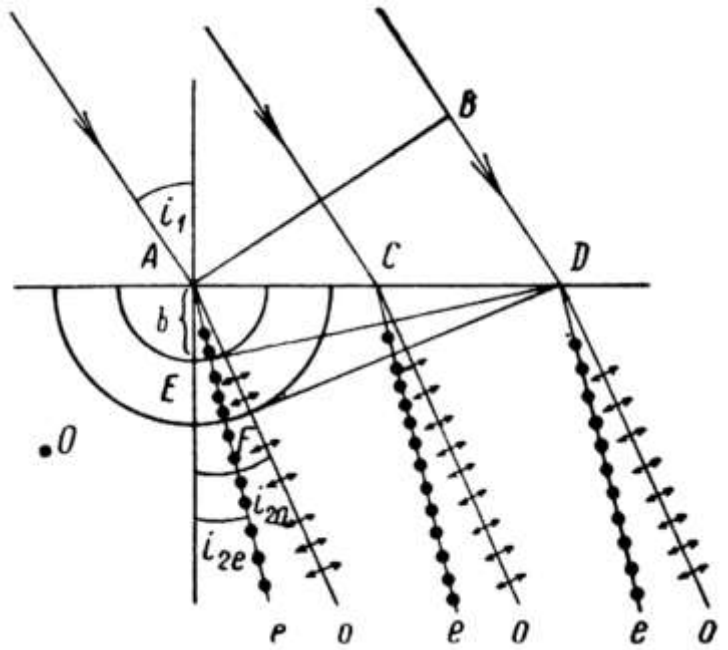
Eger jaqtılıqtıń túsiw tegisligi optikalıq tegislikke parallel bolmasa, onda ádettegidey hám ádettegidey emes nurlar bir tegislikte jatpaǵan bolar edi. Haqıyqatında da, sızilma tegisligin túsiw tegisligi menen qaytadan sáykes keltirip, AO' optikalıq kósheri (155-súwret) hám tolqın frontınıń ellips tárizli bet penen kesilisiw noqatı E sızilma tegisliginde jatpaytuǵınlıǵın kóremiz. Bunnan ádettegidey emes AE nurınıń sızilma tegisliginde jatpaytuǵınlıǵı kelip shıǵadı, al ádettegidey AF nurı bolsa burınǵıday sızilma tegisliginde jatadı. Bunday jaǵdayda da sıǵan ádettegidey emes DE tolqınıń frontınıń túsiw tegisligine perpendikulyar bolatuǵınlıǵın atap ótiw úlken áhmiyetke iye.

2. *Jaqtılıq kristaldıń sıdırıwshı qaptal betine normal bağıtta túsedi. OO' optikalıq kósheri kristaldıń sıdırıwshı qaptal beti menen súyir múyesh jasaydı (156-súwret).* Bunday jaǵdayda barlıq A, C hám D noqatlarınıń átirapında birdey radiusqa iye bolǵan sferalıq tolqınlıq betler payda boladı, usınıń saldarınan kristaldaǵı ádettegidey nurlardıń tolqın frontı túsiwshı tolqınǵa parallel tarqaladı hám ádettegidey AO, CO hám DO nurlar kristaldıń qaptal betin sınbay kesip ótedi. Ádettegidey emes tolqınıń tolqın frontı da túsiwshı frontqa parallel, Biraq onıń ellipsoid tárizli tolqınlıq bet penen kesilisiw noqatları A, C hám D noqatlarına salıstırǵanda jılısqan. Bul ádettegidey emes Ae, Ce hám De tolqınlarınıń jaqtılıqtıń túsiw baǵıtına salıstırǵanda burılıwına alıp keledi. Solay etip, Gyuygenstıń tolqın frontın geometriyalıq qurıw usılı jaqtılıq kristaldıń qaptal betine perpendikulyar bağıtta túskende ádettegidey emes nurdıń baǵıtınıń ózgeretuǵınlıǵı túsindiredi.

3. *Optikalıq kósher sıdırıwshı qaptal betke parallel hám túsiw tegisligine perpendikulyar.* Bul jaǵday 157-súwrette kórsetilgen. Túsiw tegisligi sızilma tegisligine parallel etip qoyılǵan. Optikalıq kósher OO' sızilma tegisligine perpendikulyar.

157-súwret.

Ádettegidey hám ádettegidey
emes nurlardı qurıw: OO'
optikalıq kósheri sındırıwshı
qaptal betke parallel hám túsiw
tegisligne perpendikulyar.



Optikalıq kósher ellips tárizli bettiń aylanıw kósheri bolıp tabılatuǵın bolǵanlıqtan, biz qarap atırǵan jaǵdayda ádettegidey emes tolqınınıń tolqınlıq betiniń sıızılma tegislige menen kesilisiw sıızıǵı dóńgelek túrine iye. Oń kristall ushın bul dóńgelektiń radiusı AE ellipsoidtiń kishi yarım kósheri b ǵa teń hám ádettegidey tolqınınıń sferalıq betiniń radiusınan kishi.

Sızılmadan ádettegidey emes nur ushın i_1 túsiw múyeshiniń sinusınıń sınıw múyeshi i_{2e} niń sinusına qatnasınıń i_1 múyeshiniń qálegen mánisi ushın

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_{2e}} = \frac{BD}{b}$$

teńliginiń orınlı bolatuǵınlıǵı kórinip tur.

Eger birinshi ortalıqta (boslıqta) jaqtılıq BD kesindisi ótetuǵın waqıttı τ arqalı belgilesek, onda

$$BD = c\tau$$

hám

$$b = v_e\tau$$

teńliklerin alamız. Bul teńliklerde c - boslıqtaǵı jaqtılıqtıń tezligi, v_e arqalı elektr vektorınıń terbelisleri optikalıq kósherge parallel bolǵan kristaldaǵı jaqtılıqtıń tarqalıw tezligi belgilengen.

Bunnan

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_{2e}} = \frac{c}{v_e} \quad (1)$$

teńligine iye bolamız.

$\frac{c}{v_e}$ qatnası turaqlı bolǵanlıqtan, bunday jaǵdayda ádettegidey emes nur ádettegi sınıw nızamına baǵınadı.

$$\frac{c}{v_e} = n_e$$

qatnası *ádettegidey emes nurdıń sınıw koefficienti* dep ataladı.

Oń kristallar ushın ádettegidey emes nurlar ushın sındırıw koefficienti n_e ádettegidey nurlar ushın sındırıw koefficienti n_o den úlken. Teris kristallar ushın $n_e < n_o$.

V keste.

$\lambda = 0,589$ mkm tolqın uzınlıǵına iye jaqtılıq ushın
ádettegidey nurdıń sınıw koefficienti n_o menen
ádettegidey emes nurdıń sınıw koefficienti

n_e lerdiń mánisleri

Kristall	n_o	n_e
Islandiya shpatı	1,658	1,486
Natriy selitrası	1,585	1,337
Kvarc	1,543	1,552
Muz	1,309	1,310

Kópshilik kristallarda ádettegidey hám ádettegidey emes nurlar ushın sınıw koefficientleriniń mánisleri bir birinen úlken ayırmaǵa iye emes.

V kestede bir qatar kristallar ushın n_o hám n_e sınıw koefficientleriniń mánisleri keltirilgen.

4. Optikalıq kósher sındırıwshı qaptal betke hám jaqtılıqtıń túsiw tegisligine parallel. Bunday jaǵdayda (158-súwret) A noqatınan kristaldıń ishine sferalıq hám ellipsoid tárizli tolqınlıq betler tarqaladı, olardıń bir birine tiyisiw noqatları kristaldıń sındırıwshı qaptal betinde túsiw tegisliginde jatadı. C noqatınan urınba CF hám CE urınba tegisliklerin ótkerip ádettegidey hám ádettegidey emes sıńǵan tolqınlardıń frontların alamız. Ádettegidey emes tolqınlıq bet penen sızılma tegisliginiń kesimi ellips bolıp tabıladı, onıń úlken yarım kósheri a sferanıń radiusı R ge sáykes keledi (oń kristall), al kishi yarım kósher b oǵan perpendikulyar. Ellipstıń belgili bolǵan qásiyeti boyınsha CD urınba astı kesindisiniń uzınlıǵı kishi yarım kósher b nıń uzınlıǵınan ǵárezli emes. Bunnan F penen E kesilisiw noqatlarınıń CA ǵa perpendikulyar bolǵan bir FED tuwrısınıń boyında jaylasatuǵınlıǵı kelip shıǵadı.

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} i_{20} &= \frac{AD}{DF}, \\ \operatorname{tg} i_{2e} &= \frac{AD}{DE}. \end{aligned}$$

Bul teńlikte i_{20} - ádettegidey nurdıń sınıw múyeshi, i_{2e} - ádettegidey emes nurdıń sınıw kórsetkishi. Bul qatnaslardan mınanı alamız:

$$\frac{\operatorname{tg} i_{20}}{\operatorname{tg} i_{2e}} = \frac{DE}{DF} = \frac{b}{R}.$$

Biraq, $\frac{b}{R}$ qatnası v_e/v_0 qatnasına teń. Bunnan

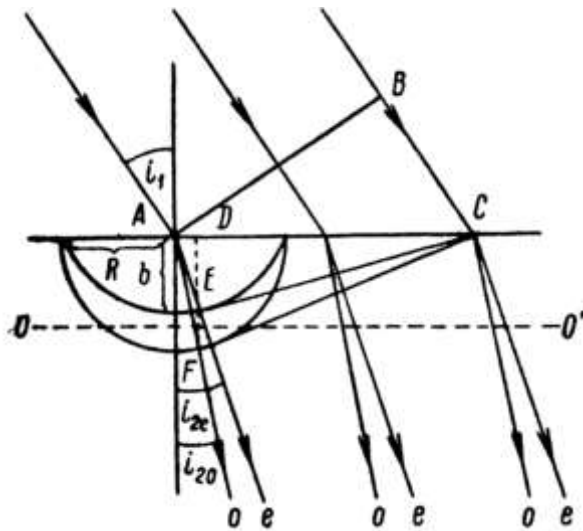
$$\frac{\operatorname{tg} i_{20}}{\operatorname{tg} i_{2e}} = \frac{v_e}{v_0} \quad (2)$$

formulasına iye bolamız. Eń aqırında

$$\frac{v_e}{v_0} = \frac{n_0}{n_e}$$

teńligin alamız. Bul teńlikte n_0 - ádettegidey nurdıń sınıw koefficienti, n_e - ádettegidey emes nurdıń sınıw koefficienti. Bunnan (2)-qatnası mınaday túrge iye boladı:

$$\frac{\operatorname{tg} i_{20}}{\operatorname{tg} i_{2e}} = \frac{n_0}{n_e}. \quad (2a)$$

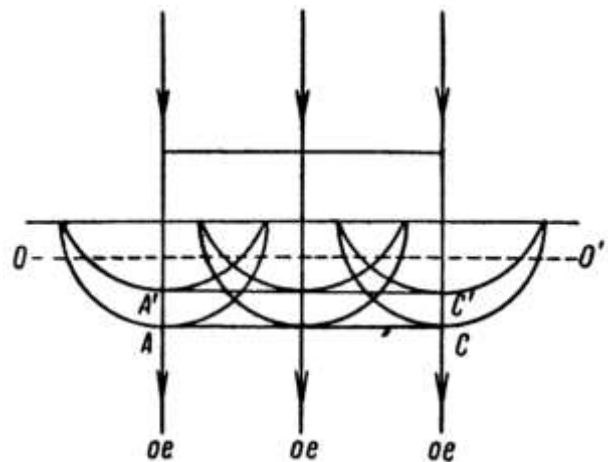


158-súwret.

Ádettegidey hám ádettegidey emes nurlardı qurıw: OO' optikalıq kósheri sındırıwshı qaptal betke hám túsiw tegisligine parallel.

159-súwret.

Ádettegidey hám ádettegidey emes nurlardı qurıw: OO' optikalıq kósheri sındırıwshı qaptal betke parallel. Jaqtılıq sındırıwshı qaptal betke perpendikulyar bağıtta túsedı.

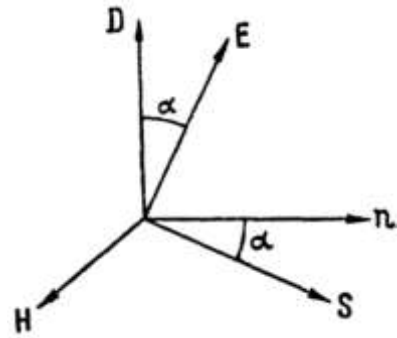


(2a) formulasınıń durıs ekenligi eksperimentlerde tastıyıqlanadı. (1)- hám (2)-qatnaslardıń haqıyqatında da orınlanatuǵınlıǵı faktı ádettegidey emes tolqınıń frontınıń optikalıq kósherge perpendikulyar bolǵan kesimde dóńgelek túrine iye bolatuǵınlıǵın, al optikalıq kósherge parallel bolǵan kesimde ellips túrine iye bolatuǵınlıǵın kórsetedi. Bunnan ádettegidey emes tolqınıń betiniń qanday da bir basqa bet emes, al aylanıw ellipsoidı bolatuǵınlıǵı tikkeley kelip shıǵadı.

5. *Optikalıq kósher sındıratuǵın qaptal betke parallel. Jaqtılıq sındırıwshı qaptal betke normal bağıtta kelip túsedı.* 159-súwretten bul jaǵdayda ádettegidey hám ádettegidey emes nurlardıń sınbay ótetuǵınlıǵı hám kristalda birdey bağıtta tarqalatuǵınlıǵı kórinip tur. Biraq, ádettegidey hám ádettegidey emes tolqınlardıń AC hám $A'C'$ frontları bir birine sáykes kelmeydi: oń kristall bolǵan jaǵdayda ádettegidey emes tolqınıń $A'C'$ frontı ádettegidey tolqınıń AC frontınan *artta* qaladı; teris kristall bolǵan jaǵdayda ádettegidey bolmaǵan tolqınıń frontı ádettegi tolqınıń frontınan *ozadı*. Usınıń saldarınan eki jaǵdayda da ádettegidey hám ádettegidey emes tolqınlardıń arasında fazalar ayırması payda boladı.

§ 288. Normallar beti. Jaqtılıqtıń izotrop ortalıq arqalı ótiwin qaraǵanımda biz jaqtılıqtıń fazalıq hám gruppalıq tezliklerin ayırdıq. Eger jaqtılıq monoxromat bolmasa hám za dispersiyaǵa iye bolsa, onda gruppalıq tezlik energiyanıń tarqalıw tezligin anıqlaydı. Qatań túrdegi monoxromat jaqtılıq ushın (oǵan qatań túrde belgili bolǵan jıyılıkke iye, keńislik penen waqıt boyınsha sheklenbegen tolqın sáykes keledi) izotrop ortalıqlar ushın da, anizotrop ortalıqlar ushın da gruppalıq tezlik haqqındaǵı túsiniń mánisin joǵaltadı.

160-súwret.
Ádettegidey emes nurdağı maydannıń
vektorlarınń jaylasıwı.



Izotrop ortalıqta tarqalatuǵın qatań túrdegi monoxromat tolqın bolǵan jaǵdayda fazalıq tezlik tek tolqınnıń fazanıń tarqalıw tezligin ǵana anıqlap qoymay, energıyanıń alıp júriw tezligin de anıqlaydı. Anizotrop ortalıqta bolsa awhal basqasha; ádettegidey emes nurda tolqınnıń fazası menen onıń energıyasınıń tarqalıw tezlikleri tek shaması boyınsha ǵana emes, al baǵıtı boyınsha da hár qıylı boladı. Ádettegidey nurdıń tezlikleriniń ekewi de birdey boladı. Ádettegidey emes nurdağı tolqınnıń fazası menen energıyanıń shaması boyınsha da, baǵıtı boyınsha da hár qıylı bolıwı bul nurdağı jaqtılıq terbelisleriniń kóldeneńligi menen baylanıslı. Izotrop ortalıqlarda bir birine parallel bolǵan elektr maydanınıń kernewligi E menen indukciya D vektorları anizotrop ortalıqlardağı ádettegidey emes nurda bir birine parallel emes, olardıń arasında bazı bir α múyeshi bolıp, onıń shaması kristaldağı jaqtılıqtıń tarqalıw baǵıtınan ǵárezli boladı (II tomdağı 140-paragraftı qarańız). Magnit maydanınıń kernewligi vektorı H elektr maydanınıń kernewligi E ge de, indukciya D ǵa da perpendikulyar (160-súwret). D menen H vektorları jatırǵan tegislikke túsirilgen normal n (160-súwret) tolqınnıń fazasınıń tarqalıw baǵıtın anıqlaydı, al tolqınnıń energıyasınıń tarqalıw baǵıtı Umov-Poynting vektorınıń baǵıtı menen anıqlanadı (E hám H vektorları jatırǵan tegislikke perpendikulyar bolǵan S baǵıtı). Teoriyanıń kórsetiwı boyınsha

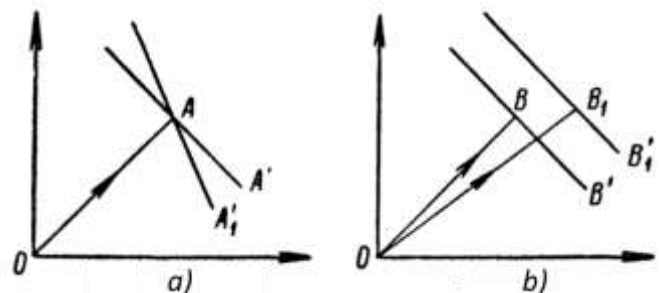
$$v'_e = v_e \cos \alpha.$$

Bul teńlikte v'_e - fazanıń tarqalıw tezliginiń san mánisi, v_e - ádettegidey emes nurdağı energıyanıń tarqalıw tezliginiń san mánisi. Ádettegidey nurda E hám D nurları bir birine parallel hám shamarları boyınsha da birdey: $v'_e = v_e$, Biraq, álbette, ádettegidey bolmaǵan nurdağı tezlikke teń emes.

286-paragrafta tolqınlıq betlerdi qurǵanda, biz nurlardıń baǵıtında energıyanıń tarqalıw tezlikleri v'_e hám v_e lerdı qoydıq. Tek usınday jaǵdayda ǵana 287-paragrafta kórsetilgen qaǵıydalar boyınsha Gyuygens qurıwı durıs nátiyjelerge alıp keledi: sferalıq hám ellipsoid tárizli tolqınlıq betlerge urınba tegislik tolqınlardıń frontlarınıń ornın anıqlaydı (turaqlı fazalar tegislikleri); nurlar tiyisiw noqatları arqalı ótkeriledi hám energıyanıń alıp júriwı baǵıtı menen sáykes keledi; tolqınnıń frontı óziniń normalınıń baǵıtında tarqaladı.

161-súwret.

- a) nurlardıń bir OA baǵıtına sáykes keletuǵın eki AA' hám AA'_1 frontları;
b) bir birine parallel bolǵan BB' hám $B_1B'_1$ frontlarına sáykes keletuǵın OB hám OB' nurları.



Biziń joqarıda kórgenimizdey, ádettegidey emes tolqındağı nurlar ádette tolqınlıq betke perpendikulyar emes. Tek bir OA baǵıtında tarqalatuǵın ádettegidey hám ádettegidey emes nurlarǵa (161a súwret) bir birine parallel bolmaǵan tegis AA' hám AA'_1 frontları sáykes keledi. Bir birine parallel bolǵan ádettegidey BB' hám ádettegidey emes $B_1B'_1$ frontlarına hár qıylı bolǵan eki OB hám OB' nurlar sáykes keledi (161b súwret).

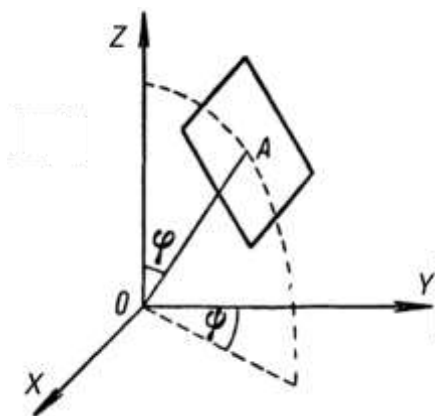
Biraq, kristaldağı tegis fronttı qaraǵanda nurlardıń ornına frontqa túsirilgen normallardıń semeystvosın ótkeriwge de boladı. Normallar energıyanıń alıp júriwı baǵıtına sáykes kelmese da, jaqtılıqtıń kristaldağı tarqalıwın bir mánisli táriyipleý aladı. Nurlar menen normallardıń arasındağı ayırma

jaqtılıq kristaldıń qaptal betine perpendikulyar baǵıtta túsken jaǵdayda ayırıqsha ayqın kórinedi (bunday jaǵdayda optikalıq kósher menen kristaldıń qaptal betiniń arasındaǵı múyeshtiń súyir bolıwı kerek, 287-paragraftaǵı 2-jaǵday). 156-súwrette kórinip turganınday, bunday jaǵdayda tek ádettegidey AO , CO hám DO nurlar kristaldıń qaptal beti arqalı sınbay ótedi. Al ádettegidey emes Ae , Ce hám De nurları bir tárepke qaray burıladı. Biraq eki tegis front ta (ádettegidey hám ádettegidey emes) bir birine parallel hám kelip túsiwshi birinshi tegis frontqa parallel. Bunnan eki frontqa túsirilgen normallardıń bir birine sáykes keletuǵınlıǵı hám kristaldıń qaptal beti arqalı sınbay ótetuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Biz qarap atırǵan jaǵdayda nurlar ádettegidey emes jaqtılıq dástesiniń kristaldıń qaptal beti arqalı ótkendegi burılıw qásiyetin táriyipleydi, al qaptal bet arqalı sınbay kesip ótetuǵın normallar kristaldıń ishinde ádettegidey emes fronttıń kristalǵa kelip túsiwshi frontqa parallel bolıp qalatuǵın jaǵdayǵa sáykes keledi.

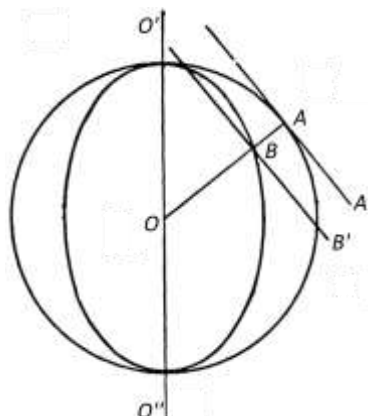
Meyli, bir kósherli kristalda A tegis frontı tarqalatuǵın bolsın (162-súwret). Oǵan túsirilgen normaldıń baǵıtı φ hám ψ múyeshleri boyınsha anıqlanatuǵın bolsın. Eger bul tegis front ózi ózine parallel qalǵan jaǵdayda t waqıtınıń ishinde O noqatınan A noqatına kelip jetetuǵın bolsa, onda

$$v' = \frac{OA}{t}$$

shaması fazanıń tarqalıw tezligin yamasa ádette "normal" tezlik dep atalatuǵın tezlikte beredi. O noqatınan (163-súwret) "normal" tezliklerge proporcional bolǵan normallardıń kesindilerin φ hám ψ múyeshlerinde qoyıp normallardıń ushlarınıń geometriyalıq orınları bolǵan betti alamız; bunday betti *normallar beti* dep ataydı. Ádettegidey nur ushın frontqa túsirilgen normal nurǵa sáykes keledi hám tolqınlıq bet te, normallar beti de sferanı payda etip, bir birine sáykes keledi. Ádettegidey emes nur ushın normallar beti tolqınlıq betke sáykes kelmeydi. Biraq olar bir birinen úlken shamaǵa ayrılmaydı, sebebi kristallar ushın nurlar menen normallardıń arasındaǵı múyeshler úlken emes. Nátiyjede bir kósherli kristallar ushın ádettegidey hám ádettegidey emes nurlar ushın normallar beti tolqınlıq betke keledi (163-súwret). Olar da eki noqatta bir biri menen tiyisedi hám olar arqalı $O'O''$ optikalıq kósheri ótedi. Berilgen OA normalına ádettegidey AA' hám ádettegidey emes BB' nurlardıń parallel tegis tolqınları sáykes keledi. Ádettegidey tegis AA' frontı, buringıday, sferalıq betke urınba baǵıtlanǵan, al ádettegidey emes BB' tegis front bolsa normallardıń ellipsoid tárizli betin kesedi.



162-súwret. Normallar betin qurıwǵa.

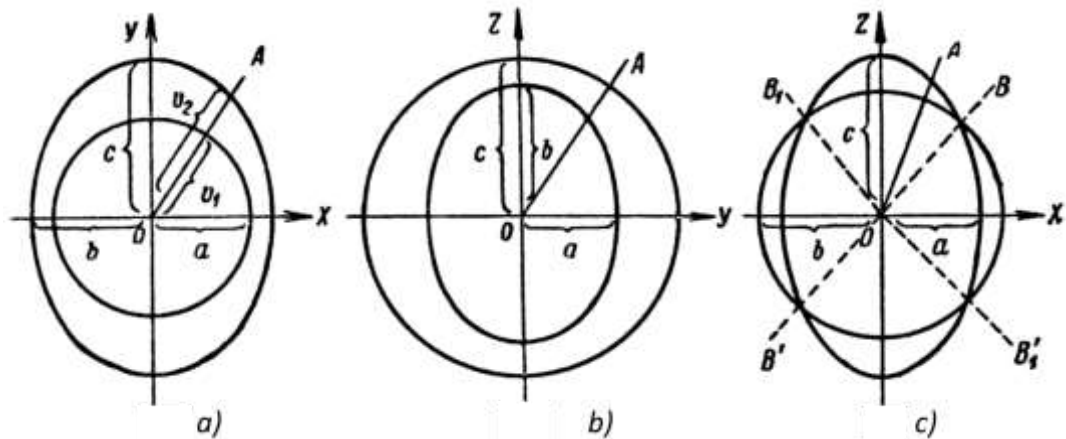


163-súwret. Bir kósherli kristaldıń normallar betleri.

Kristaldıń shegarasındaǵı tegis fronttıń sınıw ushın Gyuygens qurıwın ámelge asırıp (287-paragrafqa qarańız), optikalıq kósherdiń qálegen jaylasıwı ushın eki frontqa túsirilgen normallardıń túsiw tegisliginde qalatuǵınlıǵın ańsat ańǵarıwǵa boladı. Joqarıda aytılıp ótilgendey, ádettegidey emes nur bolsa sınıwda túsiw tegisliginen shıǵa aladı.

§ 289. Eki kósherli kristallar. Eki kósherli kristallar dep atalatuǵın kristallarda nur sınǵanda ulıwma aytqanda bir kósherli kristallardaǵıday ekige ajıraladı. Biraq, eki kósherli kristallarda nurlardıń ekewi de ádettegidey sınıw nızamına baǵınbaydı: olar ushın túsiw múyeshiniń sinusınıń sınıw múyeshiniń sinusına qatnası turaqlı bolıp qalmaydı. Nurlardıń ekewi de tegis polarizaciyalanǵan hám eger olardıń hár qaysısın gezekpe-gezek óz aldına kristaldaǵı bir baǵıt boyınsha tarqalıwǵa májbúrlese (285-paragraftaǵı snoskaǵa qarańız), onda olardıń polarizaciyası

bir birine perpendikulyar boladı. Bul eki nurgá quramalı túrge iye tolqınlıq bet sáykes keledi, onıń bir birine perpendikulyar bolǵan OXZ , OXY hám OYZ tegisliklerindeki kesimleri 164-súwrette kórsetilgen. Bul kesimlerdiń hár biri ellips hám dóńgelek bolıp tabıladı. 165-súwrette eki kósherli kristaldıń tolqınlıq betiniń keńisliklik modeli kórsetilgen. Tolqınlıq bet degende biz burındıday nurlardıń ushlarınıń geometriyalıq ornı bolǵan betti túsinemiz. Solay etip, qálegen OA radiusvektorınıń bettiń bólimleri menen kesilisiw noqatları (164-súwret) berilgen baǵıttaǵı eki nurdıń tarqalıw tezlikleri v_1 menen v_2 ni anıqlaydı. 164-súwrette kórinip turǵanıday, v_1 hám v_2 tezlikleri bir birine teń bolatuǵın BB' hám BB'_1 baǵıtları boladı. Bul baǵıtlardı *birinshi áwlad optikalıq kósherler* yamasa *biradiallar* dep ataydı. Eki kósherdiń bolıwı kristallardıń eki kósherli atamasın da anıqlaydı. Hár qıylı kristallar ushın kósherlerdiń arasındǵı múyeshlerdiń mánisleri hár qıylı hám kóp graduslarǵa jetedi. Eger oyımızda kósherlerdiń arasındǵı múyeshi kishireytsek, onda 164-súwrettegi dóńgelek penen sheńberdiń kesilisiw noqatları bir birine jaqınlasadı hám shekte bir birine sáykes keledi. Bunday jaǵdayda tolqınlıq bet eki noqatta bir birine tiyisetuǵın sferalıq hám ellipsoid tárizli eki betke ayırıladı. Bul jaǵday bir kósherli kristalǵa sáykes keledi. Solay etip, bir kósherli kristaldı eki kósherli kristaldıń dara jaǵdayı dep qarawǵa boladı.

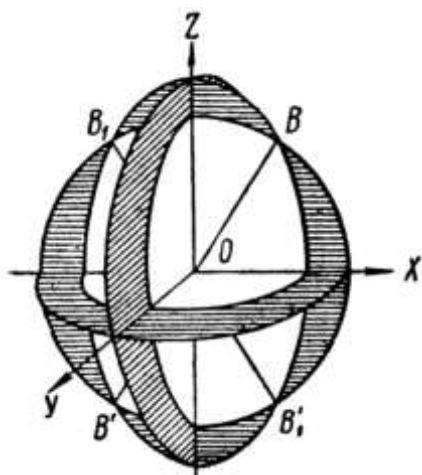


164-súwret. Eki kósherli kristaldıń tolqınlıq betleriniń a) OXY , b) OYZ hám c) OXZ tegislikleri menen kesimleri.

VI keste

Eki kósherli kristallar ushın $\lambda = 0,5893$ mkm tolqın uzınlıǵı ushın bas sındırıw koefficientleri n_a , n_b , n_c hám optikalıq kósherlerdiń arasındǵı 2α múyeshleriniń mánisleri

Kristall	n_a	n_b	n_c	2α
Slyuda	1,560	1,594	1,598	42°
Arragonit	1,531	1,682	1,686	18°
Kúkirt (kristall)	1,950	2,043	2,240	69°
Topaz	1,619	1,620	1,627	49°



165-súwret.

Eki kósherli kristallardıń tolqınlıq betleri.

Eki kósherli kristallardaǵı jaqtılıqtıń tarqalıw teoriyası kristaldıń hár bir bólekshesi anizotrop vibrator bolıp tabıladı hám ol mınaday qásiyetlerge iye boladı degen boljawdan kelip shıǵadı: bir birine perpendukulyar úsh baǵıt bolıp, usı baǵıtlardıń hár biri boyınsha awısqaında usı awısıwǵa qarama-qarsı baǵıtlanǵan kvaziserpimli kúsh payda boladı. Eger usı baǵıtlar menen tuwrı múyeshli koordinatar sistemasınıń OX, OY hám OZ kósherlerin sáykeslendirsek, onda mınaday teńlikler orınlanadı dep esaplawǵa boladı:

$$f_x = -k_x \cdot x, f_y = -k_y \cdot y, f_z = -k_z \cdot z.$$

Eger awısıwdıń baǵıtı s koordinatar kósherleri menen α, β hám γ múyeshlerin jasıytuǵın bolsa, onda payda bolatuǵın f kúshi onıń kósherlerdiń baǵıtındaǵı mınaday qurawshılarınıń járdeminde anıqlanadı:

$$f_x = -k_x s \cdot \cos \alpha, f_y = -k_y s \cdot \cos \beta, f_z = -k_z s \cdot \cos \gamma.$$

Bul jaǵdayda f kúshi awısıwǵa qarama-qarsı baǵıtlanǵan bolmaydı, Biraq onıń menen bazı bir súyir múyeshti quraydı. Úsh OX, OY hám OZ baǵıtlarına kristaldıń dielektriklik turaqlılarınıń úsh bas mánisleri $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ hám ε_z ler hám jaqtılıqtıń tezliginiń mınaday úsh mánisleri sáykes keledi:

$$v_a = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_x}}, v_b = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_y}}, v_c = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_z}}.$$

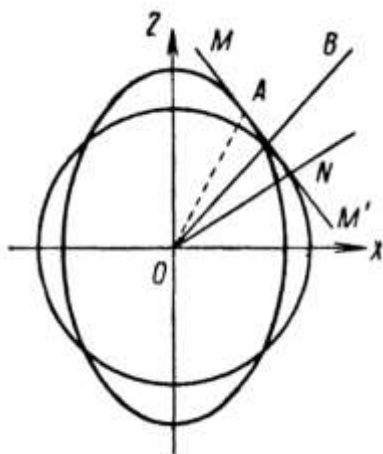
Tezliktiń bul v_a, v_b, v_c mánisleri tolqınlıq bettiń kesimlerindegi dóńgeleklerdiń radiusın hám ellipslerdiń yarım kósherleri a, b, c lardı anıqlaydı (164-súwret).

$$\frac{c}{v_a} = \sqrt{\varepsilon_x}, \frac{c}{v_b} = \sqrt{\varepsilon_y}, \frac{c}{v_c} = \sqrt{\varepsilon_z}$$

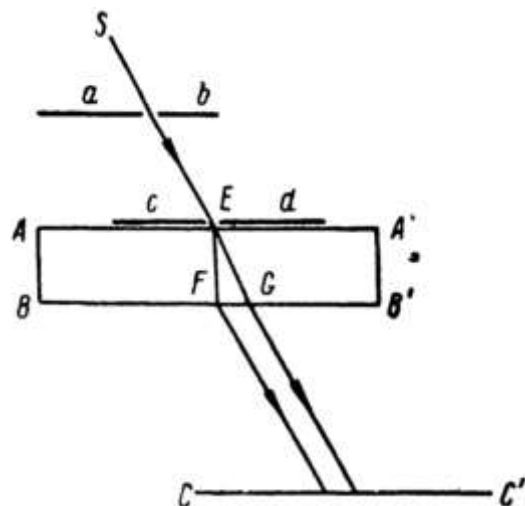
qatnasları eki kósherli kristallardıń bas sındırıw koefficientleri dep ataladı. VI kesteде bazı bir eki kósherli kristallardıń bas sındırıw koefficientleri menen optikalıq kósherleriniń arasındaǵı múyeshlerdiń shamaları keltirilgen.

Bir kósherli kristallardaǵı sıyaqlı, eki kósherli kristallar ushın da tolqınlıq betler menen bir qatarda normallar betlerin de qurıwǵa boladı. Sırtqı túri boyınsha olar tolqınlıq betlerge usaydı. Normallar betlerin kurganda kristalda payda bolatuǵın eki tegis frontqa túsirilgen normallardıń bir birine sáykes keletuǵın eki baǵıttıń bolatuǵınlıǵı kórinedi. Birinshi áwlad optikalıq kósherlerdiń baǵıtlarınan ózgeshe baǵıtlarǵa iye bul baǵıtlardı ekinshi áwlad optikalıq kósherleri yamasa binormallar dep ataydı.

Birinshi áwlad optikalıq kósherleri ótetuǵın eki kósherli kristallardaǵı orınlarda tolqınlıq bet tórt sharshar tárizli oyıqqa iye boladı. Bul oyıqlardıń bolıwı *ishki hám sırtqı konuslıq refrakciyalar* dep atalatuǵın ózine tán optikalıq qubılıslardıń kóriniwine alıp keledi.

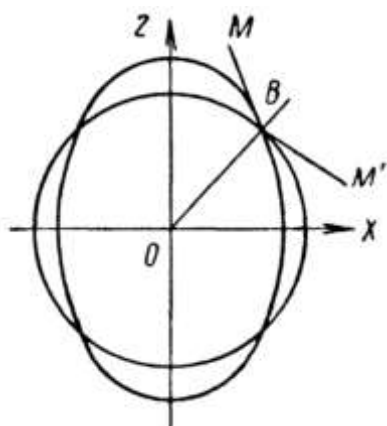


166-súwret. Ishki konuslıq refrakciyanıń payda bolıwı.

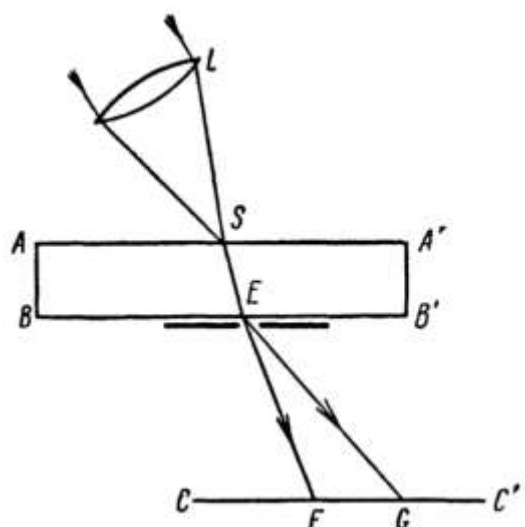


167-súwret. Ishki konusliq refrakciyanı baqlawdıń usılı.

Tolqınlıq betti XOZ tegisligi menen kesiwdiń saldarınan alınǵan dóńgelek penen ellips ulıwmalıq MM' urınbaǵa iye boladı (166-súwret). Dóńgelek penen ellipstıń kesilisiw noqatına ótkerilgen OB birinshi áwlad optikalıq kósheri bolıp tabıladı. MM' urınbasına túsirilgen ON normalı binormal bolıp tabıladı (ekinshi áwlad optikalıq kósheri). Eger MM' arqalı ON binormalına perpendikulyar bolǵan tegislik júrgizilse, onda ol tolqınlıq betti dóńgelek boyınsha kesetuǵın bolıp shıǵadı. Sonlıqtan MM' tolqınıń tegis frontına tóbesi O noqatında jaylasqan konustıń jasawshısınıń baǵıtında jaylasqan hám diametri NA ǵa teń bolǵan dóńgelek ultanǵa iye sheksiz kóp sanlı nurlar sáykes keledi. Bul nurlardıń biri ON binormalına sáykes keledi. Jaqtılıq kristaldan shıqqanda barlıq nurlar tegis tolqın frontına perpendikulyar boladı, usınıń nátiyjesinde ekranda (yamasa vizual túrde baqlaǵanda kózdıń setchatkasında) dóńgelek jaqtılı saqıynanı beretuǵın nurlardıń ishi bos cilindri payda boladı. Bul qubılıstı ishki konuslıq refrakciya dep ataydı. Ishki konuslıq refrakciyanı tegis AA' penen BB' qaptal betleri ON binormalına perpendikulyar bolǵan arragonit plastinkasında baqlawǵa boladı. Kishi tesiklerge iye bolǵan ab hám cd ekranlarınıń járdeminde (167-súwret) jaqtılıqtıń SE jıńışke nurı bólip alınadı. SE nurı belgili baǵıtqa iye bolǵanda, kristall plastinkanıń ishinde nurlardıń ishi quwıs bolǵan EFG konusı alınadı. Jaqtılıq kristaldan shıqqanda bul konus nurlardıń ishi kuwıs cilindirine aylanadı hám ol CC' ekranında diametri usı CC' ekranınan kristalǵa shekemgi qashılıqtan ǵárezsiz bolǵan nurlardıń ishi quwıs cilindirine aylanadı.



168-súwret. Sırtqı konuslıq refrakciyanıń payda bolıwı.



169-súwret. Sırtqı konuslıq refrakciyanı
baqlawdıń usılı.

Sırtqı konuslıq refrakciya eki kósherli kristalda birinshi áwlad optikalıq kósheriniń baǵıtında tarqalatuǵın bir OB nurına sheksiz kóp sanlı BM, BM' h.t.b. tegis tolqın frontlarınıń sáykes keletuǵınlıǵınıń nátiyjesi bolıp tabıladı (168-súwret). Bul tegis frontlar kristaldan shıqqanda hár qıylı baǵıtlarda tarqaladı, al olarǵa perpendikulyar bolǵan nurlar konustıń jasawshılarınıń boyında jaylasadı. Sırtqı konuslıq refrakciyanı baqlaw ushın kristalda birinshi áwlad optikalıq kósheriniń baǵıtında tarqalatuǵın SE nuri payda bolatuǵınday etip L linzasınıń járdeminde kristaldıń plastinkasına nurlardıń jıynalatuǵın konusı túsiriledi (169-súwret). Usı nur E sańlaǵı arqalı kristaldan shıqqanda móldir bolmaǵan ekranda nurlardıń ishi quwıs EFG konusı payda boladı. Nurlardıń bul konusı CC' ekranında jaqtılı saqıynanı payda etedi. Bul saqıynanıń diametri CC' ekranı menen kristaldıń arasındaqı qashılıqtıń úlkeyiwi menen úlkeyedi.

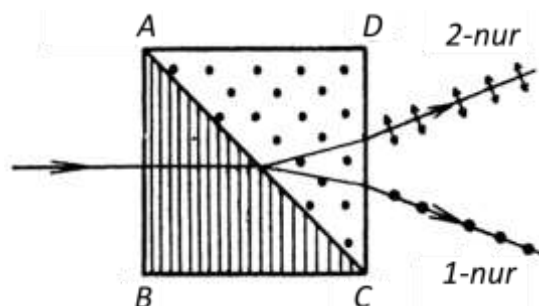
Konus tárizli refrakciyalardıń bolıwı jaqtılıqtıń kristallarda tarqalıw teoriyasınıń oǵada zor tastıyıqlanıwı bolıp tabıladı.

§ 290. Polyarizaciyalıq ásbaplar. Tábiyiy jaqtılıqtan tegis polyarizaciyalanǵan jaqtılıqtı alıw ushın Bryuster múyeshi menen shaǵılısqandaǵı polyarizaciyanı yamasa qanday da bir kristaldaǵı qos nur sındırıwdı paydalanıwǵa boladı. Biraq tikkeley paydalanǵanda bul eki usıl da qolaylı emes. Bryuster múyeshi menen túsiwshi nurdıń tek úlken bolmaǵan bólimi ǵana shaǵılısadı. Usınıń nátiyjesinde alınǵan tegis polyarizaciyalanǵan nurdıń intensivligi kishi boladı. Kristaldıń qalırlıǵı júdá úlken bolmaǵan jaǵdayda qos nur sındırıwdaqı eki nurdıń arasındaqı múyesh úlken bolmaydı.

Nurlardıń tarqalıw baǵıtlarınıń arasındaqı múyeshtiń shamasın úlkeytiw ushın kristallardan turatuǵın quramalırarq bolǵan sistemalardı paydalanadı. Olardıń ishindegi eń kóp tarqalǵanların biz qarap ótemiz.

1 Vollaston prizması. Vollaston prizması (170-súwret) islandiya shpatınan soǵılǵan eki tuwrı múyeshli prizmadan turadı. Prizmalar gipotenuzaları boyınsha bir biri menen jelimlengen. ABC prizmasında optikalıq kósher AB katetine parallel; ACD prizmasında optikalıq kósher sızilma tegisligine perpendikulyar bolǵan C qabırǵasına parallel. Tábiyiy nur normal baǵıtta AB qaptal betine kelip túsedı; ABC prizmasında payda bolǵan ádettegidey hám ádettegidey emes nurlardıń ekewi de optikalıq kósherge perpendikulyar bolǵan bir baǵıtta tarqaladı hám olar sáykes v_0 hám v_e tezliklerine iye boladı. Ekinshi ACD prizmasında da olar optikalıq kósherge perpendikulyar baǵıtta tarqaladı, Biraq, eki prizmadaǵı optikalıq kósherler bir birine perpendikulyar bolǵanlıqtan, onda birinshi prizmadaǵı ádettegidey nur ekinshi prizmadaǵı ádettegidey emes nurǵa (hám kerisinshe ádettegidey emes nur ádettegidey nurǵa) aylanadı. Nátiyjede, birinshi prizmada ádettegidey bolǵan nur eki prizmanıń arasındaqı shegarada n_e/n_0 salıstırmalı sındırıw koefficienti menen sınadı, al birinshi prizmadaǵı ádettegidey emes nur n_0/n_e salıstırmalı sındırıw koefficienti menen sınadı. Islandiya shpatı ushın $n_0 > n_e$, usıǵan sáykes $\frac{n_e}{n_0} < 1$, al $\frac{n_0}{n_e} < 1$ hám usıǵan sáykes birinshi nur ACD prizmasınıń C qabırǵasına qaray, al ekinshi nur onıń ultanı AD tárepke karay sınadı. Usınıń saldarınan nurlardıń arasındaqı múyeshtiń ádewir úlken shaması alınadı. Eki nur da tegis polyarizaciyalanǵan: birinshi nurda (ekinshi prizmadaǵı ádettegidey emes nur) elektr vektorı ekinshi prizmanıń optikalıq kósherine parallel baǵıtta terbeledi, ekinshi nurda (ekinshi prizmadaǵı ádettegidey nur) elektr vektorı ekinshi prizmanıń optikalıq kósherine perpendikulyar baǵıtta terbeledi.

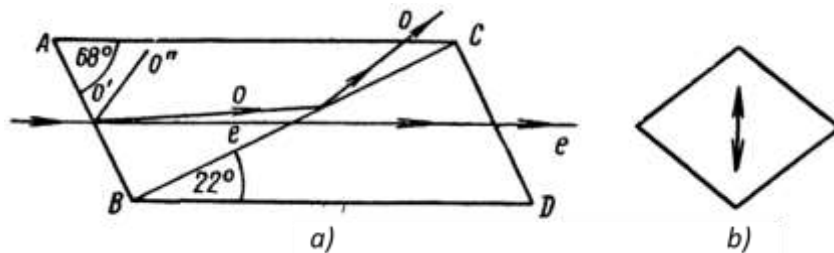
170-súwret.
Vollaston prizması.



2. Nikol prizması. Nikol prizması (qısqasha nikol, 171-a súwret) islandiya shpatınan soǵılǵan eki tuwrı múyeshli prizmadan turadı. Prizmalardıń súyir múyeshleri 68° hám 22° shamalarına teń; prizmalar kanada balzámı menen BC kateti boyınsha jelimlengen. $O'O''$ optikalıq kósheri sızzılma tegisliginde BA qaptalına 48° múyesh jasadı (ekinshi prizmada da tap sol sıyaqlı). Birinshi prizmada túsiwshi nur ekige ajıraladı, olardan ádettegidey nur O kanada balzámınıń BC qatlamına shama menen 76° múyesh penen túsedı. Kanada balzámınıń sındırıw koefficienti $n = 1,550$ ádettegi nur ushın sındırıw koefficienti bolǵan $n_0 = 1,658$ shamasınan kishi; $i = 76^\circ$ túsiw múyeshi sheklik múyeshtiń shamasınan úlken hám ádettegidey O nurı kristall-kanada balzámı shegarasında tolıq ishki shaǵılıswǵa ushıraydı. Sonlıqtan ol ekinshi prizmaǵa ótpeydi hám AC qaptalı arqalı sırtqa shıǵadı. Ádettegidey emes nur ushın sındırıw koefficienti kanada balzámınıń sındırıw koefficientinen kishi, sonlıqtan ol tolıq ishki shaǵılıswǵa ushıramaydı hám ekinshi prizma arqalı ótedi. Solay etip, eki prizma arqalı tek bir ádettegidey emes nur ótedi. Ádettegidey nurdıń prizmalardıń qarańǵılatılǵan qasnaǵında jutılıwı múmkin. Nikol prizması dástedegi tolıq polarizaciyalanǵan jaqtılıqtı 29° shamasına shekemgi múyeshlerde ózi arqalı ótkeredi.

Kesiminde prizma romb túrine iye boladı. Ótken jaqtılıqta elektr vektorı rombanıń qısqa diagonalınıń baǵıtına parallel baǵıtta terbeledi (171-b súwrette strelkanıń járdeminde kórsetilgen).

Nikol prizmasıń kemshiligi kanada balzámınıń ultrailet nurlar ushın móldir emesliginen ibarat. Sonlıqtan prizma tek tegis polarizaciyalanǵan kózge kórinetuǵın nurlardı alıw ushın ǵana jaramlı.

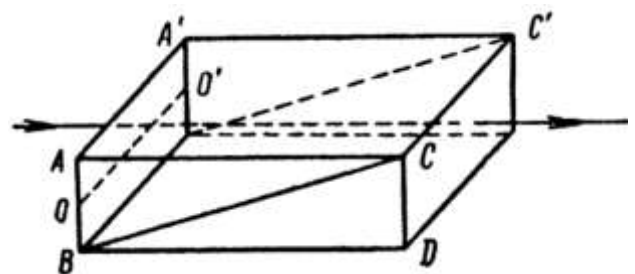


171-súwret. Nikol prizması.

Bul jaǵdayda da tolıq ishki shaǵılıswǵa tiykarlanǵan Nikol prizmasıń ózgeretilgen túri 172-súwrette keltirilgen. OO' optikalıq kósheri AA' qaptalına parallel. Prizmanıń eki yarımı da kanada balzámı yamasa glicerın menen jelimlenedi; glicerın menen jelimlengen jaǵdayda prizma ultraiolet ushın móldir. Prizmanıń aldınǵı hám artqı betleri AC hám $A'C'$ qabırǵalarına perpendikulyar, bul jaqtılıqtıń prizma arqalı baǵıtın ózgerterpey ótiwine múmkinshilik beredi.

172-súwret.

OO' optikalıq kósheri AA' qabırǵasına parallel bolǵan polarizaciyalıq prizma.



3. Dixorizmdi paydalanıwǵa tiykarlanǵan dúzilis. 285-paragrafta ayılıp ótilgenindey, turmalin kristalları kúshli dixroizmge iye: qalırlıǵı 1 mm bolǵan turmalin kristallı is júzinde tek ádettegidey emes nurdı ótkeredi hám, usıǵan sáykes, polarizatordıń xızmetin atqara

aladı. Ádettegidey emes nur ushın da selektivlik jutiwdır bolıwı turmalinniń kemshiligi bolıp tabıladı. Turmalin arqalı ótetuǵın tegis polarizaciyalanǵan nur jasıł-kók túske iye. Bul jaǵday turmalin kristallarınıń polarizaciyalıq dúzilis sıpatında qollanılıwına ádewir shek qoyadı.

Sońǵı waqıtları polaroid dep atalatuǵın polarizaciyalıq plenkalar keń qollanıla basladı. Olar celluloidtiń yamasa basqa da móldir materialdıń plenkası bolıp tabıladı. Olardıń betine kúshli dixroizm orın alǵan baǵıtlanǵan mikroskopiyalıq kristallar otırǵızılǵan. Usınday material sıpatında gerapatit dep atalatuǵın kúskirt qıshqıl iod-xinin paydalanıladı. Gerapatit jutiwda sezilerliktey selektivlikke iye boladı, usınıń saldarınan bir biri menen atanaq túrinde jaylastırılǵan eki polaroid ózi arqalı spektrdiń fiolet tárepiniń ótkeredi. Biraq, usınday jaǵdaylarǵa qaramastan, polaroid juqa japıraq tárizli bolıp, betiniń maydanınıń ádewir úlken bolıwı múmkin. Ayrıqsha joqarı bolmaǵan polarizaciyanıń dárejesi talap etimeytuǵın jaǵdaylarda jeril hám salıstırmalı arzan ekenligi onıń nelińten keń qollanılauıǵın túsindiredi.

Polarizaciyalıq ásbaplar tábiyiy jaqtılıqtı polarizaciyalıq jaqtılıqqa aylandırıw ushın da, polarizaciyanıń xarakterin tallaw ushın da qollanıladı. Eger, mısalı, baqlanatuǵın jaqtılıq nikoldıń bazı bir belgili bolǵan awhalında tolıq sónetuǵın bolsa, onda bul jaǵday onıń tolıǵı menen polarizaciyalanǵan ekenligin ańlatadı. Joqarıda kórsetilip ótilgenindey, Nikol prizması arqalı ótken jaqtılıqtaǵı elektr terbelisleriniń onıń kesiminiń qısqa diagonalına parallel. Sonlıqtan jaqtılıqtıń polarizaciya tegisligin prizmanıń qısqa diagonalı, *jaqtılıq tolıǵı menen sónetuǵın* onıń awhalı beredi.

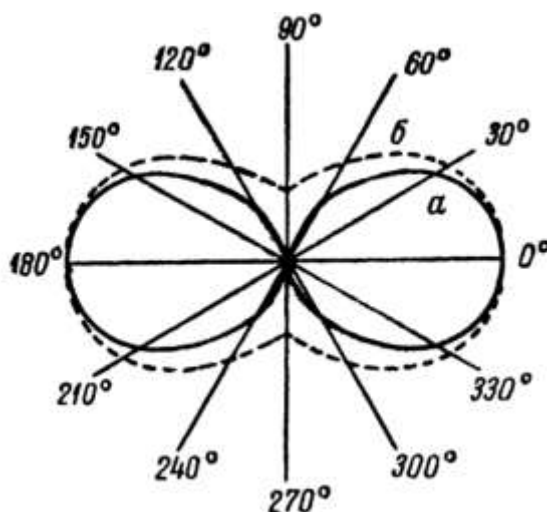
Eger nikoldıń qısqa diagonalınıń baǵıtı prizmaǵa kelip túsetuǵın jaqtılıqtıń E_0 elektr vektorı terbeletuǵın tegislik penen α múyeshin jasaytuǵın bolsa, onda nikol arqalı ótetuǵın elektr terbelisleriniń vektorınıń amplitudası $E = E_0 \cos \alpha$ shamasına teń.

Bunnan, eger biz Nikol prizmasına túsetuǵın polarizaciyalanǵan jaqtılıqtıń quwatınıń aǵsın ω_0 arqalı, al prizma arqalı ótken polarizaciyalanǵan jaqtılıqtıń quwatınıń aǵsın ω arqalı belgilesek, onda

$$\omega = \omega_0 \cos^2 \alpha \quad (1)$$

formulasına iye bolamız.

173-súwrette vektorlıq diagramma túrinde (tutas iymeklik) ω shamasınıń α múyeshinen ǵárezligi kórsetilgen. Eki awhalda ($\alpha = 0$ hám $\alpha = \pi$) jaqtılıq nikol arqalı tolıǵı menen ótedi hám eki awhalda ($\alpha = \pi/2$ hám $\alpha = 3\pi/2$) - tolıǵı menen sónedi. Haqıyqatında, qálegen nikolde jaqtılıqtıń joǵalıwı da, bir tekli bolmaǵan uchastkalardaǵı shashırawı da orın aladı (kóbikler, tırnalǵan orınlar h.t.b.), sonlıqtan $\alpha = 0$ hám $\alpha = \pi$ teńlikleri orınlanatuǵın jaǵdaylarda ótken jaqtılıqtıń quwatı ω túsken jaqtılıqtıń quwatı ω_0 den kishi boladı. Al $\alpha = \pi/2$ hám $\alpha = 3\pi/2$ teńlikleri orınlanatuǵın jaǵdaylarda prizma arqalı jaqtılıqtıń belgili dárejede ótedi.



173-súwret.

Jaqtılıqtıń quwatınıń nikoldıń burılıw múyeshinen ǵárezligi:

- a) tegis polarizaciyalanǵan jaqtılıqtıń;
- b) tolıq emes polarizaciyalanǵan jaqtılıqtıń.

Polyarizaciýalıq ásbaplar tolıǵı menen polyarizaciýalanbaǵan jaqtılıqtaǵı polyarizaciyanıń dárejesin anıqlawǵa da múmkinshilik beredi. Nikol prizmasına (yamasa basqa polyarizaciýalıq ásbapqa) tolıǵı menen polyarizaciýalanbaǵan jaqtılıq kelip túsetuǵın bolsa, onda prizmanıń qálegen awhalında jaqtılıqtı sóndiriwge bolmaydı. Bunday jaǵdayda jaqtılıq aǵısınıń quwatınıń α múyeshinen ǵárezligi 173-súwrettegi punktir iymeklik penen beriledi (biz tómende usınday ǵárezliktiń ellips tárizli polyarizaciýalanǵan jaqtılıqta da alınatuǵınlıǵın kóremiz). Tolıǵı menen polyarizaciýalanbaǵan jaqtılıqtı polyarizaciýalanǵan hám tábiyiy jaqtılıqlardıń aralaspası dep qarawǵa boladı.

Tolıq emes polyarizaciýalanǵan jaqtılıqtıń *polyarizaciya dárejesi* dep

$$Q = \frac{w_p}{w_p + w_n} \quad (2)$$

shamasına aytadı. Bul teńlikte w_p arqalı jaqtılıqtıń polyarizaciýalanǵan bóliminiń aǵısınıń quwatı hám w_n arqalı jaqtılıqtıń tábiyiy bóliminiń quwatı belgilengen. $w_p + w_n$ shaması tolıq emes polyarizaciýalanǵan jaqtılıqtıń tolıq quwatı w ge teń bolǵanlıqtan, (2)-ańlatpa mınaday túrge de enedi:

$$Q = \frac{w_p}{w}.$$

§ 291. Polyarizaciýalanǵan nurlardıń interferenciýası. Ellipslik hám dóńgelek polyarizaciya.

Qos nur sındırıwda *tábiyiy jaqtılıqtan* payda bolǵan ádettegidey hám ádettegidey emes nurlar kogerentli emes. Eger tábiyiy nurlardı hár qıylı bolǵan eki A hám B tegislikte polyarizaciýalanǵan nurlarǵa bólsek hám bunnan keyin polyarizaciýalıq ásbaptıń járdeminde olardaǵı terbelislerdi bir tegislikke alıp kelsek, onda olar interferenciýalanbaydı. Bul mınaday jaǵdaydıń orın alatuǵınlıǵı menen túsindiriledi: tábiyiy jaqtılıqta hár qıylı tegisliklerdegi jaqtılıq terbelisleri hár qıylı atomlar menen molekulalar tárepinen shıǵarılǵan. Demek, olar bir biri menen baylanıspaǵan hám turaqlı fazalar ayırmasına iye bolmaydı (kogerentli emes).

Bir polyarizaciýalıq nurdan payda bolatuǵın ádettegidey hám ádettegidey emes nurlar kogerentli. Eger usınday eki nurdaǵı terbelislerdi polyarizaciýalıq ásbaptıń járdeminde bir tegislikke alıp kelsek, onda nurlar ádettegidey bolıp interferenciýalanadı. Eger eki kogerentli tegis polyarizaciýalıq nurlardaǵı terbelisler bir birine perpendikulyar baǵıtlarda júzege keletuǵın bolsa, onda olar bir birine perpendikulyar terbelmeli qozǵalıstıń túrinde qosıladı hám ellips tárizli karakterdegi terbelislerdiń payda bolıwına alıp keledi (I tom, 101-paragraf).

Waqtıtıń ótiwi menen elektr vektorınıń ushı ellipsti sızatuǵınday bolıp ózgeretuǵın bolsa, onda bunday jaqtılıqtı *ellips tárizli polyarizaciýalanǵan* dep ataydı. Dara jaǵdayda ellipstiń dóńgelekke aylana aladı hám bunday jaǵdayda *dóńgelek boyınsha polyarizaciýalanǵan jaqtılıqqa* iye bolamız. Tolqındaǵı magnit vektorı barlıq waqıtta elektr vektorına perpendikulyar hám biz qarap atırǵan tiptegi tolqınlarda ol da waqtqa baylanıslı tap sonday bolıp ózgeredi. Demek, onıń ushın ellipsti yamasa dóńgelekti sızadı.

Elipps tárizli tolqınlardıń payda bolıwın tolıǵıraq qaraymız. 287-paragrafta biz nurlardıń dástesi optikalıq kósheri sındırıwshı betke parallel bolǵan bir kósherli kristaldan soǵılǵan plastinkaǵa kelip túskende ádettegidey hám ádettegidey emes nurlardıń bir baǵıtta, Biraq hár qıylı tezlikler menen tarqalatuǵınlıǵın kórdik. Meyli, usınday plastinkaǵa tegis polyarizaciýalanǵan nur kelip túsetuǵın hám onıń polyarizaciya tegisligi menen plastinkanıń bas kesimi tegisliginiń arasındaǵı múyesh nolden hám $\pi/2$ den ózgeshe bolsın. Bunday jaǵdayda plastinkada ádettegidey nur da, ádettegidey emes nur da payda boladı hám olar kogerentli nurlar bolıp tabıladı. Olar payda bolǵan momentte plastinkadaǵı olardıń arasındaǵı fazalar ayırması nolge teń, Biraq nurlardıń plastinkaǵa ótiwi menen fazalar ayırmasınıń shaması óse baslaydı. Bul fazalar ayırmasın esaplaymız.

Qalınlıǵı l bolǵan plastinka arqalı ótkende nurlardıń hár biri fazası boyınsha $2\pi l/\lambda$ shamasına keyin qaladı, bul qatnasta λ arqalı berilgen nurdaǵı tolqın uzınlıǵı belgilengen. Ádettegidey nur ushın tolqın uzınlıǵı $\lambda_0 = v_0/v$. Bul teńlikte v_0 - tolqınınıń kristaldaǵı tarqalıw tezligi, al v - terbelislerdiń jiyiligi. $v_0 = c/n_0$ teńligi orınlı bolǵanlıqtan (bul teńlikte n_0 arqalı ádettegidey nur

ushın sınıw koefficienti belgilengen), $\lambda_0 = c/n_0 v$ teńligine iye bolamız. Tap usınday jollar menen kristaldaǵı ádettegidey emes nur ushın $\lambda_e = c/n_e v$ teńligin alamız. Bul teńlikte n_e - ádettegidey emes nur ushın sınıw koefficienti. Bunnan, eki nurdıń arasındaǵı fazalar ayırması mınaǵan teń bolıp shıǵadı:

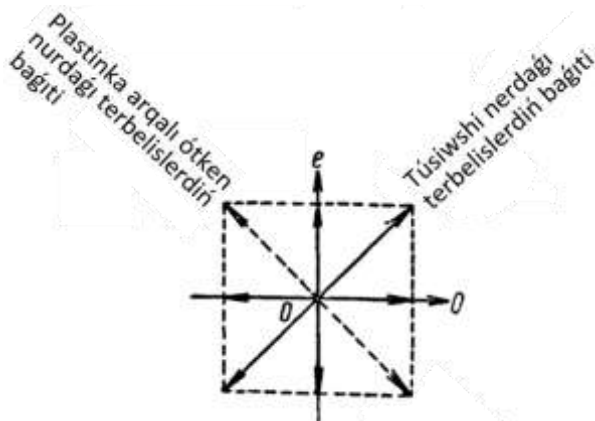
$$\Delta = \frac{2\pi l}{\lambda_0} - \frac{2\pi l}{\lambda_e} = \frac{2\pi l v}{c} (n_0 - n_e).$$

c/v shaması jaqtılıqtıń boslıqtaǵı tolqın uzınlıǵı λ bolǵanlıqtan

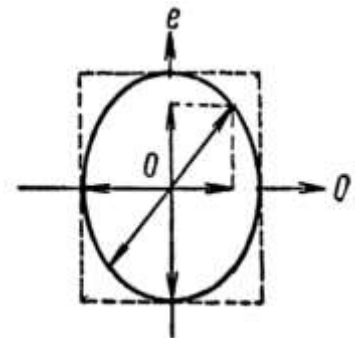
$$\Delta = \frac{2\pi l}{\lambda} (n_0 - n_e) \quad (1)$$

ańlatpasına iye bolamız.

Solay etip, $n_0 - n_e$ sındırıw koefficientleriniń arasındaǵı ayırma menen kristaldıń kalınlıǵı l qansha úlken bolsa, eki nurdıń arasındaǵı fazalar ayırmasınıń shaması da sonsha úlken boladı eken. Eger plastinkanıń qalınlıǵın $\Delta = k\pi$ shamasına (k arqalı pútin san belgilengen) teń etip saylap alsaq, onda eki nur da plastinkadan shıqqanda qaytadan tegis polarizaciyalanǵan jaqtılıqtı beredi. k jup bolǵan jaǵdayda onıń polarizaciya tegisligi plastinkaǵa túsken nurdıń polarizaciya tegisligine sáykes keledi; eger k nıń mánisi taq bolsa, onda plastinkadan shıqqan nurdıń polarizaciya tegisligi plastinkaǵa túsetuǵın nurdıń polarizaciya tegisligine salıstırǵanda $\pi/2$ múyeshine burılǵan boladı (174-súwret). Fazalar ayırması Δ nıń barlıq basqa mánislerinde plastinkadan shıqqan eki nurdıń terbelisleri bir biri menen qosılıp, ellips tárizli terbelisti beredi. Eger $\Delta = (2k + 1)\frac{\pi}{2}$ teńligi orınlanatuǵın bolsa, onda ellipstıń kósherleri ádettegidey hám ádettegidey emes nurlardaǵı terbelislerdiń baǵtı menen sáykes keledi (175-súwret).



174-súwret. Fazalar ayırması $k\pi$ ge teń bolǵan bir birine perpendikulyar terbelislerdi qosıw.



175-súwret. Ellips tárizli terbelislerdiń payda bolıwı.

Ádettegidey hám ádettegidey emes nurlardaǵı terbelislerdiń amplitudaları plastinkaǵa kelip túsetuǵın nurdıń polarizaciya tegisligi menen plastinkanıń bası kesiminiń arasındaǵı múyesh penen anıqlanadı (285-paragraf). Eger túsiwshi nurdıń polarizaciya tegisligi menen plastinkanıń bas kesiminiń arasındaǵı múyesh 45° bolsa, onda eki nurdıń amplitudaları teńlesedi. Bul jaǵdayda ellips dóńgelekke aylanadı hám, usıǵan sáykes, dóńgelek boyınsha polarizaciyalanǵan jaqtılıq payda boladı.

Tegis polarizaciyalanǵan nurdı dóńgelek boyınsha polarizaciyaǵa ($\Delta = \pi/2$) aylandıra alatuǵın plastinkanıń eń kishi bolǵan qalınlıǵı [(1)-formulaǵa qarańız]

$$\frac{\pi}{2} = \frac{2\pi l}{\lambda} (n_0 - n_e)$$

teńliginiń járdeminde anıqlanadı. Bunnan

$$l = \frac{\lambda}{4(n_0 - n_e)} \quad (2)$$

teńligine iye bolamız.

Bunday plastinka ádettegidey hám ádettegidey emes nurlardıń arasında $\lambda/4$ shamasına teń júrisler ayırmassın beredi. Sonlıqtan bunday plastinkanı *sherek tolqınlı plastinka* dep ataydı. Álbette, sherek tolqınlı plastinka eki nur arasındaǵı $\lambda/4$ shamasına teń júrisler ayırmassın tek λ tolqın uzınlıǵı ushın ǵana beredi. Basqa tolqın uzınlıqlarına iye bolǵan jaqtılıq ushın l diń λ den tuwrıdan-tuwrı ǵárezligi hám λ niń sındırıw kórsetkishleriniń $n_0 - n_e$ ayırmassınan ǵárezli bolǵanlıǵı sebepli ol $\lambda/4$ ten ózgeshe bolǵan júrisler ayırmassın beredi.

Álbette, sherek tolqınlı plastinka menen bir qatarda *"yarım tolqınlıq" plastinkanı* da, yaǵnıy ádettegidey hám ádettegiley emes nurlardıń arasındaǵı $\lambda/2$ shamasına teń (bul π ge teń fazalar ayırmassına sáykes keledi) júrisler ayırmassın beretuǵın plastinkanı da soǵıwǵa boladı. Joqarıda ayılǵanlar boyınsha bunday plastinka tegis polarizaciyalanǵan jaqtılıqtıń polarizaciya tegisligin $\pi/2$ múyeshine buradı.

Mısal sıpatında islandiya shpatınan soǵılǵan sherek tolqınlıq plastinkanı qaraymız. Sarı jaqtılıq ushın ($\lambda = 0,59$ mkm) islandiyalı shpat sındırıw koefficientleriniń $n_0 - n_e = 0,172$ shamasına teń ayırmassın beredi.

Bunnan (2)-formulanıń járdeminde sherek tolqınlıq plastinkanıń qalınlıǵı l ushın mınaday shamalı alamız:

$$l = \frac{5,9 \cdot 10^{-5}}{4 \cdot 0,172} \text{ sm} = 8,6 \cdot 10^{-5} \text{ sm}.$$

Tap sol islandiya shpatındaǵı kók jaqtılıq ushın ($\lambda = 0,46$ mkm) sındırıw koefficientleriniń ayırmassı $n_0 - n_e = 0,184$ shamasına teń hám, sonlıqtan, sherek tolqınlıq plastinkanıń qalınlıǵı $7,8 \cdot 10^{-5}$ sm shamasına teń bolıwı kerek.

Kórinip turǵanıday sherek tolqınlıq plastinkalardıń qalınlıǵı júdá kishi, sonlıqtan bunday plastinkalardı soǵıw úlken qıyınshılıqlardı payda etedi. Sonlıqtan, ádette plastinkanı $\Delta = \frac{\pi}{2} + 2k\pi$ fazalar ayırmassın payda etetuǵınday etip soǵadı (k arqalı pútin san belgilengen). Bunday plastinkanıń tási sherek tolqın uzınlıǵı plastinkasınıń tásirindey boladı. Sebebi $2k\pi$ shamasına teń fazalar ayırmassı hesh qanday áhmiyetke iye emes.

Ádette sherek tolqınlıq plastinkalardı islandiya shpatınan emes, al qayta isleniwi qolaylı bolǵan slyudadan yamasa gipsten soǵadı. Bul kristallardıń ekewi de eki kósherli kristallar bolıp tabıladı (289-paragraf), Biraq olardan eki nurgá $\lambda/4$ shamasına teń júrisler ayırmassın beretuǵınday plastinkalardı kesip alıwǵa boladı.

Joqarıda kórsetilip ótilgenindey, $\lambda/4$ plastinkasınıń járdeminde polarizaciyalanǵan nurdan ellips tárizli yamasa dóńgelek boyınsha polarizaciyalanǵan hám, kerisinshe, usınday plastinkalardıń járdeminde ellips tárizli yamasa dóńgelek boyınsha polarizaciyalanǵan nurdan tegis polarizaciyalanǵan jaqtılıqtı alıwǵa boladı.

Bul jaǵdaydı ellips tárizli polarizaciyalanǵan jaqtılıqtı tolıǵı menen polarizaciyanbaǵan jaqtılıqtan yamasa dóńgelek boyınsha polarizaciyalanǵan jaqtılıqtı tábiyiy jaqtılıqtan ayırıwǵa múmkinshilik beredi. Biraq, tek bir polarizaciyalıq ásbaptıń, mısalı nikoldiń, nurlardıń polarizaciyasınıń usınday tiplerin bir birinen ajratıw ushın jetkilikli emes. Haqıyqatında da, ellips tárizli polarizaciyalanǵan jaqtılıq bolǵan jaǵdayda da, tolıq polarizaciyanbaǵan jaqtılıq bolǵanda da nikoldi burǵanda jaqtılıqtıń jarıqlıǵınıń bazı bir maksimallıq hám minimallıq mánisleriniń arasındaǵı ózgerisi ǵana baqlanadı. Dóńgelek boyınsha yamasa tábiyiy jaqtılıq bolǵan jaǵdayda nikoldi qálegenshe turǵanda jaqtılıqtıń jarıqlıǵı ózgerisiz qaladı. Eger, aldın ala sáykes túrde baǵıt berilgen $\lambda/4$ plastinkanı kirgizgende ellips tárizli polarizaciyalanǵan jaqtılıq tuwrı sıızıqlı polarizaciyalanǵan jaqtılıqqa aylanadı hám onı nikoldiń járdeminde sóndiriwge boladı. Al tolıq emes polarizaciyalanǵan jaqtılıqtıń $\lambda/4$ plastinkası arqalı ótiwiniń barısında ózgeriske ushıramaydı. Tap sol sıyaqlı, dóńgelek boyınsha polarizaciyalanǵan jaqtılıqtı $\lambda/4$ plastinka arqalı ótkende nikol tárepinen tolıq sóndiriletuǵınlıǵı boyınsha ayırıwǵa boladı.

Ellips tárizli polarizaciyalanğan jaqtılıqtı nikol arqalı ótkergende jaqtılıqtıń intensivligi tolıq emes polarizaciyalanğan jaqtılıqta orın alatuǵın jaǵdaydaǵıday, nikoldıń burılıw múyeshinen ǵárezli boladı. Jaqtılıq aǵısınıń quwatı ω nıń nikoldıń burılıw múyeshi α dan ǵárezligi 173-súwrette punktir sızıq penen kórsetilgen. Jaqtılıq aǵısınıń maksimumı menen minimumı ω_{max} hám ω_{min} alınatuǵın baǵıtlar ellipstıń eki $2a$ hám $2b$ kósherleriniń baǵıtların beredi. Yarım kósherlerdiń qatnası a/b mınaǵan teń:

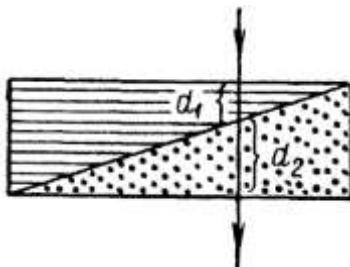
$$\frac{a}{b} = \sqrt{\frac{\omega_{max}}{\omega_{min}}}.$$

Bul teńlik jaqtılıq aǵısınıń quwatınıń maksimallıq hám minimallıq mánislerine sáykes keletuǵın terbelislerdiń amplitudalarınıń ellipstıń yarım kósherleri a menen b ǵa teń bolatuǵınlıǵınıń saldarı bolıp tabıladı.

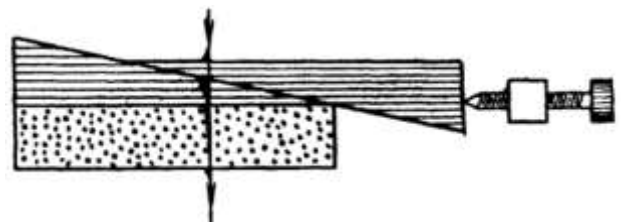
Ellips tárizli polarizaciyalanğan jaqtılıqtı $\lambda/4$ plastinkanıń járdeminde joqarıda keltirilgen usıldıń járdeminde tallawdı ellips tárizli polarizaciyalanıw fazalar ayırması $\pi/2$ ge teń bolǵan bir birine perpendikulyar bolǵan hár qıylı amplitudalardı qosıwdıń saldarınan payda bolatuǵın jaǵdayda ǵana ótkeriwge boladı. Eger ellips tárizli polarizaciya fazalar ayırması $\Delta \neq \pi/2$ shamasına teń bolǵan bir birine perpendikulyar bolǵan eki terbelisti qosıwdıń saldarınan payda bolatuǵın bolsa, onda bunday jaqtılıqtı tegis polarizaciyalanğan jaqtılıqqa aylandırıw ushın Δ menen qosqanda π shamasına (yamasa $2\pi k$) teń bolǵan fazalar ayırmasın beretuǵın Δ' qosımsha fazalar ayırmasın kirgiziw kerek boladı. Bunday jaǵdayda $\lambda/4$ plastinkanıń ornına *kompensatorlar* dep atalatuǵın fazalar ayırması Δ nıń qálegen mánisin beretuǵın ayırıqsha ásbaplar qollanıladı.

Babine kompensatorı dep atalatuǵın kompensatorlardıń eń áriwayı tipi eki kvarc sinadan turadı hám olardıń optikalıq kósherleri bir birine perpendikulyar bolıwı kerek (176-súwret). Bunday jaǵdayda joqarı sinada ádettegidey bolǵan nur tómengi sinada ádettegiley emes nurǵa (hám kerisinshe) aylanadı Usınıń saldarınan jaqtılıq sinalardıń birdey qalınlıqları arqalı ótkende hesh qanday fazalar ayırması payda bolmaydı. Jaqtılıq bir sinada ekinshi sinadaǵı d_2 qalınlıǵınan ózgeshe bolǵan d_1 qalınlıǵın ótkende nurlardıń arasında belgili bir fazalar ayırması payda boladı.

Solay etip, jaqtılıq sinalar arqalı ótetuǵın orınǵa baylanıslı qálegen fazalar ayırmasın alıwǵa boladı eken. Babine kompensatorınıń qolaysızlıǵı júdá jıńışke bolǵan nurlardan paydalanıwdıń zárúrliginen ibarat. Sebebi keń dáste ushın onıń hár qıylı bolǵan orınlarında hár qıylı fazalar ayırması payda boladı. Soley kompensatorı bunday kemshilikke iye emes. Ol optikalıq kósherleri bir birine parallel bolǵan eki kvarc sinadan hám kósheri sinalardıń kósherlerine perpendikulyar bolǵan kvarc tegis-parallel plastinkadan turadı (177-súwret). Joqarǵı sinanı ózi ózine parallel baǵıtta mikrometrlik vinttiń járdeminde jılastırıwǵa boladı. Bunday orın almasıwda sinalardıń bir birine tiyisip turǵan orınlarınıń barlıq uzınlıǵında turaqlı bolǵan olardıń qosındı qalınlıǵı ózgeredi hám tómengi plastinkanıń qalınlıǵına teń yamasa onnan ózgeshe bolıwı múmkin. Birinshi jaǵdayda kompensator eki nurdıń arasındaǵı fazalar ayırmasına hesh qanday fazalar ayırmasın qospaydı, al ekinshi jaǵdayda bolsa fazalar ayırmasın qosadı hám bul fazalar ayırmasınıń mánisi qálegen talap etilgen shamaǵa teń bolıwı múmkin.

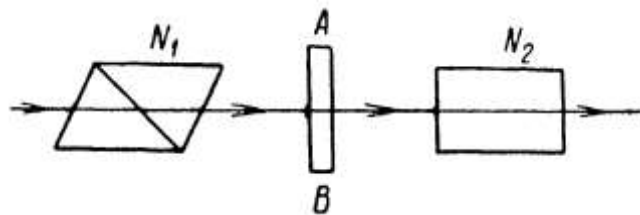


176-súwret. Babine kompensatorı.



177-súwret. Soley kompensatorı.

178-súwret.
 N_1 hám N_2 nikollarınıń arasındaǵı tegis-parallel kristall plastinka.



§ 292. Nikollerdiń arasındaǵı kristallıq plastinka. Usı waqıtlarǵa shekem biz terbelisleri bir birine perpendikulyar baǵıtlarda bolatuǵın nurlardıń interferenciyasın qaradıq. Endi terbelisleri bir tegislikke alıp kelinggen polarizaciyalanǵan nurlardıń interferenciyasın qaraymız. Bunday jaǵdayda N_1 hám N_2 nikollarınıń arasına tegis parallel AB plastinkasın jaylastırıw jolı menen júzege keltiriwge boladı (178-súwret). Meyli, plastinka bir tekli kristaldan onıń optikalıq kósherine parallel etip kesip alınǵan bolsın. Nikoller bir birine atanaq túrde jaylastırılǵan hám sistema arqalı nurlardıń parallel dástesi ótedi dep boljayıq. Nikollardıń ekewiniń de bas kesimleriniń awhalın N_1 hám N_2 arqalı belgileyik (179-súwret). Bunday jaǵdayda birinshi nikolden ótken nurdaǵı elektr vektorı N_1 diń baǵıtında terbeledi; bul terbelislerdiń amplitudaları A_1 vektorınıń járdeminde berilgen. Meyli, OO' sızıǵı AB plastinkasınıń bas kesiminiń awhalına sáykes keletuǵın bolsın (178-súwret). AB plastinkasına kelip túsetuǵın nur ekige, birdey baǵıtta, Biraq hár qıylı tezlikler menen tarqalatuǵın ádettegidey hám ádettegidey emes nurlarǵa bólinedi. Ádettegidey emes tolqındaǵı elektr vektorı OO' baǵıtında terbeledi, al ádettegidey tolqında bolsa elektr vektorı OO' baǵıtına perpendikulyar baǵıtta terbeledi. Olardıń birinshisiniń amplituda vektorın A_e arqalı, ekinshisiniń amplituda vektorın A_0 arqalı belgileyimiz. A_e hám A_0 vektorlarınıń ekewiniń de mánislerin A_1 vektorın OO' baǵıtına hám oǵan perpendikulyar bolǵan baǵıtqa proekciyalaw jolı menen alamız. Eger plastinkanıń bas kesimi birinshi nikoldiń bas kesimi menen α múyeshin jasaytuǵın bolsa, onda

$$A_e = A_1 \cos \alpha, A_0 = A_1 \sin \alpha. \quad (1)$$

teńliklerine iye bolamız.

Amplitudaları A_e hám A_0 bolǵan eki nurdıń terbelisleriniń arasında

$$\Delta = \frac{2\pi l}{\lambda} (n_e - n_0)$$

shamasına teń fazalar ayırması payda boladı. Ekinshi nikol ózi arqalı A_e hám A_0 terbelisleriniń N_2 baǵıtına túsirilgen proekciyalarınan ibarat terbelislerdi ǵana ótkeredi. 179-súwrette bul terbelislerdiń amplitudalarınıń vektorları A_{2e} hám A_{20} strelkalarınıń járdeminde kórsetilgen. 179-súwretten hám (1)-teńlikten mınaǵan iye bolamız:

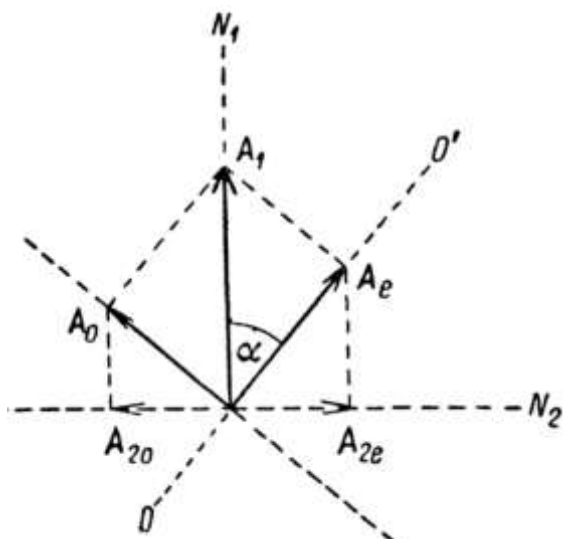
$$\begin{aligned} A_{2e} &= A_e \sin \alpha = A_1 \sin \alpha \cos \alpha, \\ A_{20} &= A_0 \cos \alpha = A_1 \sin \alpha \cos \alpha. \end{aligned}$$

Solay etip, A_{2e} hám A_{20} amplitudaları sanlıq mánisleri boyınsha bir birine teń. Bir qarap atırǵan eki terbelis te bir tegis polarizaciyalanǵan A_1 terbelisten payda boladı. Sonlıqtan olar kogerentli hám interferenciyalana aladı. 179-súwretten kórinip turǵanıday, A_{2e} hám A_{20} vektorları qarama-qarsı táreplerge baǵıtlanǵan hám, sonlıqtan, olarǵa sáykes keletuǵın terbelislerdiń arasında (2)-formulanıń járdeminde anıqlanatuǵın Δ ǵa teń fazalıq ayırması menen birge qosımsha π shamasına teń fazalar ayırması da payda boladı. Solay etip qosındı fazalar ayırması Δ_1 mınaǵan teń:

$$\Delta_1 = \frac{2\pi l}{\lambda} (n_e - n_0) + \pi.$$

$\Delta_1 = 2\pi k$ bolǵan jaǵdayda, bul teńlikte k arqalı pútin san belgilengen, eki terbelis bir birin maksimalıq dárejede kúsheytedi hám atanaq túrinde qoyılǵan nikoller arqalı qaraǵanda maydan jaqtılı bolıp kórinedi. $\Delta_1 = \pi(2k + 1)$ teńligi orınlangan jaǵdayda terbelisler bir birin tolıq óshiredi hám maydan qarańǵı bolıp qaladı. Sistemanı aq jaqtılıq penen jaqtılandırǵanda hár qıylı

uzınlıqlardağı tolqınlar ushın terbelislerdiń maksimallıq kúsheyiwı hám hálswirewı shártı bir waqıtta orınlanbaydı hám, sonlıqtan, atanaq etip qoyılğan nikollerdiń arasına jaylastırılğan tegis-parallel plastinkanıń berilgen qalıńlıǵında maydan teń ólshewli boyalğan bolıp kórinedi. Boyalıwdıń tonı plastinkanıń qalıńlıǵınan hám sınıw kórsetkishleriniń ayırması $n_e - n_0$ shamasınan ǵárezli.



179-súwret.

Bir birine atanaq túrinde jaylastırılğan nikoller hám kristallıq plastinka arqalı ótken terbelislerdiń amplitudasın anıqlawǵa.

Eger nikollerdiń bası kesimlerin bir birine parallel etip jaylastırısaq (180-súwret), onda

$$\begin{aligned} A_{2e} &= A_e \cos \alpha = A_1 \cos^2 \alpha, \\ A_{20} &= A_0 \cos \alpha = A_1 \sin^2 \alpha \end{aligned}$$

teńliklerine iye bolamız.

Endi A_{2e} hám A_{20} vektorlarınıń ekewi de bir tárepke qaray baǵıtlangan hám sáykes terbelislerdiń arasındaǵı fazalar ayırması mınaǵan teń:

$$\Delta_2 = \Delta = \frac{2\pi l}{\lambda} (n_e - n_0),$$

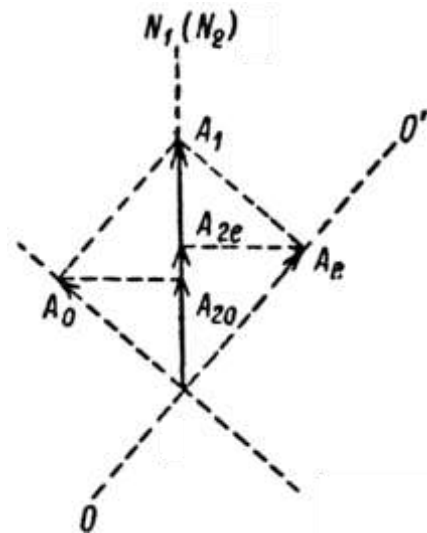
yaǵnıy Δ_1 fazalar ayırmasınan π shamasına ayrıladı.

$\pm\pi/4$ shamasınan basqa α múyeshiniń qálegen mánisinde A_{2e} hám A_{20} amplitudaları bir birine teń emes hám, usıǵan sáykes plastinkanıń qalıńlıǵınıń qálegen mánisinde terbelisler bir birin tolıǵı menen sóndire almaydı. Bir birine parallel etip qoyılğan plastinkanıń qálegen qalıńlıǵında ($n_e - n_0$ ayırmasınıń qálegen mánisinde) maydan azı-kópıli jaqtılandırılğan hám boyalğan boladı. Tek $\alpha = \pm\pi/4$ teńligi orınlangan jaǵdayda ǵana A_{2e} hám A_{20} amplitudaları bir birine teń. Bunday jaǵdayda nikollerdiń arasına jaylastırılğan plastinka jaqtılıqtı óshire aladı.

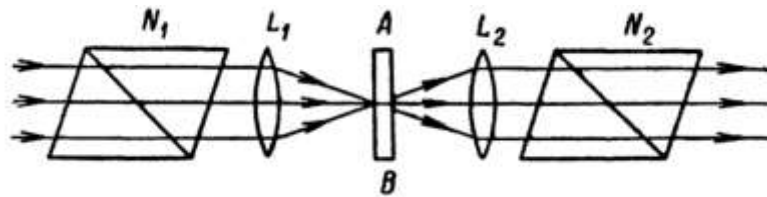
Δ_2 fazalar ayırması Δ fazalar ayırmasınan π ge ayrılatuǵın bolǵanlıqtan, bir birine atanaq túrinde qoyılğan nikoller arqalı ótkende kúsheyetuǵın nurlar parallel qoyılğan nikollerde hálswireydi hám kerisinshe. Usınıń saldarınan sistemanı aq jaqtılıq penen jaqtılandırǵanda parallel hám atanaq etip qoyılğan nikollerde hár qıylı reńlerge boyalğan jolaqlar alınadı; bunday boyawlardı *qosımsha boyawlar* dep ataydı. Eger nikollerdiń birin bursa, onda boyawdıń túri úzliksiz ózgeriske ushıraydı. Tap usınday jaǵday qozǵalmaytuǵın nikollerde plastinkanı burǵanda (α múyeshin ózgertkende) orın aladı.

180-súwret.

Kristallıq plastinka hám bir birine parallel
jaylastırılğan nikoller arqalı ótken
terbelislerdiń amplitudasın anıqlawǵa.



Joqarıda táriyiplengen qubılıslardı *xromat polyarizaciya* dep ataladı. Xromat polyarizaciya qos nur sindırıwdı tabıw ushın júdá sezgir usıl bolıp tabıladı. Sindırıw coefficientleriniń ayırması bolǵan $n_e - n_o$ shamasınıń kishi mánislerinde ádettegidey hám ádettegidey emes nurlardı tikkeley baqlaw jolı menen qos nur sindırıwshı tabıw dım qıyın. Ázzi anizotropiyaǵa iye zattan soǵılǵan plastinkanı bir birine atanaq etip qoyılǵan nikoller arqalı qaraǵanda maydan jaqtılanadı hám bul qos nur sindırıwdıń bar ekenliginiń dálili bolıp tabıladı.



181-súwret. Jıynalıwshı nurlardaǵı kristallıq plastinka.

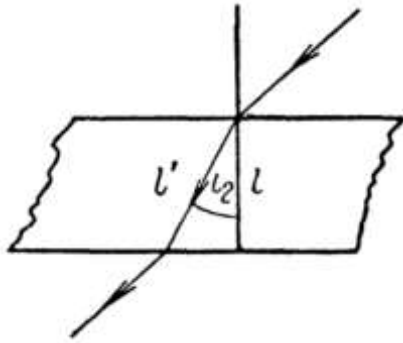
Xromat polyarizaciyanıń quramalıraq bolǵan túri jıynalatuǵın nurlarda baqlanadı. Bunday jaǵdayda N_1 hám N_2 nikollarınıń arasına jaylastırılǵan AB kristal plastinkasına (181-súwret) L_1 linzasınıń járdeminde nurlardıń jıynalatuǵın konusı túsiriledi. Plastinkanıń betine túsirilgen normal menen i_2 múyeshin jasaytuǵın nur (182-súwret) plastinkanıń

$$l' = \frac{l}{\cos i_2}$$

qalınlıǵın ótedi. Kristall arqalı berilgen baǵıtta tarqalatuǵın ádettegidey hám ádettegidey emes eki nurdıń arasında

$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{l}{\cos i_2} (n_o - n_1)$$

fazalar ayırmasına iye boladı. Bul teńlikte n_1 - berilgen baǵıttaǵı ádettegi nur ushın sınırıw kórsetkishi. Nurlardıń interferenciyasınıń saldarınan quramalı súwret payda boladı. Bunday súwret ushın dara jaǵday 183-a súwrette kórsetilgen. Eki kósherli kristaldan kesip alınǵan plastinkalarda alınatuǵın súwret onnan da quramalı boladı; payda bolatuǵın interferenciyalıq súwrettiń biri 183-b súwrette keltirilgen.



182-súwret.

Plastinkanıń betine túsirilgen normal menen i_2 múyeshin jasıytuǵın nurdıń jolınıń uzınlıǵı.

§ 293. Jasalma qos nur sındırıw. XIX ásirdeń basında izotrop móldir ortalıqlardaǵı mexanikalıq deformaciyanıń tásirinde qos nur sındırıwdıń orın alatuǵınlıǵı tabıldı. Deformaciyanıń tásirinde payda bolatuǵın optikalıq anizotropiyanı izertlenetuǵın A denesin atanaq túrinde jaylastırılǵan nikollerdiń arasına jaylastırıw arqalı ańsat baqlawǵa boladı (184-súwret).

Deneni OO' baǵıtında bir baǵıtta qıssaq yamasa sozsaq, onda OO' optikalıq kósheri bar bir tekli kristaldıń anizotropiyasına ekvivalent bolǵan optikalıq anizotropiya payda boladı. Ádettegidey hám ádettegidey emes nurlar OO' baǵıtına perpendikulyar baǵıtta tarqalmay, biraq hár qıylı bolǵan v_0 hám v_e tezlikleri menen tarqaladı. Eger nikoldıń bas kesimi OO' baǵıtına parallel de, perpendikulyar da bolmasa, onda deformaciyalanǵan dene arqalı ótken jaqtılıq ellips tárizli polarizaciyalanǵan boladı hám onı N_2 nikoliniń járdeminde óshiriwge bolmaydı.

Sındırıw koefficientleriniń ayırması $n_0 - n_e = \frac{v_0}{c} - \frac{v_e}{c}$ payda bolǵan anizotropiyanıń ólshemi bolıp xızmet ete aladı. Tájiriybeler $n_0 - n_e$ ayırmasınıń deformaciyalanǵan denegе túsirilgen p basımına proporcional ekenligin kórsetedi:

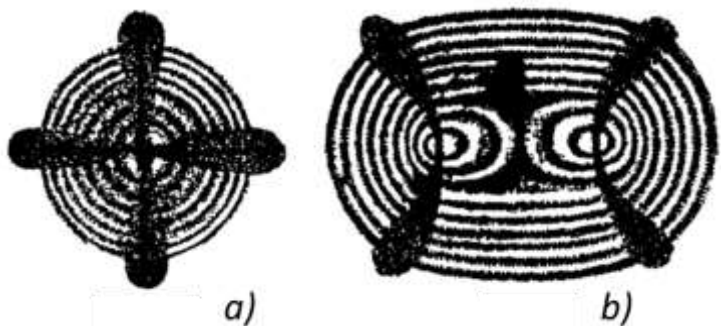
$$n_0 - n_e = kp.$$

Bul teńlikte k arqalı zattıń qásiyetleri boyınsha anıqlanatuǵın konstanta belgilengen. Ádettegidey hám ádettegidey emes nurlar denede l qalırlıǵın ótkende alatuǵın fazalar ayırması mınaǵan teń:

$$\Delta = \frac{2\pi l}{\lambda} (n_0 - n_e) = cpl.$$

Bul teńlikte $c = \frac{2\pi k}{\lambda}$ - jańa konstanta. Zattıń túrine baylanıslı c konstantasınıń shaması oń da, teris te bola aladı; sonıń menen birge onıń mánisi tolqın uzınlıǵı λ den de ǵárezli. Δ nıń λ den ǵárezligine baylanıslı, tábiyiy kristallar beretuǵın xromat polarizaciyanı baqlaǵanda maydan qanday boyalǵan bolsa, deformaciyanıń saldarınan jaqtılandırılǵan maydan da tap sonday bolıp boyalǵan boladı.

183-súwret. Jıynalıwshı dáste eki nikoldıń arasına jaylastırılǵan kristallıq plastinka arqalı ótkende payda bolatuǵın interferenciyalıq súwret: a) plastinka bir kósherli kristaldan soǵılǵan; b) plastinka eki kósherli kristaldan soǵılǵan.

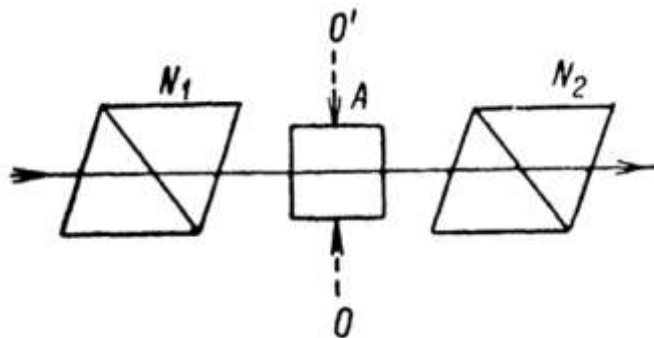


Egerde denede keriwler saqlanatuǵın bolsa, onda deformaciyalawshı kúshlerdiń tásiiri toqtaǵannan keyin de qos nur sındırıw saqlanadı. Misalı, shınıqtılırǵan shiysheniń bóleklerinde ayqın kórinetuǵın xromat polarizaciya orın aladı. Xromat polarizaciyanıń usınday túriniń kórinwi boyınsha móldir denelerdegi keriwlerdiń bar ekenligi izertlenedi. Jasalma qos nur

sındırıw móldir modellerdegi deformaciyalardı úyreniw ushın da ámelde qollanıladı. Optikalıq anizotropiyanıń shaması basımǵa proporcional bolǵanlıqtan, atanaq túrde qoyılǵan nikollardıń arasındaǵı modeldi baqlaǵanda payda bolatuǵın birdey reńge iye jolaqlardıń (izoxromlardıń) túri boyınsha keriwlerdiń shaması haqqında gáp etiwge boladı. Móldir deneden (ádette celluloidtan) modellerdi tayarlap anaw yamasa mınaw kúshlerdiń tásirinde hár qıylı formalarǵa iye bolǵan denelerde payda bolatuǵın deformaciyalar haqqındaǵı bir qatar teoriyalıq hám ámeliy máselelerdi sheshiwge boladı. Házirgi waqıtları deformaciyalardı izertlewdiń usınday usılı (*fotoserpimlik dep* atalatuǵın usıl) júdá keń tarqalǵan. 3-súwrette (qosımshanı qarańız) bir táreplik sozıwda kishi dóńgelek tesigi bar plastinkada payda bolatuǵın izoxromlardıń fotosúwreti keltirilgen.

184-súwret.

Mexanikalıq deformaciyada payda bolatuǵın qos nur sındırıwdı baqlaw.

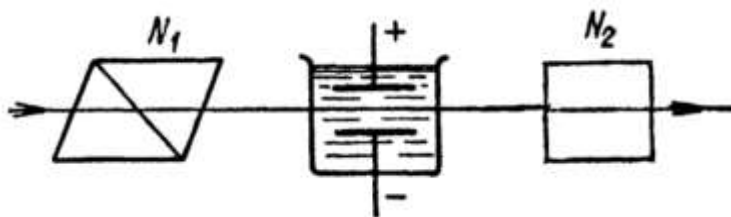


Suyıqlıqlarda da dinamikalıq sırtqı tásirlerdiń tásirinde optikalıq anizotropiya payda bola aladı. Tezliktiń gradienti orın alatuǵın suyıqlıqtaǵı qos nur sındırıw onıń mısalı xızmetin atqara aladı. Eger suyıqlıq eki diywaldıń arasında laminar aǵatuǵın bolsa (mısalı qozǵalmaytuǵın hám aylanatuǵın koaksiallıq cilindrlerdi ayırıp turǵan diywallardıń arasındaǵı), onda ol optikalıq jaqtan anizotrop boladı. Bul anizotropiya ádettegidey hám ádettegiley emes nurlardıń sındırıw koefficientleriniń arasındaǵı ayırma Δn nen hám suyıqlıqtıń optikalıq kósheri menen aǵıstıń baǵıtınıń arasındaǵı múyesh α dan gárezli. Bir tekli suyıqlıqtıń anizotropiyası keriwlerdiń saldarınan payda boladı hám bul ózgesheligi boyınsha ol deformaciyanıń nátiyjesinde qattı denelerde payda bolatuǵın anizotropiyaǵa usaydı. Suyıqlıqtı qanday da bir anizotropiyalıq bóleksheler bolǵan jaǵdayda, onda qos nur sındırıw bul bólekshelerdiń aǵıstaǵı orientaciyası boyınsha anıqlanadı. Eger bólekshelerdiń ózleri izotrop, al olardıń formaları shar tárizli bolmasa da qos nur sındırıw payda boladı. Bólekshelerdiń xızmetin erigen zattıń molekulları da atqara aladı (mısalı bazı bir organikalıq zatlardıń iri molekulları).

Aǵıstaǵı optikalıq anizotropiyanıń payda bolıwı V.N.Cvetkov hám onıń menen birge isleytuǵın xızmetkerler tárepinen polimerlerdiń, mısalı jasalma kauchuklar menen plastmassalardı alıwda paydalanılatuǵın polimerlerdiń qásiyetlerin úyreniw ushın qollanıldı.

Suyıqlıqtaǵı qos nur sındırıw usı suyıqlıqta ultraakustikalıq terbelislerdi qozdıırǵan jaǵdaylarda da júzege keledi. Bul qubılıs ses maydanında suyıqlıqtıń tezliginiń gradientiniń bolatuǵınlıǵı menen túsindiriledi. Solay etip, bul effekt, mánisi boyınsha bunnan aldınǵı effektke alıp klinedi.

§ 294. Elektr maydanındaǵı qos nur sındırıw. Jasalma anizotropiyanıń basqa mısalı elektr maydanınıń tásirinde payda bolatuǵın anizotropiya bolıp tabıladı. Bul qubılıs 1875-jılı Kerr tárepinen ashıldı hám *Kerr qubılısı* dep ataladı. Elektr maydanındaǵı qos nur sındırıw birinshi ret qattı dielektriklerdi zaryadlangan kondensatordıń astarlarınıń arasına jaylastırǵanda tabıldı. Biraq bul jaǵdayda mınaday gúmán payda boladı: bunday jaǵdaydaǵı elektr maydanınıń tutqan ornı janapay orın bolıp qalmaq ma, al baqlanǵan qos nur sındırıw elektr maydanınıń tásirinde payda bolǵan mexanikalıq deformaciya menen baylanıslı emes pe (elektrostrikciya qubılısı, II tomdaǵı 141-paragraf)? Kerr bul effektı statikalıq qısıw optikalıq anizotropiyaǵa alıp kelmeytuǵın suyıqlıqlarda tapqannan keyin elektr maydanınıń tikkeley tásiiri birotala tastıyıqlandı. Keyin (1930-jılı) elektr maydanınıń tásirindegi qos nur sındırıw gazlerde de tabıldı.



185-súwret. Elektr maydanındaǵı qos nur sındırıwdı baqlaw.

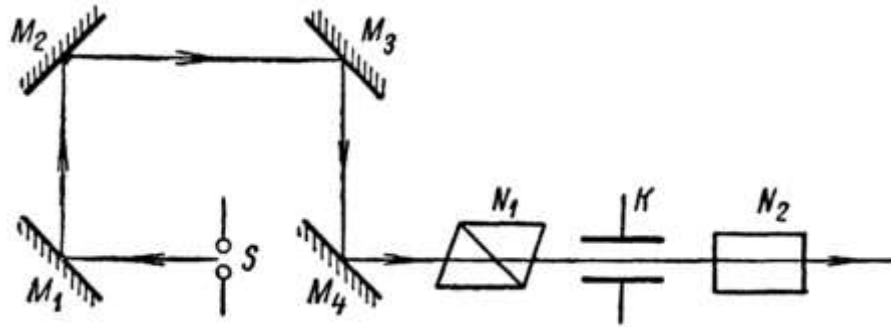
Suyıqlıqlardaǵı Kerr qubılısın bir birine perpendikulyar jaylastırılǵan N_1 hám N_2 nikollarınıń arasına ishine tegis kondensatorlardıń plastinkaları kirgizilgen kyuvetanı jaylastırıw jolı menen baqlawǵa boladı ("Kerr yacheykası"). Kondensatordı zaryadlaǵanda jaqtılıq nikoller arqalı óte baslaydı. Suyıqlıq kósheri elektr maydanınıń baǵıtı menen baǵıtlas bolǵan bir kósherli kristaldıń qásiyetlerine iye boladı. Tájiriybeler sınıw koefficientleriniń ayırması $n_0 - n_e$ niń maydanniń kernewligi E niń kvadratına proporcional ekenligin kórsetedi. Bunnan payda bolǵan ápiwayı hám ápiwayı emes nurlardıń arasındǵı fazalar ayırması Δ niń

$$\Delta = BlE^2$$

shamasına teń bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Bul teńlikte l - suyıqlıqtıń qalıńlıǵı, B - suyıqlıqtıń tek sortınan ǵárezli bolǵan turaqlı shama (Kerr turaqlısı). Suyıqlıqlardıń kópshiligi ushın $B > 0$. Suyıqlıqlardıń barlıǵınıń ishinde eń úlken Kerr turaqlısına nitrobenzol iye, onıń ushın $B = 2 \cdot 10^{-5}$ CGSE. Δ niń E den kvadratlıq ǵárezlikke iye bolıwınıń saldarınan ádettegidey hám ádettegidey emes nurlardıń arasındǵı fazalar ayırması elektr maydanınıń baǵıtınan ǵárezli emes.

Kerr qubılısı elektr maydanınıń suyıqlıqtıń anizotrop molekulalarına baǵıtlawshı tásiiri menen túsindiriledi. Maydanniń baǵıtlawshı tásiiri molekulalardıń turaqlı elektr momentiniń bar bolıwı (dipolliq molekulalar) yamasa sırtqı maydanda payda bolǵan momenttiń bolıwı menen baylanıslı bolıwı múmkin. Molekulalardıń sırtqı elektr maydanında baǵıtların ózgerтип úlgeriw waqıtı 10^{-9} sekundtan úlken emes; usınday waqıttıń ishinde baǵıtları tártiplesken molekulalar elektr maydanınıń tásiiri alıp ketilgennen keyin tártipti tolıq joǵalta aladı hám nátiyjede qos nur sındırıw joǵaladı.

Qos nur sındırıwdıń payda bolıwı hám joǵalıwı ushın jetkilikli bolǵan waqıt aralıǵınıń usınday kishi mánisi birinshi ret sxeması 186-súwrette keltirilgen tájiriybeniń járdeminde anıqlandı. S ushqınınan shıqqan jaqtılıq $M_1 M_2 M_3 M_4$ aynalarınń sistemasında shaǵılısıp, arasında Kerr yacheykası K jaylasqan N_1 hám N_2 nikolleri arqalı ótedi. Kerr yacheykasınıń plastinkalarına hám S ushqınlıq aralıǵına ózgermeli elektr qozǵawshı kúshine iye bolǵan bir derekten potenciallar ayırması túsiriledi. Potenciallar ayırmasınıń mánisi tesiw kernewine jetkende S elektrodlarınń arasında ushqın payda boladı hám Kerr yacheykasınıń kondensatorı razryadlanadı (zaryadsızlanadı). M_1 hám M_2 aynaların bir birinen qashıqlastırıp, jaqtılıqtıń Kerr yacheykasına shekemgi jolınıń uzınlıǵın úlkeytiwge boladı hám usınday jollar menen kondensator razryadlanatuǵın waqıt momenti menen hám jaqtılıq sol orınǵa jetip baratuǵın waqıt momentiniń júdá kishi, Biraq sezilerliktey bolǵan ayırmasın alıwǵa boladı. Eger usı waqıt aralıǵınıń ishinde molekulalar tártiplesken baǵıtların buzıp úlgeretuǵın bolsa, onda suyıqlıq qos nur sındırıwdı beriwın toqtatadı hám jaqtılıq nikol tárepinen sóndiriledi. Tájiriybelerden Kerr yacheykasındaǵı qos nur sındırıwdıń joǵalıp úlgeriwi ushın ushqınnan Kerr yacheykasına shekemgi jaqtılıqtıń jolınıń shama menen 3 m ge teń bolıwınıń kerek ekenligi kelip shıǵadı. Usınday uzınlıqtı jaqtılıq 10^{-8} sek waqıttıń ishinde ótedi.

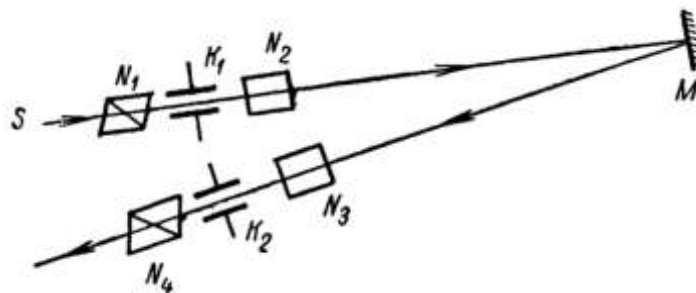


186-súwret. Qos nur sındırıwdıń joǵalıwı ushın ketken waqıttı anıqlaw ushın ótkerilgen tájiriybeniń sxeması.

Keyinirek ótkerilgen dálilgi joqarı bolǵan ólshewler elektr maydanı óshirilgennen keyin suyıqlıqtıń anizotropiyasınıń joǵalıwı ushın zárúrli bolǵan waqıttıń shama menen 10^{-9} sekundqa teń ekenligin kórsetti.

Jasalma qos nur sındırıw ayırım suyıqlıqlarda magnit maydanınıń tásirinde de júzege keledi. Magnit maydanınıń tásirinde payda bolatuǵın sındırıw koefficientleriniń ayırması $n_0 - n_e$ magnit maydanınıń kernewliginiń kvadratına tuwrı proporcional. Túsiriw múmkin bolǵan magnit maydanlarındaǵı $n_0 - n_e$ ayırmasınıń shaması júdá kishi.

Elektr maydanındaǵı qos nur sındırıw júzege keletuǵın hám joq bolatuǵın waqıt aralıǵınıń kishi mánisi Kerr yacheykasın inerciyasın ámeliy islerde hám laboratoriyalıq izertlewlerde paydalanılatuǵın zatvor sıpatında paydalanıwǵa múmkinshilik beredi. 254-paragrafta Kerr yacheykasınıń járdeminde alınǵan jaqtılıqtıń tezliginiń mánisi keltirildi. Usınday ólshewdi ámelge asırıwǵa múmkinshilik beretuǵın dúzilistiń sxeması (187-súwret) principinde Fizo tájiriybesiniń sxemasına sáykes keledi. K_1 hám K_2 arqalı belgilengen eki Kerr yacheykasına jiyiligi belgili bolǵan v shamasına teń ózgermeli potenciallar ayırması sinxronlı túrde túsiriledi. YAcheykalardıń ekewi de atanaq túrindegi nikollerdiń arasına jaylastırılǵan. YAcheykanıń astarlarına potenciallar ayırması túsirilgende jaqtılıq Kerr yacheykasınan hám eki nikolden turatuǵın sistema arqalı ótedi. K_1 yacheykasına iye birinshi sistema tárepinen ótkerilgen jaqtılıq M aynasına shekem jetip keledi, onıń betinde shaǵılısadı hám K_2 yacheykası bar ekinshi sistemaǵa kelip túsedi. Eger, jaqtılıq K_1 yacheykasınan M aynasına hám keri baǵıtta K_2 yacheykasına jetip keletuǵın τ waqıttıń ishinde potenciallar ayırması nolge shekem tómense, onda jaqtılıq nikol tárepinen óshiriledi. τ waqıtınıń shamasın belgili bolǵan ózgermeli potenciallar ayırmasınıń jiyiligi v arqalı anıqlap hám jaqtılıq ótken qashıqlıqtıń shamasın bilip, jaqtılıqtıń tezligi c nı anıqlawǵa boladı.



187-súwret. Kerr yacheykasınıń járdeminde jaqtılıqtıń tezligin anıqlaw.

Inerciyasız zatvor sıpatında Kerr yacheykası hár qıylı texnikalıq maqsetler, mısalı, televizorlarda, sestı qaytadan tikleytuǵın apparaturada, kino dúzilislerinde h.t.b. qollanıladı.

§ 295. Polyarizaciya tegisliginiń aylanıwı. Kristalda optikalıq kósherdiń baǵıtında jaqtılıq qos nur sındırıwdı bermey, bir tekli ortalıqta tarqalǵanday bolıp tarqaladı. Biraq kvarc kristallarında jaqtılıqtıń optikalıq kósherdiń baǵıtında tarqalıwınıń izotrop ortalıqtaǵı tarqalıwınan ayırmaǵa iye ekenligi anıqlanǵan. Tegis polyarizaciyalanǵan jaqtılıq kvarc arqalı tarqalǵanda polyarizaciya tegisligin buradı eken. Keyinirek bul qubılıs basqa da bir qatar kristallarda hám ayırım suyıqlıqlarda tabıldı hám *polyarizaciya tegisliginiń aylanıwı* atamasına iye boldı. Polyarizaciya tegisligin aylandıratuǵın zatlar *optikalıq aktiv zatlar* dep ataladı.

Eger kósherge perpendikulyar etip kesilgen kvarc plastinkasını atanaq etip qoyılǵan nikollerdiń arasına jaylastırsa, onda maydan jaqtılanadı. Ekinshi nikoldi bazı bir múyeshke buriw jolı menen jaqtılıqtı qaytadan sóndiriwge boladı. Bul jaqtılıqtıń tegis polyarizaciyalanǵan bolıp qalǵanlıǵın hám onıń polyarizaciya tegisliginiń bazı bir múyeshke burılǵanın kórsetedi. Jaqtılıqtıń deregi monoxromat bolǵan jaǵdayda ǵana nikoldi buriw arqalı jaqtılıqtı tolıq óshiriwge boladı. Eger aq jaqtılıqtı paydalansa, onda atanaq etip qoyılǵan kvarc plastinkasını jaylastırǵanda boyalǵan maydan alınadı; nikollerdiń birin burǵanda maydannıń reńleri ózgeriske ushıraydı. Bul aylandırıw qábiletliginiń tolqın uzınlıǵınan ǵárezli ekenligin kórsetedi (aylandırıw qábiletliginiń dispersiyası). Polyarizaciya tegisliginiń aylanıw múyeshiniń shaması plastinkanıń qalırlıǵına proporcional. Eger nurdıń tarqalıw baǵıtına qarama-qarsı baǵıtta qarasa, onda berilgen kristall ushın polyarizaciya tegisligi belgili baǵıtta burılǵan boladı: saat strelkasınıń baǵıtında (ońǵa qaray) yamasa saat strelkasına qarama-qarsı (shepke qaray). Plastinkanı 180° qa burǵanda aylanıw baǵıtı ózgerissiz saqlanadı. Sonlıqtan, eger nurdı polyarizaciya tegisligin optikalıq kósherdiń baǵıtında aylandıratuǵın qásiyetke iye kristallıq plastinka arqalı ótiwge májbúrlesek hám bunnan keyin onı normal baǵıtta aynada shaǵılistırıp, sol plastinka arqalı keri baǵıtta ótkersek, onda polyarizaciya tegisligi burılmaǵan bolıp shıǵadı.

Oń tárepke qaray buratuǵın zatlardı *ońǵa buratuǵın*, al shep tárepke qaray buratuǵın zatlardı *shepke buratuǵın* zatlar dep ataydı. Kvarc kristallarınıń eki túri ushırasadı ońǵa buratuǵın hám shepke buratuǵın. Ońǵa buratuǵın hám shepke buratuǵın kvarc kristalları óziniń sırtqı kristallıq forması boyınsha ayrıladı - birewleri ekinshileriniń aynalıq súwreti bolıp tabıladı; kristallografiyada usınday eki forma *enantiomorflıq formalar* dep ataladı.

Kvarctaǵa aylanıw ádewir úlken: qalınlıǵı 1 mm bolǵan kvarc plastinkası sarı jaqtılıqtıń ($\lambda = 0,5890$ mkm) polyarizaciya tegisligin 21,7° qa, al fiolet jaqtılıqtıń ($\lambda = 0,4047$ mkm) polyarizaciya tegisligin 48,9° qa buradı; spektrdiń ultrafiolet oblastında polyarizaciya tegisliginiń aylanıwı onnan da úlken: tap sol plastinka tolqın uzınlıǵı $\lambda = 0,2147$ mkm bolǵan nurdı 236° qa aylandıradı.

Frenel eger oń hám shep baǵıtlarǵa iye dóńgelek boyınsha polyarizaciyalanǵan nurlar kristalda hár qıylı tezlikler menen tarqalatuǵın bolsa, onda polyarizaciya tegisliginiń aylanıwın túsindiriwge bolatuǵınlıǵın kórsetti. I tomdaǵı 101-paragrafta kórsetilip ótilgenindey, tuwrı sıızıqlı garmonikalıq terbelmeli qozǵalıstı tap sonday jiyilik penen bolatuǵın, Biraq keri baǵıtlardaǵı eki dóńgelek qozǵalısqı jayıwǵa boladı.

Meyli, OO' baǵıtı (188-súwret) kristalǵa kelip túsetuǵın tegis polyarizaciyalanǵan tolqındaǵı terbelislerdiń baǵıtın kórsetetuǵın bolsın. Terbelisler amplitudasınıń vektorı $\mathbf{A}$ nı $\mathbf{A}'$ hám $\mathbf{A}''$ eki vektorına jayamız. Olardıń birinshisi ońǵa qaray, al ekinshisi shep tárepke qaray aylanatuǵın bolsın. Eger dóńgelek terbelislerdiń kristaldaǵı tarqalıw tezlikleri hár qıylı bolatuǵın bolsa, onda jaqtılıq kristall arqalı l aralıǵın ótkende $\mathbf{A}'$ terbelisi fazası boyınsha $\varphi' = 2\pi \frac{l}{\lambda'}$ shamasına, al $\mathbf{A}''$ terbelisi bolsa $\varphi'' = 2\pi \frac{l}{\lambda''}$ shamasına artta qaladı; bul teńliklerde λ' hám λ'' ler arqalı kristaldaǵı eki terbeliske sáykes keletuǵın tolqın uzınlıqları belgilengen.

Plastinkanıń qalınlıǵı φ' múyeshiniń shaması pútin san eselengen 2π ge teń bolatuǵında dep boljaymız. Bunday jaǵdayda $\mathbf{A}'$ vektorı óziniń burınǵı awhalın iyeleydi, al $\mathbf{A}''$ vektorı bolsa 188-súwrette punktir menen kórsetilgen bazı bir jańa awhalǵa iye boladı. Bul jańa awhal burınǵı awhalǵa salıstırǵanda

$$\Delta\varphi = \varphi' - \varphi'' = 2\pi l \left(\frac{1}{\lambda'} - \frac{1}{\lambda''} \right)$$

múyeshine burılǵan boladı. Nátiyjede qosındı vektor **A** usı vektorǵa salıstırǵanda

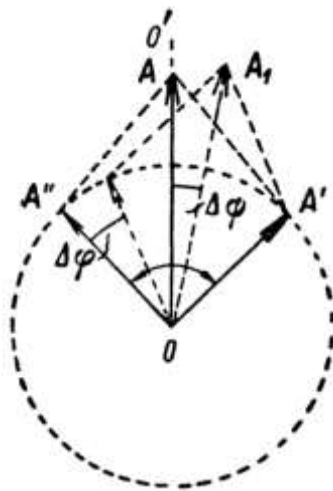
$$\Delta\psi = \frac{\Delta\varphi}{2} = \pi l \left(\frac{1}{\lambda'} - \frac{1}{\lambda''} \right) \quad (1)$$

múyeshine burılǵan jańa awhalda jaylasadı.

Dóńgelek boyınsha oń hám shep baǵıtlarda polarizaciyalanǵan nurlar ushın sındırıw koefficientleri n' hám n'' lerdı kirgizemiz. Bunday jaǵdayda $\lambda' = \lambda_0/n'$ hám $\lambda'' = \lambda_0/n''$ teńliklerine iye bolamız. Bul teńliklerde λ_0 - biz qarap atırǵan jaqtılıqtıń boslıqtaǵı uzınlıǵı. Bul λ' hám λ'' shamaların (1)-ańlatpaǵa qoyıp

$$\Delta\psi = \pi \frac{l}{\lambda_0} (n' - n'') \quad (2)$$

formulasına iye bolamız.



188-súwret.

Polarizaciya tegisliginiń aylanıwınıń júzege keliwi.

Solay etip, polarizaciya tegisliginiń buralıw múyeshi $\Delta\psi$ nıń shaması dóńgelek boyınsha ońǵa qaray hám shepke qaray polarizaciyalanǵan nurlardıń sındırıw koefficientleri n' menen n'' shamalarınıń ayırması boyınsha anıqlanadı eken.

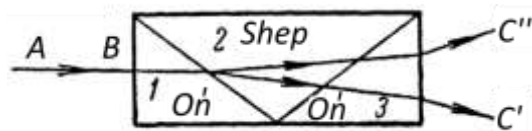
Frenel óziniń gipotezasın kvarctıń úsh bólegin bir biri menen jelimlew jolı menen alınǵan quramalı prizma arqalı ótkeriw jolı menen tekserip kórdi (189-súwret). 1- hám 3-prizmalar ońǵa buratuǵın, al 2-prizma shepke buratuǵın kvarctan soǵılǵan. Prizmalardıń úshewi de optikalıq kósherleri olardıń ultanlarına parallel etip kesilgen. Prizmalar sistemasına tegis polarizaciyalanǵan AB nırı normal baǵıtta túskende, bul nur birinshi prizma arqalı sınıwsız ótedi. Birinshi hám ekinshi prizmalardıń arasındǵı shegarada nur ekige bólinedi, sebebi túsken nur bólingen oń hám shep dóńgelek terbelisler ushın sındırıw koefficientleriniń mánisleri hár qıylı. Ekinshi hám úshinshi prizmalardıń shegarasında nurlar bir birinen jáne de kúshlirek qashıqlasadı. Nátiyjede prizmadan C' hám C'' nurları shıǵıp, olardıń ekewi de dóńgelek boyınsha polarizaciyalanǵan: birewiniń aylanıw baǵıtı oń, al ekinshisiniki shep. Haqıykatında usınday bolıp dóńgelek boyınsha polarizaciyalanǵan eki nur Frenel tárepinen alındı.

Kristallar menen bir qatarda polarizaciya tegisligin bura alatuǵın suyıqlıqlar da bar. Bunday suyıqlıqlardıń qatarına skipidar, qanttıń suwdǵı eritpesi, vino-tas kislotasınıń eritpesi h.t.b. kiredi. Vino-tas kislotasınıń eritpesi eki modifikaciya ushırasadı - ońǵa hám shepke qaray buratuǵın. Eritpeler ushın mınaday nızamlar orın aladı: aylandırıw múyeshi (buriw múyeshi) $\Delta\psi$ eritpeniń qatlamınıń qalınlıǵı l ge proporcional hám aktiv zattıń koncentraciyası c ǵa proporcional:

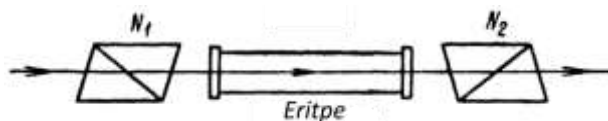
$$\Delta\psi = \alpha c l. \quad (3)$$

α shaması zattır túrinen gárezli; onı *aylandırıw turaqlısı* dep ataydı. Amorf halda aktiv bolğan barlıq zatlar (balqıtılğan yamasa eritpeler túrindegi) kristallar túrinde de aktiv. Biraq bunday hallardağı aylandırıw koefficienti α nıń shamasınıń hár qıylı bolıwı múmkin. Kerisinshe, amorf halda aktiv bolmağan bazı bir zatlar kristallıq halda polyarizaciya tegisligin aylandıradı. Mısalı, kristallıq halda kúshli aylandıratuǵın kvarc amorf halda (balqıtılğan kvarc) aylandırıwdı toqtatadı. Bunnan zatlardıń polyarizaciya tegisligin aylandıra alıw qábiletliginiń olardıń molekularınıń qurılısı menen de, kristallıq pánjeredegi molekularınıń jaylasıwı menen de anıqlanatuǵınlıǵı kelip shıǵadı.

189-súwret. Ońǵa hám shepke buratuǵın kvarctan soǵılğan quramalı prizma arqalı ótkende nurlardıń ajralıwı.



Elektronlıq teoriya kóz-qaraslarında aylandırıw qábiletligin eń birinshi túsindiriw mınaday boljawǵa tiykarlanǵan edi: optikalıq aktiv molekulada sonday baylanıslar boladı, jaqtılıq tolqınıń tásirinde elektronlar vint tárizli traektoriyalar boyınsha qozǵaladı. Aktiv kristallarda (mısalı, kvarcta) kremniy menen kislorod atomları vintlik sıziqlardıń boyında jaylasqan. Bir qansha waqıttan keyin polyarizaciya tegisliginiń aylanıwınıń simmetriya orayına da, simmetriya tegisligine de iye bolmağan anizotrop molekulardıń bar bolıwı menen de baylanıslı ekenligi ayqın boldı. Bunday jaǵdayda molekulanıń sheklerindegi elektromagnit maydanınıń bir tekli bolmaytuǵınlıǵın da esapqa alıwǵa tuwrı keledi.



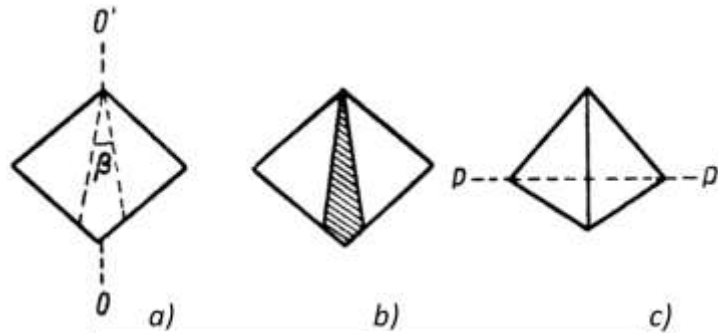
190-súwret. Saxarimetrdiń dúzilisiniń sxeması.

Polyarizaciya tegisliginiń burılıwı qubılısı eritpedegi qanttır koncentraciyasın ólshegende ámeliy jaqtan qullanıladı. Berilgen sharayattağı aylandırıw turaqlısı α nıń mánisin anıqlap, (3)-formula boyınsha eritpeniń koncentraciyasın tabıwǵa boladı. Bunday ólshepler qant sanaatında *saxarimetrler* dep atalatuǵın arnawlı ásbaplardıń járdeminde ótkeriledi. Eń ápiwayı saxarimetrdiń sxeması 190-súwrette keltirilgen. N_1 hám N_2 nikolleriniń arasına tegis parallel aynalar menen jabılğan kyuveta jaylastırıladı. Eritpe bolmağan jaǵdayda nikollerdi "qarańǵı", yaǵnıy olardıń bas kesimlerin óz-ara perpendikulyar etip jaylastıradı. Kyuvetanı eritpe menen toltırǵanda maydan jaqtılana baslaydı. Maydandı jáne de qarańǵı etiw ushın N_2 nikoldi bazı bir múyeshke buradı hám bul múyesh eritpedegi polyarizaciya tegisliginiń burılıwın anıqlaydı (onıń mánisi π den kishi bolğan jaǵdayda).

Nikollerdi "qarańǵıǵa" júdá dál qoyıwdıń múmkinshiligi bolmaǵanlıqtan, basqa polyarizaciyalıq dúzilisler qullanıladı. Házirgi waqıtları *yarım sayalıq analizatorlar* dep atalatuǵın dúzilislerdi jiýi qollanadı. Yarım sayalıq analizator Nikol prizmalarınan alınadı. Bunday jaǵdayda bas kesim tegisligi bolğan OO' tegisligine simmetriyalı hám bir biri menen úlken bolmağan β múyeshin quraytuǵın eki tegislik boyınsha kesiledi (bul tegisliklerdiń ornı 191-a súwrette punktir sıziqlar menen kórsetilgen). Tegisliklerdiń arasında jatatuǵın sına (191-b súwrette shtrixlanǵan) alıp taslanadı hám eki yarımǵa kese kesiminde olar durıs emes rombanı payda etetuǵınday etip jelimleydi (191-c súwret). Yarımardıń hár biri óz aldına xızmet etetuǵın analizator bolıp tabıladı, sonıń menen birge bul analizatorlardıń bas kesimleri bir birine salıstırǵanda β múyeshine burılǵan. Eger túsiwshi jaqtılıqtıń polyarizaciya tegisligi PP' eki yarım jelimlengen betke perpendikulyar bolsa (191-c súwret), onda eki yarımǵa jaqtılıqları birdey bolıp kórinedi¹⁸. Polyarizaciya tegisliginiń basqa barlıq awhallarında yarımardıń birewiniń jaqtılıǵı ekinshisinen joqarıraq boladı. Kóz

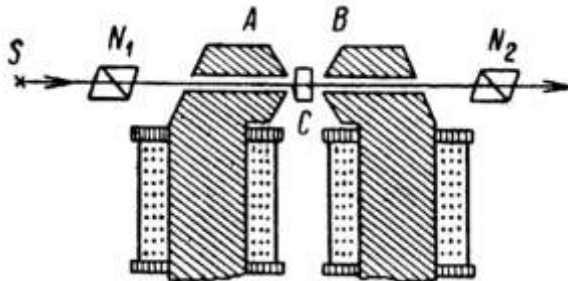
¹⁸ Eger PP' polyarizaciya tegisligi prizmanıń bólimleri jelimlengen tegislikke parallel bolsa eki yarımǵa jaqtılıǵı birdey boladı. Biraq, bul jaǵdayda jaqtılıq úlken, al jumıs islew ushın sharayat kemlew boladı.

qońılas bolǵan maydanlardıń jarıqlıǵın úlken dállikte anıqlay alatuǵın bolǵanlıqtan, usınday usıldıń járdeminde PP' polarizaciya tegisliginiń awhalın jaqsı belgilep alıwǵa boladı. Yarım sayalıq anazitor menen jumıs islegende monoxromat jaqtılıqtı paydalanıw zárúr. Sonlıqtan, jaqtılıqtıń deregi sıpatında natriy lampası yamasa jasıl filtri bar sinap lampası qollanıladı.



191-súwret. Yarım sayalıq analizatordıń dúzilisi.

§ 296. Polarizaciya tegisliginiń magnitlik aylanıwı. Polarizaciya tegisligin aylandırıwdıń tábiyiy qábiletligine iye bolmaǵan zatlar bunday qábiletlikke sırtqı magnit maydanınıń tásirinde iye boladı. Polarizaciya tegisliginiń magnitlik aylanıwı qubılısı 1846-jılı Faradey tárepinen ashıldı. Bul ilimiy ashılıw Faradeydiń kóp jıllar dawamında jaqtılıq hám magnit qubılıslarınıń arasındaǵı baylanıstıń bar ekenligin tabıwdıń nátiyjesi bolıp tabıladı. Faradey magnit maydanınıń jaqtılıqqa tikkeley tásirin tabıwdıń sáti tústi dep boljadı. Usıǵan baylanıslı ol "Maǵan jaqtılıqtıń nurın magnitlewdiń hám elektrlewdiń jáne magnit kúsh sızıqların jaqtılandırıwdıń sáti tústi" dep jazdı. Al haqıyqatında Faradey ashqan qubılıs basqa xarakterge iye: magnit maydanı usı magnit maydanına jaylastırılǵan zatqa tásir etedi hám bul tásir jaqtılıqtıń tarqalıw xarakterin ózgerterdi.



192-súwret.

Polarizaciya tegisligin magnitlik aylandırıwdı baqlaw usılı.

Polarizaciya tegisliginiń magnitlik aylanıwı jaqtılıq móldir zatta magnit kernewliginiń baǵıtında tarqalganda júzege keledi. Sonlıqtan magnitlik aylanıwdı elektromagnittiń nakonechniklerinde jıńışke kanallardı júrgiziw jolı menen baqlaw eń qolaylısı. Tájiriýbeniń sxeması 192-súwrette keltirilgen. Bul súwrette S - jaqtılıqtıń deregi, A hám B - elektromagnittiń nakonechnikleri, N_1 hám N_2 - nikoller hám C - polarizaciya tegisligi aylanatuǵın dene. Magnit maydanı bolmaǵanda (onıń ushın elektromagnittegi toqtıń óshiriliwi kerek) atanaq tárizli jaylastırılǵan N_1 hám N_2 nikolleri arqalı jaqtılıq barlıq sistema arqalı ótpeydi. Elektromagnittiń shınjırı arqalı toq ótkende polyuslardıń arasında magnit maydanı payda boladı, C denesi arqalı ótker jaqtılıqtıń polarizaciya tegisligi aylanadı hám jaqtılıq N_2 nikoli arqalı ótedi.

Polarizaciya tegisliginiń burılıw múyeshiniń shaması jaqtılıqtıń zattaǵı júriw jolınıń uzınlıǵı l ge hám magnit maydanınıń kernewligi H qa proporcional:

$$\psi = k l H. \quad (1)$$

Bul teńlikte k koefficienti berilgen deneniń magnit maydanında polarizaciya tegisligin aylandıra alıw qábiletligin táriyipleydi. Ulıwma aytqanda k nıń san mánisi úlken emes. Magnit maydanında polarizaciya tegisligin aylandırıw qábiletligine móldir qattı deneler sıyaqlı suyıqlıqlar da, gazler

de iye boladı. Eger ψ múyeshin minutlarda, H tı erstedlerde, al l di santimetrlerde ólshese, onda shiysheniń baǵı bir sortları ushın (awır filint) k nıń mánisi 0,1 ge jetedi.

Eger deneler tábiyiy optikalıq aktivlikke iye bolsa, onda olardı magnit maydanına alıp kelgende olardıń polarizaciya tegisligin aylandırıwdıń tábiyiy qábiletligine magnit maydanınıń tásirinde payda bolǵan polarizaciya tegisligin aylandırıw qábiletligi qosıladı.

Júdá úlken aylandırıw temir, nikel, kobalt sıyaqlı ferromagnit metallardıń júdá juqa qatlamlarında orın aladı (olar móldir bolarlıqtay juqa bolǵan). Qalınlıǵı 0,1 mkm bolǵan temir plenkası kernewligi 10 000 e bolǵan magnit maydanında polarizaciya tegisligin 2° qa buradı. Ferromagnit zatlarǵa aylanıw múyeshi sol ferromagnit zattıń magnitlengenligine proporcional hám, sonlıqtan, (1)-qatnasqa baǵınbaydı.

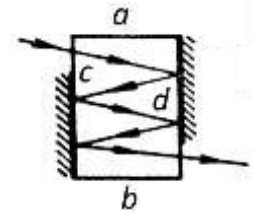
Hár qıylı deneler polarizaciya tegisligin hár qıylı baǵıtlarda buradı. *Ońǵa buratuǵın* yamasa *oń zatlar* dep magnit maydanınıń baǵıtında baqlaw júrgizip atırǵan baqlawshı ushın polarizaciya tegisligin oń tárepke qaray aylandıratuǵın zatlarǵa aytamız. Basqa sózler menen aytqanda, eger magnit kernewligi sıızıqları burǵınıń ilgerilemeli qozǵalıstınıń baǵıtına sáykes keledi dep esaplasaǵ, onda oń aylandırıwshı deneler ushın burǵınıń tutqasınıń aylanıw baǵıtı polarizaciya tegisliginiń aylanıw baǵıtın kórsetedi. Oń zatlar ushın k koefficientin oń dep esaplaydı. Polarizaciya tegisligin usı baǵıtqa qarama-qarsı baǵıtta aylandıratuǵın zatlardı *shepke buratuǵın* yamasa *teris zatlar* dep ataydı. Teris zatlar óziniń quramında barlıq waqıtta paramagnit atomlarǵa iye boladı. Paramagnit zatlardıń ózleri barlıq waqıtta teris bolmaydı. Hár bir berilgen zat ushın *aylanıw baǵıtı tek magnit maydanınıń baǵıtı menen ǵana anıqlanadı hám jaqtılıqtıń tarqalıw baǵıtınan ǵárezli emes*. Usınday qásiyeti boyınsha magnit aylanıwı tábiyiy aylanıwdan ayrıladı. Al tábiyiy aylanıwda bolsa aylanıwdıń baǵıtı onıń jaqtılıq nurınıń baǵıtında yamasa oǵan qarama-qarsı baǵıtta baqlanǵanlıǵına baylanıslı 295-paragrafta atap ótilgenindey, jaqtılıq nurınıń dáslep tábiyiy aylandıratuǵın dene arqalı bir baǵıtta, onnan keyin sol dene arqalı oǵan qarama-qarsı baǵıtta ótkende usı deneniń polarizaciya tegisligin aylandırmaıtuǵınlıǵı atap ótilgen edi. Magnit aylandırıwında bolsa aylanıw múyeshiniń shaması aylandırıwshı dene arqalı alǵa hám keyin ótkende tek úlkeyedi. Bul jaǵday jaqtılıqtıń aylandırıwshı deneniń ishinde kóp sanlı shaǵılısında magnitlik aylanıwdıń shamasın úlkeytiwge múmkinshilik beredi. Qarama-qarsı táreplerindegi jıńishke jolaqlardan basqa bólimleri gúmislengen elektromagnittiń polyuslarınıń arasında parallelepiped túrindegi izertlenetuǵın *ab* zatı jaylastırıladı (193-súwrette gúmislengen orınlar shtrixlaw menen belgilengen). Jaqtılıq nurı gúmislengen betlerde shaǵılısıp dene arqalı bir neshe ret alǵan hám keyin qaray ótedi hám joqarıda ayılǵanlarǵa sáykes polarizaciya tegisliginiń burılıw múyeshi $\Delta\psi$ denedegi nurdıń ulıwmalıq uzınlıǵına proporcional ósedı.

Magnit aylanıwınıń shaması jaqtılıqtıń tolqın uzınlıǵınan ǵárezli. Sebebi berilgen zat ushın k koefficienti hár qıylı tolqın uzınlıqları ushın hár qıylı mánislerge iye boladı.

Polarizaciya tegisliginiń magnitlik aylanıw qubılısı zattıń atomları menen molekulalarınıń quramına kiretuǵın elektronlardıń magnit maydanı bar bolǵan jaǵdaydaǵı precessiyası tárepinen júzege keledi. Usınday precessiyanıń nátiyjesinde dóńgelek boyınsha saat strelkasınıń baǵıtında hám oǵan qarama-qarsı baǵıtta polarizaciyalanǵan tolqınlar ushın dene hár qıylı sındırıw koefficientlerine iye boladı. Usınıń nátiyjesinde dóńgelek boyınsha hár qıylı baǵıtlarda polarizaciyalanǵan nurlar hár qıylı tezlikler menen tarqaladı. Al, 295-paragrafta kórsetilip ótilgenindey, bunday jaǵday polarizaciya tegisliginiń burılıwına alıp keledi. Polarizaciya tegisliginiń magnitlik aylanıw qubılısı atomlar tárepinen shıǵarılatsuǵın jaqtılıqtıń jıyılıǵınıń magnit maydanınıń tásirinde ózgeriwine alıp kelinetuǵın Zeeman qubılısı dep atalatuǵın qubılıs penen tıǵız baylanısqan (346-paragraftı qarańız). Magnit maydanı payda etilgennen keyin polarizaciya tegisliginiń magnitlik aylanıwı júdá kishi waqıt aralıǵınıń ishinde júzege keledi hám magnit maydanı óshirilgennen keyin júdá kishi waqıt aralıǵınıń ishinde joq boladı. Kerr effektindegidey, keshigiw waqıtı 10^{-9} sekundtı quraydı.

193-súwret.

Kóp qaytara shaǵılistırǵanda polyarizaciya tegisliginiń magnitlik aylanıw múyeshiniń úlkeyiwi.

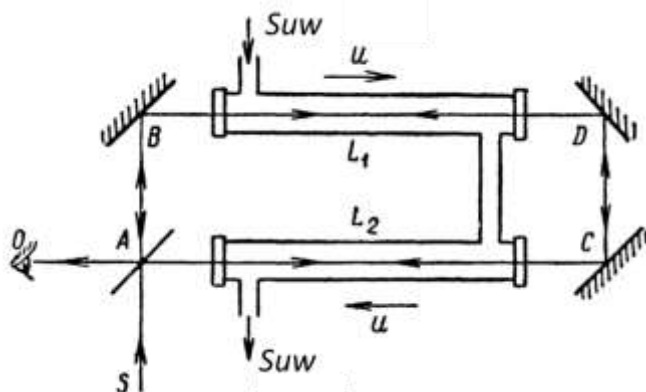


Magnit maydanı jaqtılıqtıń metaldıń polirovkalanǵan betindegi shashırawına da tásirin tiygizedi. Atap aytqanda, eger tegis polyarizaciyalanǵan jaqtılıq magnitlengen temirdiń polirovkalanǵan betinde shaǵılısatuǵın bolsa, onda ol magnitlenbegen temirdiń betinde shaǵılısqanda (basqa barlıq sharayatlar birdey bolǵanda) iye bolatuǵın polyarizaciyaдан ózgeshe bolǵan ellips tárizli polyarizaciyaǵa iye boladı (278-paragraf).

XXVI BAP

JAQTILIQTIŇ QOZǴALIWSHI DENELERDEGI TARQALIWI

§ 297. Qozǵalıwshı deneler menen ótkerilgen tájiriýbeler. Qozǵalıwshı denelerdegi jaqtılıqtıń tarqalıwın úyreniw fizikalıq qubılıslardıń tábiyatı, al keyinirek keńislik penen waqıttıń tábiyatı haqqındaǵı biziń bilimlerimizdiń rawajlanıwında ayırıqsha úlken orındı iyeledi. Biziń 250-paragrafta kórsetip ótkenimizdey, jaqtılıqtıń tolqınlıq teóriyası dúnyalıq efir - barlıq dúnyalıq keńislikti toltırıp turǵan hám barlıq deneler arqalı ótetuǵın ortalıq haqqındaǵı kóz-qaraslarınıń payda bolıwına alıp keldi. Dáslep efirge klassikalıq mexanikanıń nızamların qollanıwǵa boladı hám mexanikalıq sistema bolǵan efir esaplaw sisteması bola aladı, yaǵnıy denelerdiń qozǵalıwın efirge salıstırǵanda anıqlawǵa boladı dep boljadı. Jaqtılıqtıń elektromagnit teóriyasınıń rawajlanıwına baylanisli efir haqqındaǵı kóz-qaraslardı ulıwmalıq elektromagnitlik kóz-qaraslar menen almasırw denelerdiń qozǵalıwın efirge salıstırǵanda anıqlaw jónindegi boljawdı ózgertpedi (II tomdaǵı 216-paragraftı qarańız). Efirdi dúnyalıq keńislikti toltırıp turǵan ortalıq dep esaplawdıń sebebinen usı efirge salıstırǵandaǵı qozǵalıstı "absolyut" qozǵalıw dep esapladı. Bunnan bılay "absolyut" qozǵalıw haqqında gáp etilgende, biz usınday gipotezalıq qozǵalmaytuǵın efirge salıstırǵandaǵı qozǵalıstı názerde tutamız.



194-súwret. Efirdiń qozǵalatuǵın suw menen alıp júriľiwi boyınsha ótkerilgen Fizo tájiriýbesiniń sxeması.

Efirdiń bar ekenligi haqqındaǵı gipoteza maqseti efirdiń qásiyetlerin hám onıń ádettegidey zatlar menen óz-ara tásirlesiwiniń dálierek úyreniw bolǵan bir qatar tájiriýbelerdiń orınlanıwın kún tártibine qoydı. Eń dáslep móldir deneler qozǵalǵanda olardıń ishinde jaylasqan efirdi ózi menen alıp júre me yamasa júrmey me? degen soraw payda boldı. Bul sorawǵa juwaptı 1851-jılı orınlangan Fizo tájiriýbesiniń beriwı kerek edi. Fizo tájiriýbesi mınaday sxema boyınsha ótkerildi (194-súwre): S jaqtılıq nurı A yarım gúmisengen plastinkasına kelip túsken hám bul plastinkada ol eki AB hám AC nurlarına ayrılgan. Ózlerine kelip túsetuǵın nurlarǵa 45° múyesh penen qoyılǵan B, C hám D aynaları nurlardı 90° qa burǵan. Solay etip, yarım gúmisengen A plastinkada ekige ajratılǵan nurlar dúzilisti aylanıp shıǵadı: birinshisi saat strelkasınıń qozǵalıw baǵıtında, ekinshisi - oǵan qarama-qarsı baǵıtta. Olar qaytadan yarım móldir A plastinkasına kelip túsip olar birigedi hám bul interferenciya súwretin baqlawǵa múmkinshilik beredi. Nurlardıń jolında ishinde súwrette qozǵalıw baǵıtı strelka menen kórsetilgen u tezligi menen qozǵalatuǵın suw quyılǵan L_1 hám L_2 trubaları jaylastırılǵan.

Nurlardıń biri truba arqalı ótkende barlıq waqıtta aǵıstıń baǵıtında, al ekinshisi - oǵan qarama-qarsı baǵıtta tarqaladı. Eger suwdıń ishindegi efir usı suw menen alıp júriľetuǵın bolsa, onda nurlardıń ekewi de dúzilis arqalı ótip hám O noqatında qosılıp, nurlardıń barlıq jol arqalı

ótiwi ushın ketken hár qıylı waqıtlarǵa baylanıslı bazı bir fazalar ayırmasına iye bolıwı kerek. Fazalardıń bul ayırması O noqatındaǵı interferenciyanıń xarakterin anıqlaydı. Nurlardıń dúzilis arqalı ótiw waqıtı tek qozǵalıwshı suwdáǵı nurlardıń júrisi menen ǵana baylanıslı, sebebi barlıq basqa jaǵdaylarda olardıń júrip ótetuǵın jollarınıń uzınlıqları hár qıylı boladı. Tınıshlıqta turǵan suwdáǵı jaqtılıqtıń tezligin v arqalı belgileymiz Efir teoriyasınıń kóz-qarasları boyınsha v tınıshlıqta turǵan suwdıń ishindegi efirdegi jaqtılıqtıń tezligi bolıp tabıladı. Efirdi qozǵalıwshı dene tárepinen tolıq emes alıp júreledi, yaǵnıy onıń dúziliske salıstırǵandaǵı tezligi αv ǵa teń dep boljaymız. α nıń shaması birge teń yamasa onnan kishi bolıwı hám onıń mánisiniń tájiriybede anıqlanıwı kerek.

Bunday jaǵdayda aǵısqa qarsı baǵıtta tarqalatuǵın jaqtılıq ushın dúziliske salıstırǵandaǵı jaqtılıqtıń tezligi $v - \alpha u$ shamasına, al aǵıstıń baǵıtında tarqalatuǵın nur ushın jaqtılıqtıń tezligi $v + \alpha u$ shamasına teń boladı. Bunnan nurlardıń ekewiniń dúzilisti aylanıp shıǵıwı ushın jumsalǵan waqıtlardıń ayırması Δt mınaǵan teń boladı

$$\Delta t = \frac{2l}{v - \alpha u} - \frac{2l}{v + \alpha u} = \frac{4l\alpha u}{v^2 - \alpha^2 u^2}.$$

Bul teńlikte l - suw menen toltırılǵan trubalardıń hár qaysısınıń uzınlıǵı. Eki nurdıń arasındaǵı δ fazalar ayırması $2\pi\nu\Delta t$ shamasına teń (ν arqalı jaqtılıqtıń jiyiligi belgilengen). Solay etip, fazalar ayırmasınıń mánisi alıp júriw koefficienti α ge baylanıslı eken.

Fizo tınıshlıqtaǵı hám aǵıp turǵan suwdáǵı interferenciyalıq súwretti alǵan hám jolaqlardıń awısıwın ólshegen. Bul awısıw boyınsha fazalar ayırmasın hám, usıǵan sáykes, efirdiń alıp júriw koefficientin anıqlaw múmkin boldı. Fizo tájiriybeleri α nıń mınaday formula boyınsha anlatılatuǵınlıǵın kórsetti:

$$\alpha = 1 - \frac{1}{n^2}. \quad (1)$$

Bul formulada n arqalı suwdıń sındırıw kórsetkishi belgilengen¹⁹.

Solay etip, interferenciyalıq baqlawlardıń járdeminde bolǵan efirdiń qozǵalıwshı dene tárepinen yarımday alıp júreletuǵınlıǵı anıqlandı. Sonıń menen birge "alıp júriw koefficienti" bolǵan α shaması zattıń sındırıw koefficientinen ǵárezli eken: sındırıw koefficienti 1 ge teń bolǵan zattıń efirdi ózi menen birge alıp júrmewi kerek.

Fizo tájiriybeleriniń nátiyjeleri Jerdiń "absolyut" qozǵalıwın anıqlawǵa múmkinshilik beretuǵınday bolıp kórindi. Haqıyqatında da, hawa atmosferası 1 ge jaqın bolǵan sındırıw koefficienti n ge teń bolǵanlıqtan, onıń efirdi ózi menen sezilerliktey alıp júrmewi kerek. Usıǵan sáykes, Jerdiń oǵan jaqın jaylasqan efirdiń bólimlerine salıstırǵandaǵı qozǵalıwı biz joqarıda keltirgen mánistegi "absolyut" qozǵalıw bolıp tabıladı. Jerdiń absolyut qozǵalıwın anıqlawı kerek bolǵan tájiriybeniń ideyası tómendegiden ibarat. Jerdi efirdegi bazı bir baǵıtta v tezligi menen qozǵaladı dep boljayıq. Efirde c tezligi menen tarqalatuǵın jaqtılıqtıń Jerde bazı bir l jolin ótiwi ushın qansha waqıttıń talap etiletuǵınlıǵın esaplaymız. Eger jaqtılıq efirdegi Jerdiń qozǵalıwı baǵıtında tarqalatuǵın bolsa, onda bul waqıttıń shaması $\frac{l}{c-v}$ shamasına teń. Sebebi Jerge salıstırǵandaǵı jaqtılıqtıń tezligi jaqtılıqtıń efirdegi tezligi menen efirdiń Jerge salıstırǵandaǵı tezliginiń ayırmasına teń. Álbette, jaqtılıq Jerdiń efirdegi qozǵalıwı baǵıtına qarama-qarsı baǵıtta tarqalatuǵın bolsa, onda l jolin ótiw ushın kerek bolatuǵın waqıt $\frac{l}{c+v}$ shamasına teń boladı. Endi, eger jaqtılıq efirdegi Jerdiń qozǵalıwı baǵıtına perpendikulyar baǵıtta tarqalatuǵın jaǵdayda l jolin ótetuǵın bolsın. Bunday jaǵdayda jaqtılıqtıń Jerge salıstırǵanda $l = ab$ jolin ótetuǵın waqıttıń ishinde Jer efirge salıstırǵanda $aa' = vt$ jolin ótedi (195-súwret). Jaqtılıqtıń efirge salıstırǵandaǵı

¹⁹ Fizo tájiriybeleriniń efir teoriyasın islep shıqqan Frenel tárepinen burınaraq keltirip shıǵarılǵan (1)-formulanıń durıslıǵın tekserip kóriw ushın qoyılǵanlıǵın ańǵaramız.

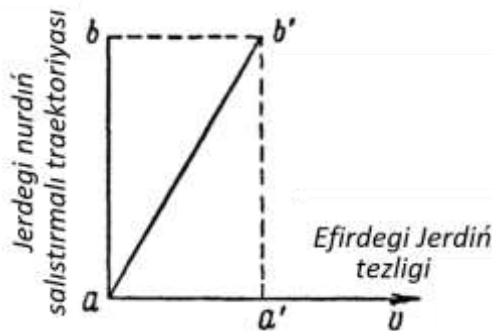
joli ab' tuwrısı menen belgilengen, al onıń bul joldı ótiwi ushın zárúr bolǵan waqıt mınaday qatnastıń járdeminde anıqlanadı:

$$t = \frac{\sqrt{l^2 + (vt)^2}}{c}.$$

Bul teńliktegi bólshektiń alımında efirdegi nurdıń jolı, al bóliminde onıń tezligi tur. Bul qatnastan t nı anıqlap, mınanı alamız:

$$t = \frac{l}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{l}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (2)$$

Demek, Jerdegi bir joldı ótiw ushın ketken waqıttıń shamasınıń bul joldıń Jerdiń efirge salıstırǵandaǵı qozǵalıstıń baǵıtına ǵárezli bolıwı kerek.



195-súwret.

Jerdiń qozǵalıstıń baǵıtına perpendikulyar baǵıtta jaqtılıqtıń tarqalıw waqtın esaplawǵa.

Usınday kóz-qarastıń tiykarında Maykelson tárepinen 1881-jılı onıń ózi konstrukciyalanǵan interferometrdiń járdeminde tájiriye islendi (264-paragraf).

Dúzilistiń sxeması 196-súwrette keltirilgen. S dereginen shıqqan jaqtılıq nurı kelip túsetuǵın nurdıń baǵıtına 45° múyesh penen jaylastırılǵan yarım gúmsilengen A plastinkasına kelip túsedı; bul plastinka nurdı óz-ara perpendikulyar baǵıtlarda tarqalatuǵın eki nurǵa bóledi. AM hám AM' nurları M hám M' aynalarında shaǵılısıp A plastinkasına qaytıp keledi. Al bul plastinkada eki nurdıń eki bólimge bóliniwi orın aladı. Jaqtılıqtıń bir bólimi derekke qaytıp keledi, ekinshi bólimi S' baǵıtında tarqalıp, sol baǵıtta interferenciya baqlanadı. Interferenciya kartinası eki nurdıń júrisler ayırması boyınsha anıqlanadı. Eger AM hám AM' jolları geometriyalıq jaqtan bir birine teń bolsa, onda eki nurdıń arasındaǵı júrisler ayırması $AM = AM' = l$ jolların hár qıylı waqıtlardıń ishinde júrip ótiwdiń esabınan ǵana payda boladı.

Ásbap Jerde onıń AM "iyini" Jerdiń efirdegi tezligine parallel etip qoyılǵan dep boljayıq. Bunday jaǵdayda nur AM jolın alǵan hám keyinge qaray ótiw ushın mınaday waqıttı jumsaydı:

$$t_1 = \frac{l}{c - v} + \frac{l}{c + v} = \frac{2l}{c} \cdot \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

Jerdiń efirdegi qozǵalıstıń baǵıtına perpendikulyar baǵıtta AM' jolın alǵan hám keyin qaray ótiw ushın (2)-formulaǵa sáykes mınaday waqıttı jumsaydı:

$$t_2 = 2t = 2 \frac{l}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Waqıtlardıń ayırması mınaǵan teń boladı:

$$t_2 - t_1 = \frac{2l}{c} \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right).$$

Eger $\frac{v}{c} = \beta$ qatnasın kishi dep esaplaytuǵın bolsaq, onda sońǵı teńlemenı bilayınsha jaza alamız:

$$t_2 - t_1 \cong -\frac{l\beta^2}{c}.$$

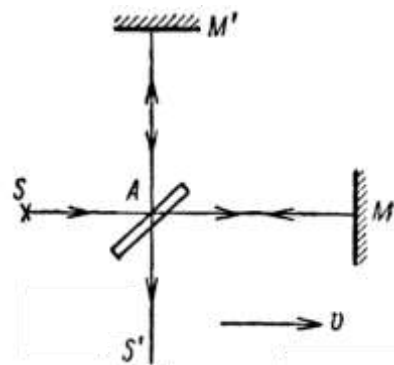
Eger ásbaptı tolıǵı menen 90° múyeshke AM baǵıtı AM' baǵıtı menen sáykes keletuǵınday etip bursaq, onda nurlar ózleriniń baǵıtların Jerdiń qozǵalı baǵıtına salıstırǵanda ózgertedi hám waqıttıń ayırmasınıń belgisi ózgeredi. Demek, ásbaptı burıw waqıtlardıń ayırmasınıń $\frac{2l\beta^2}{c}$ shamasına ózgeriwine alıp keledi. Eger waqıttıń ayırması jaqtılıq terbelisleriniń bir dáwirine teń shamaǵa ózgeretuǵın bolsa, onda interferenciyalıq súwrettiń bir jolaqqa ózgeriwiniń orın alıwı kerek. Biz qarap atırǵan jaǵdayda ásbaptı burǵanda alınatuǵın interferenciyalıq súwrettegi jolaqtıń T dáwirdiń $\frac{2l\beta^2}{c}$ bólimine sáykes keletuǵın shamaǵa, yaǵnıy

$$x = \frac{2l\beta^2}{cT} = \frac{2l}{\lambda} \beta^2$$

shamasına jılısıwı kerek.

196-súwret.

Maykelson tájiriybesiniń sxeması.



Ásbaptı burǵanda interferenciyalıq jolaqlardıń qansha shamaǵa jılısatuǵınlıǵın ólshep, β shamasın hám, usıǵan sáykes, Jerdiń efirge salıstırǵandaǵı tezligin anıqlawǵa boladı.

Biz kútip atırǵan effektıń shamasın bahalaw ushın Jerdiń efirdegi tezligin onıń Quyashtıń dógerindegi orbita boyınsha qozǵalı tezligine teń dep boljaymız, yaǵnıy $v = 3 \cdot 10^6$ sm/sek. Maykelsonnıń sońǵı tájiriybelerinde (1887-jıl) l uzınlıǵınıń shaması 11 m ge teń boldı, baqlawlar tolqın uzınlıǵı $5,9 \cdot 10^{-5}$ sm bolǵan jaqtılıqta ótkerildi. Demek, bunday jaǵdayda interferenciyalıq súwrettiń

$$x = \frac{2l\beta^2}{\lambda} = \frac{2 \cdot 11 \cdot 10^3 \cdot 10^{-8}}{5,9 \cdot 10^{-5}} = 0,4$$

jolaqqa jılısıwı kútildi. Al Maykelson paydalanǵan dúzilis súwrettegi jolaqtıń júzden birine jılısıwın seze alatuǵınday dálikke iye edi.

Maykelsonnıń tájiriybelerinde jolaqlardıń sezilerliktey jılısıwı tabılǵan joq. Tájiriybeler jıldıń hár qıylı máwsimlerinde hám hár qıylı geografiyalıq noqatlarda qaytadan ótkerildi. Biraq, olardıń barlıǵı da kútilgen nátiyjeni bermedi.

Maykelsonnıń alǵan nátiyjeleri efirdiń Jer atmosferası tárepinen tolıǵı menen alıp júriletuǵınlıǵın kórsetti. Biraq, bul jaǵday Fizo tájiriybesinde alınǵan nátiyjelerge qarama-qarsı keledi yamasa esaplaw sisteması sıpatında xızmet ete alatuǵın efir haqqındaǵı biziń kóz-qaraslarımızdıń durıs emes ekenligin kórsetedi. Birinshi boljaw - efirdiń Jer tárepinen tolıǵı menen alıp júriletuǵınlıǵı tek Fizo tájiriybesine ǵana emes, al juldızlıq aberraciya qubılısına da sáykes kelmeydi. Juldızlıq aberraciya Jer tınıshlıqta turǵan efirge salıstırǵanda qozǵaladı degen boljaw boyınsha tezliklerdi qosıwdıń elementar teoreması tiykarında jaqsı túsindiriletuǵınlıǵı málim (254-paragrafqa qarańız). Suw menen toltırılǵan teleskoptıń járdeminde juldızlıq aberraciyanı

baqlaw efirdiń tolıq emes alıp júрилиwi teорияsına, yaǵnıy Fizo tájiriybesiniń nátiyjelerine tolıq sáykes keledi. Demek, efir teорияsına tiykarlanıp biz bir waqıtta Fizo tájiriybesin, juldızlıq aberraciya qubılısın hám Maykelson tájiriybesin túsindire almaymız. Maykelson tájiriybesin túsindiriw ushın efir sáykes qásiyetlerge, al juldızlıq aberraciya hám Fizo tájiriybesin túsindiriw ushın pútkilley qarama-qarsı bolǵan qásiyetlerge iye bolıwı kerek.

Maykelson tájiriybeleriniń teris nátiyjeleri keń hám keskin túrdegi ilimiy diskussiyanı júzege keltirdi. Efir teорияsınan bas tartpay Maykelson tájiriybesin túsindiriwge tırıswlar boldı. Mısalı, jaqtılıqtıń efirdegi tezligi usı jaqtılıqtıń dereginiń efirdegi tezliginen gárezli hám qozǵalmaytuǵın derek orın alǵanda jaqtılıq dereginiń efirdegi tezligi menen efirdegi jaqtılıqtıń tezliginiń qosındısınan turadı degen gipoteza usınıldı. Bul gipoteza Maykelson tájiriybesin túsindire aldı, Biraq Doppler qubılısınıń bar bolıwı (I tom, 113-paragraf) hám Jerden tıstaǵı dereklerdi (mısalı, qos juldızlar) baqlawlar menen sáykes kelmedi. Eń aqırında, eń sońǵı waqıtları (1956-jılı) A.M.Bonch-Bruevich hám V.A.Molchanovlar tárepinen orınlangan Quyashtıń hár qıylı shetleri tárepinen nurlandırılǵan jaqtılıqlardıń tezliklerin tuwrınan-tuwrı ólshewlerde jaqtılıqtıń tezliginiń derektiń tezliginen gárezsiz ekenligin kórsetti (bul jaǵdayda óziniń kósheriniń dógeresinde aylanatuǵın Quyashtıń).

Bunnan bir qansha burınaraq qozǵalatuǵın denelerdiń qozǵalı baǵıtındaǵı ólshemleriniń qısqaratuǵınlıǵı haqqındaǵı gipoteza usınıldı. Bul gipoteza boyınsha efirge salıstırǵanda qozǵalatuǵın qálegen dene efirde qozǵalmay turǵan denegе salıstırǵanda qısqaraq boladı (qozǵalı baǵıtında). Bunday jaǵdayda qozǵalıwshı denelerdiń sızıqlı ólshemleriniń tınıshlıqta turǵan denelerdiń sızıqlı ólshemlerine qatnası

$$\frac{l'}{l} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

shamasına teń boladı dep boljadı. Bul teńlikte v arqalı deneniń efirge salıstırǵandaǵı tezligi belgilengen. Maykelson tájiriybesin túsindire alǵan bul gipoteza bir waqıtları elektronlıq teорияda úlken orındı iyeledi.

Maykelson tájiriybesi menen bir qatarda basqa da tájiriybeler islendi hám tallandı jáne olardıń barlıǵında Jerdiń absolyut qozǵalısin anıqlawǵa tırıstı (mısalı, II tom, 216-paragraftaǵı Truton hám Nobldiń tájiriybesi). Bul tájiriybelerdiń barlıǵı da teris nátiyjelerdi berdi - olarda Jerdiń absolyut qozǵalısin bilinbedi.

Bul tájiriybelerdiń barlıǵınıń jıynaǵı efirge salıstırǵandaǵı qozǵalıstı anıqlaw haqqındaǵı gipotezaniń haqıyqatlıqqa sáykes kelmeytuǵınlıǵın hám efirdiń esaplaw sisteması xızmetin atqara alatuǵın ortalıq bola almaytuǵınlıǵın kórsetti. Efirdiń bar ekenligi haqqındaǵı gipoteza paydalanıwǵa bolmaytuǵın gipoteza bolıp shıqtı. Sebebi bul gipoteza tikkeley baqlanatuǵın faktlerge qayshı keledi. Maykelson tájiriybesi *jaqtılıqtıń vakuumdıǵı tezliginiń barlıq esaplaw sistemaları ushın, olardıń qozǵalısin halınan gárezsiz, birdey ekenligin kórsetti*. Nátiyjede biz Eynshteyn tárepinen 1905-jılı usınılǵan eki jaǵdayǵa kelemiz: 1) sistemanıń "absolyut" tezligi bolmaydı; 2) bir birine salıstırǵanda teń ólshewli hám tuwrı sızıqlı qozǵalatuǵın sistemalardaǵı boslıqtaǵı jaqtılıqtıń tezlikleriniń san shamaları birdey (ólshem birlikleri birdey bolǵanda). Salıstırmalıq teорияsı usı eki jaǵdayǵa tiykarlanadı.

Kóp sanlı burjuaziyalıq filosoflardıń salıstırmalıq teорияsın idealistik relyativistik filosofiya poziciyasında turıp tallaytuǵınlıǵın atap ótiw kerek. Biraq, haqıyqatında, salıstırmalıq teорияsın usınday etip tallawǵa hesh qanday tiykar joq. Salıstırmalıq teорияsınıń haqıyqıy mazmunı keńislik penen waqıttıń obektivlik qásiyetlerin anıqlawǵa, bir birine salıstırǵanda tuwrı sızıqlı hám teń ólshewli qozǵalatuǵın esaplaw sistemalarınıń birinshisinen ekinshisine ótiw formulaların anıqlaytuǵın tábiyattıń obektiv bolǵan nızamların anıqlawǵa alıp kelinedi.

§ 298. Salıstırmalıq teoriyası. Nyuton mexanikası mexanikalıq salıstırmalıq principine baǵınadı. Bul princip materiallıq noqattıń tezleniwın oǵan tásir etetuǵın kúshler menen baylanıstıratuǵın Nyuton nızamlarınıń nátiyjesi bolıp tabıladı:

$$m\ddot{x} = f_x; m\ddot{y} = f_y; m\ddot{z} = f_z. \quad (1)$$

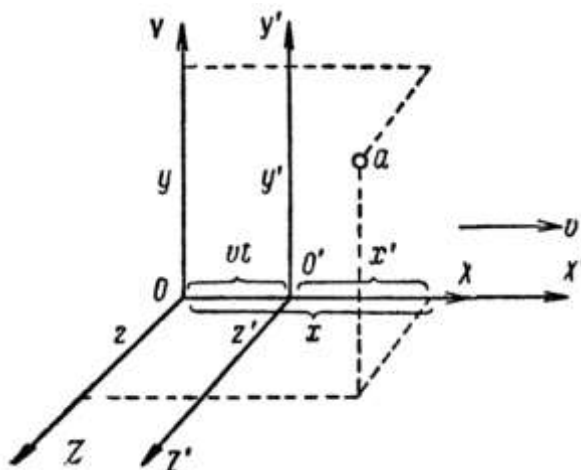
Bul teńliklerde $\ddot{x}, \ddot{y}$ hám $\ddot{z}$ ler tezleniwdiń qurawshıları, al f_x, f_y, f_z ler kúshtiń koordinata kósherleriniń baǵıtlarındaǵı qurawshıları bolıp tabıladı.

Nyutonnıń teńlemeleri qálegen inerciallıq sistema, yaǵnıy bir birine salıstırǵanda teń ólshewli hám tuwrı sızıqlı qozǵalatuǵın sheksiz kóp sanlı inerciallıq esaplaw sistemaları ushın durıs. Mexanikanıń (1)-teńlikler menen keltirilgen nızamları barlıq inerciallıq esaplaw sistemalarında durıs bolatuǵın bolsa, onda sistemanıń ishinde ótkerilgen hesh bir mexanikalıq tájiriobenıń járdeminde onıń teń ólshewli hám tuwrı sızıqlı qozǵalısn anıqlawdıń múmkinshiligi bolmaydı. Bul tastıyıqlawdı mexanikalıq salıstırmalıq principiniń formulirovkası dep esaplawǵa boladı (I tom, 19-paragraf).

Bul máselege ekinshi kóz-qarastan da keliwge boladı. Bir koordinatalar sistemasınan oǵan salıstırǵanda qozǵalatuǵın koordinatalar sistemasına ótiw koordinatalardıń túrlendiriwi menen ámelge asırıladı. XYZ sisteması tınıshlıqta tur, al sáykes koordinata kósherleriniń baǵıtı usı XYZ koordinatalar kósherlerineń baǵıtlarına parallel bolǵan $X'Y'Z'$ sisteması oǵan salıstırǵanda OX kósheriniń baǵıtında turaqlı v tezligi menen qozǵaladı dep boljaymız (197-súwret). Bunday jaǵdayda qozǵalıstıń baǵıtına perpendikulyar bolǵan barlıq kósherlerdiń koordinataları eki koordinatalar sistemasında birdey, al qozǵalıstıń baǵıtındaǵı koordinata bolsa $x' = x - vt$ teńligi boyınsha baylanısqa boladı. Demek, eki koordinatalar sistemalarındaǵı noqattıń koordinatalarınıń arasındǵı mınaday baylanısqa iye bolamız:

$$x' = x - vt, y' = y, z' = z. \quad (2)$$

Koordinatalardıń arasındǵı bul qatnaslardı *Galiley túrlendiriwleri* dep ataydı. v tezligi turaqlı bolǵanlıqtan (2)-túrlendiriw formulalarınan $\dot{x}' = \dot{x}, \dot{y}' = \dot{y}, \dot{z}' = \dot{z}$ túrlendiriw formulaları kelip shıǵadı, yaǵnıy noqattıń tezleniwi sistemalardıń ekewinde de birdey bolatuǵınlıǵın hám (1)-Nyuton formulalarınıń eki sistemada da birdey ekenligi kelip shıǵadı. Nyuton teńlemeleriniń forması XYZ koordinatalar sistemasınan $X'Y'Z'$ koordinatalar sistemasına ótkende ózgermeydi yamasa bunday jaǵdayda *Nyuton mexanikasınıń teńlemeleri Galiley túrlendiriwlerine qarata invariant* dep aytıw qabil etilgen.



197-súwret.

Bir birine salıstırǵanda v tezligi menen qozǵalatuǵın eki koordinatalar sisteması.

Galiley túrlendiriwlerinen tezliklerdi qosıw teoreması kelip shıǵadı. Haqıyqatında da, (2) niń birinshi teńlemesine waqıt boyınsha tuwındı alsaq, onda

$$\dot{x}' = \dot{x} - v$$

yamasa

$$\dot{x} = \dot{x}' + v$$

teńliklerine iye bolamız. Álbette $\dot{x}$ shaması tezliktiń OX kósherine túsirilgen proekciyası ("absolyut" tezliktiń proekciyası), al $\dot{x}'$ shaması tezliktiń OX' kósherine túsirilgen proekciyası (salıstırmalı tezliktiń proekciyası) bolıp tabıladı. v - kóshirmeli tezlik.

Demek, $\dot{x} = \dot{x}' + v$ teńligi XYZ koordinatalar sistemasındaǵı OX kósheriniń baǵıtındaǵı a noqatınıń tezliginiń qurawshısı usı a noqatınıń $X'Y'Z'$ koordinatalar sistemasındaǵı OX' kósherdiń baǵıtındaǵı proekciyası menen $X'Y'Z'$ koordinatalar sistemasınıń XYZ koordinatalar sistemasına salıstırǵandaǵı kóshirmeli v tezliginiń (boljawımız boyınsha OX kósheriniń baǵıtındaǵı) qosındısına teń.

Maykelson tájiriybeleri tek mexanikalıq qubılıslardıń járdeminde ǵana emes, al optikalıq qubılıslardıń járdeminde de sistemaniń "absolyut" qozǵalısnı tabıwdıń múmkin emes ekenligin kórsetti. Bunday jaǵdayda sistemaniń efirge salıstırǵandaǵı qozǵalısnı tabıwǵa bolǵan tırıswlardıń tezliklerdi qosıw teoremasın optikalıq qubılıslar oblastına qollanıw haqqındaǵı boljawǵa tiykarlanǵan ekenligin atap ótiw áhmiyetli. Maykelson tájiriybeleriniń esaplawları usı teoriyanıń tiykarında ótkerildi. Usı jaǵdayǵa baylanıslı Maykelson tájiriybeleriniń unamalı nátiyjelerdi bermegenligi bunday oblastta tezliklerdi qosıw teoremasın, soǵan sáykes Galiley túrlendiriwlerin paydalanıwǵa bolmaytuǵınlıǵın kórsetti.

Elektronlıq teoriyanı islep shıǵıwdı efir modelinen paydalanǵan Lorenc mınaday jaǵdaylardıń orınlı ekenligin kórsetti: eger efirge salıstırǵanda qozǵalıslı halında turatuǵın denelerdiń qısqaratuǵınlıǵı haqqındaǵı gipoteza hám sonıń menen birge qozǵalatuǵın koordinatalar sisteması ushın qozǵalmaytuǵın koordinatalar sistemasındaǵıdan ózgeshe bolǵan waqıt ólshemi qabıl etilse, onda efirge salıstırǵandaǵı qozǵalıstı anıqlawdıń múmkin emes ekenligi haqqındaǵı tájiriybede alınǵan nátiyjelerdiń teoriyanıń teńlemeleri menen sáykes keletuǵınlıǵın kórsetti. Bul nátiyje matematikalıq túrde Lorenc tárepinen bir birine salıstırǵanda tuwrı sızıqlı teń ólshemli qozǵalıslı halındaǵı eki sistemadaǵı koordinatalar menen waqıttı baylanıstıratuǵın túrlerdiriwlér formasında ańlatıldı. 197-súwretke sáykes qozǵalatuǵın eki sistema ushın Lorenc túrlendiriwleriniń formulaları tómendegidey túrge iye:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \beta^2}}, y' = y, z' = z, t' = \frac{t - \frac{xv}{c^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}}. \quad (1)$$

Bul formulalarda $\beta = v/c$ - sistemaniń tezliginiń jaqtılıqtıń tezligine qatnası.

Ádettegidey tezlikler ushın Lorenc túrlendiriwleri Galileydiń klassikalıq túrlendiriwlerinen júdá kishi ayırmaǵa iye. Sebebi eki túrlendiriwdiń ayırması ádette júdá kishi bolǵan $\beta = v/c$ shaması boyınsha ayrıladi. $\beta \rightarrow 0$ sheginde Lorenc túrlendiriwleri Galiley túrlendiriwlerine ótedi.

Lorenc ózi alǵan túrlendiriwlerge formal túrdegi mánisti berdi, al tuwrıdan-tuwrı mánisti ol efirge salıstırǵanda qozǵalatuǵın denelerdiń uzınlıǵınıń qısqarıwı gipotezası hám qozǵalıwshı koordinatalar sistemaları ushın óziniń "jergilikli waqıttı" kirgiziwdiń zárúrligi menen baylanıslı dep esapladı. Biraq, tájiriybelerde alınǵan maǵlıwmatlardı tallaw Lorenc túrlendiriwleriniń efirdiń bar ekenligi haqqındaǵı gipoteza menen baylanıslı emes ekenligin kórsetedi hám onıń qosımsha matematikalıq usıl bolıp tabılmaytuǵınlıǵı, Biraq tájiriybelerden kelip shıǵatuǵın keńislik penen waqıttıń tiykarǵı obektivlik qásiyetlerin ańlatatuǵınlıǵı haqqındaǵı juwmaqqa alıp keledi. Eger jaǵday haqıyqatında da usınday bolsa hám koordinatalar menen waqıttı durıs túrlendiriwler (3)-ańlatpalar menen beriletuǵın bolsa, onda Galiley túrlendiriwleriniń juwıq ekenligin hám olardıń tek ádettegi mexanikalıq tájiriybelerde orın alatuǵın v/c qatnasınıń kishi mánislerinde durıs bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı.

Klassikalıq fizika "absolyut" keńislik hám waqıt haqqındaǵı metafizikalıq kóz-qaraslardan paydalandı. Bul túsiniqlerge Nyutonniń ózi mınaday anıqlamalardı berdi: "Absolyut, haqıyqıy hám matematikalıq waqıt óz-ózinen hám óziniń tábiyatına sáykes qanday da bir obektten ǵárezsiz teń ólshewli ótedi " hám "Absolyut keńislik óziniń tábiyatına baylanıslı qanday da bir basqa obektten

gárezsiz birdey bolıp hám qozǵalıssız qaladı". Biraq, keńislik penen waqıttıń obektivlik qásiyetleri haqıyqatında basqasha, olardı biz tek tájiriybede alınǵan maǵlıwmatlardıń tiykarında bile alamız.

Salıstırmalıq teoriyasınıń tiykarları tájiriybede alınǵan maǵlıwmatlar tiykarında alınatuǵın nátiyjelerdi izbe-iz qollanıwdıń tiykarında alınadı (297-paragrafqa qarańız): 1) teń ólsheuli hám tuwrı sıızılıq qozǵalıstaǵı barlıq sistemalar ekvivalent, yaǵnıy sistemada ótkerilgen onıń "absolyut" qozǵalısnı anıqlay alatuǵın tájiriybe bolmaydı; 2) salıstırmalı teń ólsheuli hám tuwrı sıızılıq qozǵalatuǵın qálegen sistemada ólshengen jaqtılıqtıń tezligi bul jaqtılıqtıń dereginiń tezliginen gárezsiz birdey mániske teń boladı. Usınday anıqlamalardan Lorenc formulalarınıń kelip shıǵatuǵınlıǵın kórsetiwge boladı (mayda shrift penen jazılǵan tekstti qarańız). Solay etip, eger esaplaw sisteması sıpatında paydalanıwǵa bolatuǵın efir haqqındaǵı gipotezanı dıqqattan shıǵarıp taslasaq hám tájiriybelerde alınǵan maǵlıwmatlardı ǵana paydalansaq, onda Lorenc túrlendiriwlerin alıw ushın hesh qanday qosımsha fizikalıq gipotezanı kirgiziwdiń keregi bolmaydı. Kerisinshe, Lorenc túrlendiriwlerin paydalanıw esaplaw sistemaları bir birine salıstırǵanda qozǵalǵandaǵı, sonıń ishinde qozǵalıwshı denelerdiń optikasına menen baylanıslı bolǵan qálegen fizikalıq qubılıstı tallawǵa boladı. Bunday barlıq jaǵdaylarda tájiriybelerde alınǵan maǵlıwmatlar menen dál sáykes keliw orın aladı.

Salıstırmalıq teoriyası qálegen fizikalıq nızamnıń Lorenc túrlendiriwlerin qanaatlandırıwı kerek dep esaplaydı. Bul matematikalıq jaqtan bir sistemaniń koordinatalarında anlatılǵan tábiyattıń nızamnıń (3)-formula boyınsha ekinshi sistemaniń koordinatalarına ótkende óziniń túrin saqlaytuǵınlıǵın ańǵartadı. Demek, *qálegen nızamnıń Lorenc túrlendiriwlerine qarata invariant bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı*. Galiley túrlendiriwlerine qarata invariant bolǵan Nyuton nızamları Lorenc túrlendiriwlerine qarata invariant emes. Salıstırmalıq teoriyasınıń ideyalarınıń rawajlanıwı Nyuton teńlemeleriniń mınaday mánistegi ózgerislerine alıp keldi: Lorenc túrlendiriwlerine qarata invariant hám $\beta = v/c$ qatnasınıń sheksiz kishi mánisinde Nyuton teńlemelerine ótetuǵın mexanikanıń teńlemeleri keltirip shıǵarıldı. Mexanikanıń jańa teńlemeleriniń nátiyjelerin tájiriybede sınap kóriw bul jańa teńlemelerdiń durıs ekenligin kórsetti. Elektrodinamikanıń teńlemelerine (Maksvell teńlemelerine) keletuǵın bolsaq, onda olar Lorenc túrlendiriwlerine karata invariant bolıp shıqtı. Solay etip, klassikalıq fizikanıń elektrodinamika oblastındaǵı, soǵan sáykes optika oblastındaǵı nızamlarınıń salıstırmalıq teoriyasınıń talapların qanaatlandıratuǵınlıǵı ayqın boldı. Al klassikalıq (Nyutonlıq) mexanikanıń nızamlarınıń tek ǵana $v \ll c$ teńsizligi orınlanatuǵın anıqlandı. $v > c$ tezlikleri ushın Lorenc túrlendiriwleriniń mánisiniń joǵalatuǵınlıǵına itibar beremiz. Bul denelerdiń jaqtılıqtıń tezliginen úlken tezliklerde qozǵala almaytuǵınlıǵına sáykes keledi.

Lorenc túrlendiriwlerin keltirip shıǵarıw ushın eki koordinatalar sistemasın qaraymız: shtrixlanbaǵan XYZ sisteması (bul sistemani qozǵalmaydı dep shárt qoyamız) hám salıstırmalı qozǵalıstaǵı shtrixlanǵan $X'Y'Z'$ sisteması (bul sistemani qozǵaladı dep shárt qoyamız, 198-súwret). Eki sistemaniń kósherlerin bir birine parallel etip alamız, $X'Y'Z'$ sistemasınıń XYZ sistemasına salıstırǵandaǵı turaqlı salıstırmalı tezligi v nıń baǵıtı OX kósheri menen baǵıtlas etip alamız hám waqıttıń baslanǵış momentinde ($t = 0, t' = 0$) sistemalardıń ekewiniń koordinatalar bası bir noqatta turdı dep boljaymız. Bunday shártler orın alǵanda y hám z koordinatalarınıń

$$y' = y, z' = z$$

teńlikleri boyınsha túrlenetuǵınlıǵın ańsat kórsetiwge boladı hám bul másele menen biz shuǵıllanbaymız. x koordinatası menen waqıt t nıń qalayınsha túrlenetuǵınlıǵın qaraymız. Qozǵalatuǵın sistemaniń koordinatalar basına sáykes keletuǵın noqattı alamız, álbette onıń koordinatası x' nolge teń boladı:

$$x' = 0. \quad (4)$$

Usı noqattıń x koordinatası (qozǵalmaytuǵın sistemada) t waqıt momentinde (qozǵalmaytuǵın sistemada belgilep alınǵan) $x = vt$ ǵa teń boladı

Bul teńlikti bılayınsha kóshirip jazamız:

$$x - vt = 0. \quad (5)$$

(4)- hám (5)-teńliklerdi salıstırıp keńisliktiń bir noqatında x' shamasınıń da (shtirxlanǵan sistemadaǵı), $x - vt$ shamasınıń da (shtrixlanbaǵan sistemadaǵı) nolge aylanatuǵınlıǵı ańǵaramız. Sonlıqtan x' hám $x - vt$ shamaları waqıttıń qálegen momenti ushın bir birinen tek turaqlı α kóbeytiwshi menen ǵana ayırıladı dep boljaw tábiyiy.

$$x' = \alpha (x - vt). \quad (6)$$

Endi qozǵalmaytuǵın sistemaniń koordinatalar basına sáykes keletuǵın noqattı qaraymız; usı sistemadaǵı onıń x koordinatası nolge teń:

$$x = 0. \quad (7)$$

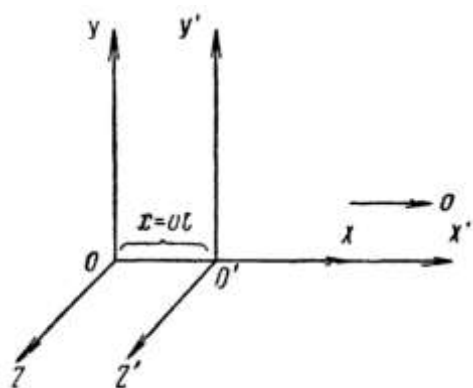
Qozǵalatuǵın sistemada bolsa t' waqıt momentinde (qozǵalatuǵın sistemada belgilep alınǵan) usı noqat $x' = -vt'$ shamasına teń bolǵan x' koordinatasına iye boladı. Bunnan usı noqat ushın

$$x' + vt' = 0$$

teńligi orınlı boladı. Bul teńlikti tap sol noqattı táriyipleytuǵın (7)-teńlik penen salıstırıp, joqarıda islegenimizdey

$$x = \alpha(x' + vt') \quad (8)$$

teńligin jazamız.



198-súwret.
Lorenц túrlendiriwleriniń formulaların keltirip
shıǵarıwǵa.

(6)- hám (8)-formulalardaǵı proporcionallıq koefficientlerdiń birdey bolıwınıń kerek ekenligin eki sistemaniń ekvivalent ekenligi haqqındaǵı tájiriybede alınǵan nátiyjelerge, yaǵnıy sistemalardıń qaysısınıń absolyut qozǵalatuǵınlıǵın anıqlawdıń múmkin emes ekenligine tiykarlanıp ańsat kórsetiwge boladı.

Túrlendiriw nızamın tabıw ushın α koefficientin anıqlaw kerek. Onıń ushın eki sistemada ólshengen jaqtılıqtıń tezliginiń bir c shamasına teń bolatuǵınlıǵı haqqındaǵı tájiriybede alınǵan maǵlıwmatlarǵa súyenemiz. Jaqtılıq signalın eki koordinatalar sistemalarınıń koordinatalar basları bir noqatta turǵan momentte jiberemiz (eki sistemadaǵı bul momenti baslanǵısh moment dep esaplaymız: $t = t' = 0$). Waqıttıń iqtıyarlı túrde alınǵan t (t') momentlerinde koordinataları sáykes

$$x = ct, x' = ct' \quad (9)$$

teńlikleri menen anıqlanatuǵın noqatlarǵa kelip jetedi.

(6)- hám (8)-teńlemelerden mınaǵan iye bolamız:

$$xx' = \alpha^2(x - vt)(x' + vt').$$

Bul teńlikke x penen x' tıń orınlarına olardıń (9)-ańlatpalar boyınsha anıqlanǵan mánislerin qoyıp

$$c^2 = \alpha^2(c^2 - v^2)$$

teńlemesin tabamız. Bul teńlemenı α ge qarata sheship mınaǵan iye bolamız (túbirdiń aldındaǵı oń belgi ushın):

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

α nıń tabılǵan mánisleri (6)- hám (8)-koordinatalardı túrlendiriwdi mına túrde jazıwǵa múmkinshilik beredi:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \beta^2}}, x = \frac{x' + vt}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

Birinshi teńlikten x' tı qoyıp, mınanı tabamız:

$$x\sqrt{1-\beta^2} = \frac{x-vt}{\sqrt{1-\beta^2}} + vt'.$$

Bul teńlemenı t' shamasına qarata sheship, mınaday formulaǵa iye bolamız:

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

Tap usınday jollar menen t ushın mınaday formulanı alamız:

$$t = \frac{t' + \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

Alınǵan barlıq qatnaslardı biriktirip, qozǵalatuǵın sistemadaǵı koordinatalar menen waqıt ushın ańlatpalardı qozǵalmaytuǵın sistemadaǵı koordinatalar menen waqıt arqalı jazamız:

$$\left. \begin{aligned} x' &= \frac{x-vt}{\sqrt{1-\beta^2}}, & y' &= y, & z' &= z, \\ t' &= \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1-\beta^2}}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Qozǵalmaytuǵın sistemadaǵı koordinatalar menen waqıt ushın ańlatpalardı qozǵalatuǵın sistemadaǵı koordinatalar menen waqıt arqalı bilayınsha jazamız:

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{x' + vt}{\sqrt{1-\beta^2}}, & y &= y', & z &= z', \\ t &= \frac{t' + \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1-\beta^2}}. \end{aligned} \right\} \quad (10a)$$

(10)- hám (10a) formulalar koordinatalar menen waqıttı bir esaplaw sistemasınan ekinshi esaplaw sistemasına ótkendegi túrlendiriwlerdi ańǵartadı. Kórinip turǵanıday, (10)-formulalar (3)-Lorenc túrlendiriwlerine sáykes keledi

Shtrixlanǵan hám shtrixlanbaǵan sistemalardıń ekvivalent ekenligin hám (10)-túrlendiriwdiń (10a) túrlendiriwden salıstırmalı tezliktiń belgisin ózǵertiw menen alınatuǵınlıǵın ańǵaramız.

§ 299. Salıstırmalıq teoriyasınıń túrlendiriwlerinen kelip shıǵatuǵın nátiyjeler. Lorenc túrlendiriwleriniń eń áhmiyetli nátiyjelerin qaraymız.

a) Hár qıylı sistemalardaǵı denelerdiń uzınlıǵı. Lorenc túrlendiriwleri bir deneniń usı dene turǵan sistemadaǵı sızıqlı ólshemleriniń usı denegge salıstırǵanda qozǵalısta bolatuǵın sistemadaǵı usı deneniń sızıqlı ólshemlerine teń bolmaytuǵınlıǵın kórsetedi. XYZ sistemasında tınıshlıqta turǵan bazı bir sterjen OX kósheriniń baǵıtında jaylasqan hám bul sistemada l uzınlıǵına teń (bul uzınlıq onıń bası menen ushınıń koordinatalarınıń ayırmasına teń) dep boljaymız:

$$l = x_2 - x_1.$$

Sterjenge salıstırǵanda onıń uzınlıǵınıń baǵıtında v tezligi menen qozǵalatuǵın shtrixlanǵan koordinatalar sistemasındaǵı onıń uzınlıǵı nege teń?

Bul l uzınlıǵın tabıw ushın onı shtrixlanǵan sistemadaǵı sterjenniń bası menen ushınıń x'_2 hám x'_1 koordinatalarınıń ayırması túrinde ańǵartıw kerek. Bunday jaǵdayda Lorenc túrlendiriwlerin paydalanıp, x'_2 hám x'_1 koordinataların *shtrixlanǵan sistemada anıqlanǵan waqıttıń bir momentinde alıw kerek*. Solay etip, x'_2 hám x'_1 koordinataların 298-paragraftaǵı (3)-formulanıń járdeminde x_2 hám x_1 koordinataları menen baylanıstırıp, *shtrixlanǵan sistemadaǵı waqıttı alıw kerek*. Bul waqıttı turaqlı dep esaplap tómendegilerge iye bolamız:

$$x'_2 = x_2\sqrt{1-\beta^2} - vt', \quad x'_1 = x_1\sqrt{1-\beta^2} - vt'.$$

Bunnan mınaday teńlik kelip shıǵadı:

$$x'_2 - x'_1 = (x_2 - x_1)\sqrt{1-\beta^2}$$

yamasa

$$l' = l\sqrt{1 - \beta^2}.$$

Ózine salıstırǵanda qozǵalatuǵın koordinatalar sistemasındaǵı sterjen usı sterjen tınıshlıqta turǵan koordinatalar sistemasına salıstırǵanda kelterek boladı:

$$l' < l.$$

Eger biz shtrixlanǵan sistemada tınıshlıqta turǵan sterjendi alsaq, onıń uzınlıǵı $l' = x'_2 - x'_1$ shamasına, al shtrixlanbaǵan sistemada onıń uzınlıǵı $l = x_2 - x_1$ shamasına teń bolǵan bolar edi. Endi ólshewlerdi shtrixlanbaǵan sistemadaǵı t waqıt momentinde ótkeriw kerek. 298-paragraftaǵı (3)-Lorenc túrlendiriwlerinen paydalanıp, x_2 hám x_1 shamaların x'_2 hám x'_1 shamaları arqalı ańlatamız. Bunday jaǵdayda biz

$$x_2 - x_1 = (x'_2 - x'_1)\sqrt{1 - \beta^2}$$

yamasa

$$l = l'\sqrt{1 - \beta^2}$$

teńligine iye bolamız, yaǵnıy sterjen tınıshlıqta turǵan sistemada uzınraq boladı eken.

Denelerdiń OY hám OZ kósherleriniń baǵıtındaǵı ólshemleriniń eki sistemada da birdey bolatuǵınlıǵın ańǵaramız.

Salıstırmalıq teoriyasınıń bul juwmaǵı efirge salıstırǵandaǵı denelerdiń ólshemleriniń qısqartatuǵınlıǵı haqqındaǵı gipotezanı alıstıradı. Salıstırmalıq teoriyası boyınsha sterjen tınıshlıqta turǵan sistemada eń úlken uzınlıqqa iye boladı.

b) Hár qıylı sistemalaradaǵı waqıyalaradıń uzaqlıǵı. Waqıyalaradıń uzaqlıǵı da hár qıylı koordinatalar sistemalarında hár qıylı boladı. SHtrixlanbaǵan XYZ koordinatalar sistemasındaǵı A noqatında uzaqlıǵı $\tau = t_2 - t_1$ bolǵan bazı bir waqıya júzege keldi dep boljayıq (199-súwret). Bul teńlikte t_1 menen t_2 arqalı XYZ koordinatalar sistemasında belgilenip alıńǵan usı waqıyanıń bası menen aqırınıń waqıt momentleri belgilengen. SHtrixlanǵan $X'Y'Z'$ koordinatalar sistemasındaǵı usı waqıyanıń uzaqlıǵı $\tau' = t'_2 - t'_1$ qanday boladı? XYZ koordinatalar sistemasında belgilenip alıńǵan t_1 hám t_2 waqıt momentlerine $X'Y'Z'$ koordinatalar sistemasındaǵı A noqatı ushın t'_1 hám t'_2 waqıt momentleri sáykes keledi (yaǵnıy x koordinatasınıń bir mánisi ushın). Demek, bizge x koordinatasınıń bir mánisi ushın t' penen t nı baylanıstıratuǵın 298-paragraftaǵı (3)-formulanı paydalanıw kerek boladı. Nátiyjede biz mınaday ańlatpalardı iye bolamız:

$$\sqrt{1 - \beta^2} \cdot t'_1 = t_1 = \frac{xv}{c^2}, \quad \sqrt{1 - \beta^2} \cdot t'_2 = t_2 = \frac{xv}{c^2}.$$

Bunnan

$$\sqrt{1 - \beta^2}(t'_2 - t'_1) = t_2 - t_1$$

yamasa

$$\tau' = \frac{\tau}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

formulaların alamız.

τ' waqıt aralıǵı τ waqıt aralıǵınan kishi boladı.

Keri máseleni qoyıwǵa da boladı. Meyli, shtrixlanǵan sistemada (x' turaqlı) bazı bir waqıyanıń uzaqlıǵı $\tau' = t'_2 - t'_1$ shamasına teń bolsın. Bul waqıyanıń shtrixlanbaǵan sistemadaǵı uzınlıǵı qanday boladı?

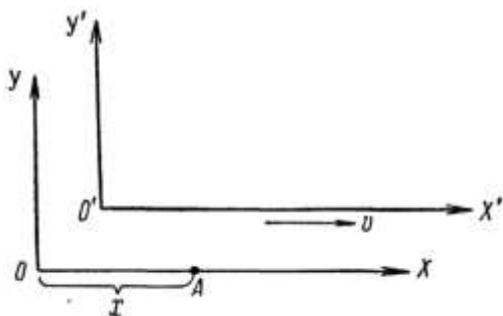
Bul sorawǵa juwap beriw ushın 298-paragraftaǵı (3)-túrlendiriwdi paydalanamız hám ondaǵı x' shamasın turaqlı dep boljaymız. Bunday jaǵdayda

$$t_2 - t_1 = \frac{t'_2 - t'_1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

yamasa

$$\tau = \frac{\tau'}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

formularına iye bolamız. Endi τ waqıt aralığı τ' waqıt aralığınan úlken. Bunnan mınaday juwmaqqa kelemiz: *bazı bir A noqatında bolıp ótetuǵın waqıyanıń uzınlığı usı A noqatı tınıshlıqta turatuǵın koordinatalar sistemasındaǵıǵa salıstırǵanda kishi.*



199-súwret.

Waqıyalardıń hár qıylı koordinatalar sistemalarındaǵı uzınlıqların anıqlawǵa.

298-paragraftaǵı túrlendiriwdiń (3)-matematikalıq formasına sáykes sistemalardıń salıstırmalı tezligi qansha úlken bolsa, onda usı eki sistemaǵa qarata anıqlanǵan waqıyanıń uzınlıqlarınıń ayırması úlken boladı.

c) tezliklerdi qosıw teoreması. Joqarıda ayılıp ótilgenindey, Nyuton mexanikasındaǵı tezliklerdi qosıw teoreması Galiley túrlendiriwleri menen baylanıslı. Ádette bul teorema bılayınsha ayılıadı: noqattıń "absolyut" tezligi u onıń salıstırmalı tezligi (u') penen kóshirmeli (v') tezlikleriniń geometriyalıq qosındısına teń:

$$u = u' + v'.$$

Bunday jaǵdayda "absolyut" tezlik dep (onı efirge salıstırǵandaǵı gipotezalıq "absolyut" tezlik penen shatastırmaw kerek) berilgen máseleniń shárti boyınsha qozǵalmaydı dep qabıl etilgen sistemaǵa salıstırǵandaǵı tezlikti túsinedi. Bul sistemanı XYZ arqalı belgileymiz. Demek, "absolyut" tezlik shtrixlanbaǵan sistemada ólshenedi. Salıstırmalı u' tezlik dep biz shtrixlanǵan sistemada ólshengen tezlikti, al kóshirmeli v' tezlik dep shtrixlanǵan sistemanıń shtrixlanbaǵan sistemaǵa salıstırǵandaǵı tezligin túsinemiz. Lorenc túrlendiriwlerinen joqarıda keltirilgen tezliklerdiń arasındaǵı baylanıstıń Nyuton mexanikasındaǵı tezliklerdiń arasındaǵı baylanıstan ózgeshe bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Bul baylanıstı tabıw ushın 298-paragraftaǵı (3)-teńlemelerdiń birinshisin sońǵısına aǵzama-aǵza bólemiz hám nátiyjede

$$\frac{x}{t} = \frac{x' - vt'}{t' + \frac{x'v}{c^2}} = \frac{\frac{x'}{t'} + v}{1 + \frac{x'}{t'} \cdot \frac{v}{c^2}}$$

teńligine iye bolamız. x/t nıń "absolyut" tezliktiń OX kósherine túsirilgen proekciyası (dáliregi onıń ortasha mánisi), x'/t' tıń salıstırmalı tezliktiń O'X' kósherine túsirilgen proekciyası, al v nıń sistemanıń kóshirmeli tezligi ekenligin ańǵarıp, sońǵı ańlatpanı

$$u_x = \frac{u'_x + v}{1 + u'_x \frac{v}{c^2}} \quad (1)$$

túrinde jazamız. Tap sonday jollar menen tezliktiń basqa da proekciyaların alamız:

$$u_y = \frac{u'_y \sqrt{1 - \beta^2}}{1 + u'_x \frac{v}{c^2}}, \quad u_z = \frac{u'_z \sqrt{1 - \beta^2}}{1 + u'_x \frac{v}{c^2}}. \quad (1a)$$

298-paragraftaǵı (3)-teńlemelerdi paydalanıp usınday jollar menen

$$u'_x = \frac{u_x - v}{1 - u'_x \frac{v}{c^2}}, \quad u'_y = \frac{u_y \sqrt{1 - \beta^2}}{1 - u'_x \frac{v}{c^2}}, \quad u'_z = \frac{u_z \sqrt{1 - \beta^2}}{1 - u'_x \frac{v}{c^2}}$$

formuların alıwǵa boladı. Bul formular (sistemalardıń salıstırmalı qozǵalısları OX kósheriniń boyında boladı degen boljawdıń tiykarında keltirip shıǵarılǵan) klassikalıq fizikanıń tezliklerdi

qosıw ushın jazılğan ádettegi formulalardı alıstıradı. Tezliktiń "kóldeneń" hám "boyлық" proekciyaları ushın jazılğan (1)- hám (1a) formulalardıń hár qıylı ekenligin ańǵaramız. Eger biz jaqtılıqtıń tezligine barabar tezlikler menen is alıp barsaq bul formulalar boyınsha ótkerilgen esaplawlardıń nátiyjeleri klassikalıq mexanikanıń formulaları boyınsha ótkerilgen esaplawlardıń nátiyjelerinen úlken ayırmaǵa iye boladı. Mısal retinde shtrixlanǵan sistemada $O'X'$ kósheriniń baǵıtında c tezligi menen qozǵalatúǵın jaqtılıq nurın qaraymız hám onıń shtraxlanbaǵan sistemadaǵı tezligin anıqlaymız. (1)-formula boyınsha $u'_x = c$ teńligi orınlı dep bolıp, biz izlep atırǵan shama ushın

$$u_x = \frac{c + v}{1 - c \frac{v}{c^2}} = c$$

nátiyjesine iye bolamız. SHtrixlanbaǵan sistemadaǵı tezlik c ǵa teń. Klassikalıq formulanıń bul jaǵdayda $c + v$ tezligin beretuǵınlıǵı tábiyiy. Álbette, bul nátiyjenıń alınıwın kútiw kerek edi, sebebi Lorenc túrlendiriwlerin keltirip shıǵarıw jaqtılıqtıń tarqalıw tezliginiń sistemaniń qozǵalısan ǵárezsiz ekenligine tiykarlanǵan edi.

Joqarıda atap ótilgen jaqtılıqtıń tezliginiń sheklik xarakteri tezliklerdi qosıw formulalarınan ayqın kórinip tur; u'_x hám v tezlikleriniń ekewin de c ǵa teń dep esaplaǵan jaǵdayda da u_x tezligi ushın c mánisin qaytadan alamız.

§ 300. Qozǵalıwshı deneler optikas hám salıstırmalıq teoriyası. Joqarıda kórsetilip ótilgenindey, efir teoriyasınıń sátsizligi Fizo, Maykelson tájiriybelerin hám juldızlıq aberraciya qubılısın birden-bir kóz qarasta tallawdıń barısında kórinde. Usıǵan baylanıslı mınaday sorawdıń payda bolıwı tábiyiy: bul qubılıslar salıstırmalıq teoriyasında qalayınsha túsindiriledi? Maykelson tájiriybesi arnawlı túrdegi tallawdı talap etpeydi, sebebi, atap aytqanda, onıń ózi salıstırmalıq teoriyasınıń tiykarǵı talapların belgilewde baslanǵısh jaǵday sıpatında qabıl etildi.

Fizo tájiriybesiniń nátiyjeleri tezliklerdi qosıw teoremasınıń tuwrıdan-tuwrı nátiyjesi sıpatında efirdiń tolıq emes alıp júriwini haqqındaǵı boljawsız-aq alınadı. Tájiriybeni usınday kóz-qarasta qaraymız. Suwdıń sındırıw koefficientin n arqalı belgilep, suwdaǵı jaqtılıqtıń salıstırmalıq tezligi u'_x tı

$$u'_x = \frac{c}{n}$$

shamasına teń etip alamız.

Suwdıń aǵısı v kóshirmeli tezligi menen anıqlanadı. Interferenciya kartinası jaqtılıqtıń dúziliske salıstırǵandaǵı tezligi u_x boyınsha anıqlanadı. v/c shamasın kishi dep esaplap hám onıń ekinshi, úshinshi hám onnan da joqarı dárejelerin esapqa almay, 299-paragraftaǵı tezliklerdi qosıw teoreması (1) tiykarında mınanı alamız:

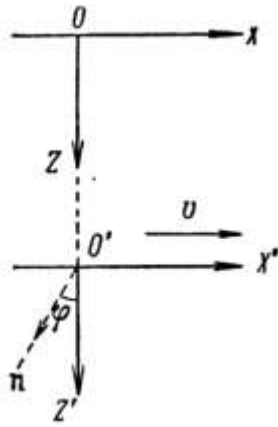
$$u_x = \frac{\frac{c}{n} + v}{1 + \frac{c}{n} \cdot \frac{v}{c^2}} \cong \left(\frac{c}{n} + v \right) \left(1 - \frac{v}{nc} \right).$$

Bunnan keyin v/c qatnası bar aǵzanı esapqa almaw jolı menen tómendegi teńlikke iye bolamız:

$$u_x = \frac{c}{n} + v \left(1 - \frac{1}{n^2} \right). \quad (1)$$

Eger efirdiń alıp júriw koefficientin $\left(1 - \frac{1}{n^2} \right)$ shamasına teń dep esaplasaq, onda bul nátiyje tezliklerdi qosıwdıń ádettegi teoremasına, yaǵnıy Fizo tájiriybesiniń nátiyjesine sáykes keledi.

Solay etip, Maykelson hám Fizo tájiriybeleri birden-bir kóz-qarastan túsindiriledi eken.



200-súwret.

Juldızlıq aberraciya qubılısın túsindiriwge.

Juldızlıq aberraciya qubılısın qaraymız. Onıń ushın shtrixlanbaǵan sistemanı biz baqlaytuǵın juldız benen, al shtrixlanǵan sistema teleskop ornastırılǵan Jer menen baylanıslı dep boljaymız (200-súwret). Meyli, juldızdıń jaqtılıq nurı OZ kósheriniń baǵıtında tarqalatuǵın bolsın. Bul nurdıń Jerdegi $O'Z'$ kósheri menen qanday múyeshti jasaytuǵınlıǵın anıqlaymız. Eki sistemanıń OX hám $O'X'$ kósherleri Jerdiń tezligi v ǵa parallelyu XOZ tegisliginde OZ baǵıtında tarqalatuǵın jaqtılıq nurınıń teńlemesi mınaday túrge iye:

$$s = a \cos 2\pi v \left(t - \frac{z}{c} \right). \quad (2)$$

Bul teńlikte a arqalı terbelistiń amplitudası, al v arqalı jiyiligi belgilengen. Tap sol nur $O'X'Z'$ koordinatalar sistemasında $O'Z'$ kósheriniń baǵıtında emes, al $O'X'Z'$ tegisliginde jetetuǵın $\mathbf{n}$ vektori menen anıqlanatuǵın bazı bir baǵıtta tarqaladı. Bul nurdıń teńlemesin

$$s = a \cos 2\pi v' \left(t' - \frac{x'\alpha + z'\gamma}{c} \right) \quad (3)$$

túrinde jazıwǵa boladı. Bul teńlemede α menen γ arqalı nur menen $O'X'$ hám $O'Z'$ kósherleriniń arasındǵı múyeshter belgilengen. Al t' bolsa $X'Y'Z'$ sistemasında esaplanǵan waqıt bolıp tabıladı.

Jer menen baylanıslı bolǵan sistemadaǵı nurdıń baǵıtın anıqlaw ushın (2)-teńlemedegi koordinatalar menen waqıttı Lorenc formulalarınıń járdeminde túrlendiremiz hám shtrixlanǵan sistemadaǵı terbelislerdiń fazasın anıqlaymız.

298-paragraftaǵı (3)-túrlendiriwdi paydalanıp,

$$s = a \cos 2\pi v \left(t - \frac{z}{c} \right) = a \cos 2\pi v \left(\frac{t' + x' \frac{v}{c^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{z'}{c} \right)$$

yamasa

$$s = a \cos 2\pi \frac{v}{\sqrt{1 - \beta^2}} = a \cos 2\pi v \left(t' + \frac{x' \frac{v}{c} - z' \sqrt{1 - \beta^2}}{c} \right)$$

teńligine iye bolamız. Bul teńlikti (3)-formula menen salıstırıp

$$v' = \frac{v}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \alpha = -\frac{v}{c}, \gamma = \sqrt{1 - \beta^2} \quad (4)$$

formulalarına iye bolamız.

(4)-formuladan Jer menen baylanıslı bolǵan koordinatalar sistemasında Juldızdıń jaqtılıǵı $O'Z'$ kósheri menen kosinusı $\gamma = \sqrt{1 - \beta^2}$ shamasına teń φ múyeshin jasaydı eken; demek, teleskoptıń trubası vertikalǵa salıstırǵanda usınday múyeshke qıyalanǵan bolıwı kerek. φ múyeshiniń sinusı $\beta = \frac{v}{c}$ shamasına teń. Jerdiń orbitasındǵı tezligi $3 \cdot 10^6$ sm/sek, al jaqtılıqtıń tezligi $c = 3 \cdot 10^{10}$ sm/sek shamasına teń bolǵanlıqtan $\beta = 10^{-4}$ shamasına teń boladı. β nıń usınday mánislerinde sinus penen tangensler is júzinde bir birine teń hám biz juldızlıq aberraciya ushın

klassikalıq sáykes keliwge iye bolamız: *teleskoptıń kósheriniń qıyalıq múyeshiniń tangensi v/c ǵa teń*. Biz aberraciya qubılısın dara mısalda túsindirdik; máseleni nurdın ıqtıyarlı baǵıtı ushın ulıwmalastırıwǵa boladı²⁰.

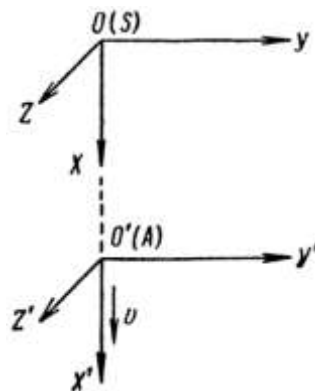
Doppler qubılısın tallaǵandaǵı Lorenc túrlendiriwleriniń tutqan ornı júdá áhmiyetli. Bul qubılıs jaqtılıqtıń deregine salıstırǵanda qozǵalatuǵın sistemada qabıl etiletuǵın jaqtılıqtıń jiyiliginıń ózgerisinen ibarat. Serpimli ortalıqta tarqalatuǵın tolqınlar ushın ádettegi Doppler qubılısı tómendegiden ibarat (I tom, 113-paragraaf). Derek terbelisler tarqalatuǵın ortalıqta qozǵalǵanda terbelislerdi registraciyalaytuǵın qanday da bir ásbap tárepinen qabıl etiletuǵın jiyiliktiń shaması v' derek tárepinen shıǵarılǵan jiyilik v dan ózgeshe boladı. v' jiyiligi v jiyiligi menen bılayınsha baylanısqan:

$$v' = v \frac{V - v_1}{V - v_2}. \quad (5)$$

Bul teńlikte V - terbelislerdiń ortalıqta tarqalıw tezligi, v_1 menen v_2 - registraciyalaytuǵın ásbap penen derektiń tezlikleriniń olardıń ekewin tutastıratuǵın tuwrıǵa túsirilgen proekciyaları; eger v_1 hám v_2 tezlikleri jaqtılıqtıń tarqalıw baǵıtı menen baǵıtlas bolsa, onda olardı oń belgige iye dep esaplanadı. (5)-formula jiyiliktiń ózgerisiniń tek salıstırmalı tezlik $v = v_1 - v_2$ den ǵana ǵárezli emes, al terbelis tarqalatuǵın ortalıqqa salıstırǵandaǵı v_1 hám v_2 tezlikleriniń ózlerinen de ǵárezli ekenligin kórsetedi. Demek, jiyilikti ólshew ortalıqtaǵı jaqtılıqtıń dereginiń (yamasa registraciyalaytuǵın ásbaptıń) tezligin anıqlaw ushın da xızmet ete aladı eken.

Jaqtılıq efirde qozǵaladı dep esaplangan jaǵdayda Doppler effektindegi jiyiliktiń ózgerisi efirge salıstırǵandaǵı qozǵalıstı, yaǵnıy "absolyut" qozǵalıstı tabıwǵa boladı dep boljawǵa boladı. "Absolyut" qozǵalıstı tabıwdıń múmkin emes ekenligi tabılǵannan keyin jaqtılıq tolqınları ushın Doppler qubılısınıń teoriyasın qaytadan qarap shıǵıwdıń hám onı salıstırmalıq teoriyasınıń talapları menen sáykes keltiriwdiń zárúrliǵı payda boldı.

201-súwret.
Doppler qubılısı ushın ańlatpanı keltirip
shıǵarıwǵa.



Derektiń hám jaqtılıq tolqınlarınıń tásiiri úyreniletuǵın sistemaniń salıstırmalı qozǵalıstındaǵı jiyiliktiń ózgerisi Lorenc túrlendiriwleriniń járdeminde ańsat alınadı. XYZ koordinatalar sisteması S deregi menen baylanısqan, al jiyilikti ólshew $X'Y'Z'$ sistemasında ámelge asırıladı hám onıń v arqalı belgilengen salıstırmalı tezligi $O'X'$ kósheri menen baǵıtlas dep boljaymız.

Meyli, jaqtılıq S dereginen (201-súwret) OX kósheriniń baǵıtında tarqalatuǵın bolsın. Bunday jaǵdayda XYZ sistemasındaǵı terbelislerdiń fazası $2\pi v \left(t - \frac{x}{c}\right)$ ǵa teń. Bul ańlatpada v - derek tárepinen shıǵarılǵan jaqtılıqtıń jiyiligi; basqa sóz benen aytqanda v arqalı XYZ sistemasında waqıt biriginde qabıl etiletuǵın terbelislerdiń sanına teń (usı sistemada sanalǵan). $2\pi v \left(t - \frac{x}{c}\right)$

²⁰ Qatań túrde aytqanda, aberraciya qubılısın Jerdiń Quyashtıń dógeregindegi haqıyqıy qozǵalıstınıń inerciallıq emes xarakterinen de túsindiriwge boladı. Bunday jaǵdayda onı teń ólshewli hám tuwrı sızıqlı qozǵalıstı penen almasırdıń keregi joq.

fazasın $X'Y'Z'$ sistemasındağı koordinatalar menen waqıtqa túrlendiremiz. 298-paragraftağı (3)-formulalar boyınsha

$$2\pi\nu\left(t - \frac{x}{c}\right) = 2\pi\nu\left(\frac{t' + x'\frac{v}{c^2}}{\sqrt{1-\beta^2}} - \frac{x' - vt'}{c\sqrt{1-\beta^2}}\right) \quad (6)$$

teńligine iye bolamız.

$X'Y'Z'$ sistemasında ν waqıt birligindegi terbelislerdiń sanına (yaǵnıy jaqtılıqtıń jiyiligine) teń bolmaydı. Sebebi bul sistemada uzınlıq penen waqıtıń masshtabları basqasha. $X'Y'Z'$ sistemasında qabil etiletuǵın jaqtılıqtıń jiyiligi ν' tı (6)-ańlatpanıń oń tárepini $2\pi\nu\left(t - \frac{x}{c}\right)$ túrine alıp keliw jolı menen tabamız.

$$2\pi\nu'\left(t' - \frac{x'}{c}\right) = 2\pi\nu\left(\frac{t' + x'\frac{v}{c^2}}{\sqrt{1-\beta^2}} - \frac{x' - vt'}{c\sqrt{1-\beta^2}}\right)$$

teńliginen

$$\nu' = \nu \frac{1 - \frac{v}{c}}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad (7)$$

teńligin alamız.

(7)-ańlatpanı

$$\nu' = \nu \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}} \quad (7a)$$

túrinde de yamasa juwıq túrde

$$\nu' \cong \nu \left(1 - \frac{1}{2} \frac{v}{c}\right) \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v}{c}\right) \cong \nu \left(1 - \frac{v}{c}\right)$$

túrinde jazıwǵa boladı. Tap usınday juwıqlawda klassikalıq (5)-formula mınanı beredi:

$$\nu' \cong \nu \left(1 - \frac{v_1 - v_2}{V}\right) = \nu \left(1 - \frac{v}{V}\right).$$

Bunnan, biz kórsetken juwıqlawda salıstırmalıq teoriyasınıń formulaları menen klassikalıq formulanıń bir birine sáykes keletuǵınlıǵın kóremiz.

Biraq, dál bolǵan (7a) formula menen klassikalıq (5)-formulanıń arasında úlken ayırma bar: klassikalıq (5)-formulaǵa registraciyalaytuǵın ásbaptıń tezligi ν_1 menen derektiń tezligi ν_2 óz aldına bólek kiretuǵın bolsa, (7a) formulaǵa tek registraciyalaytuǵın ásbap penen derektiń salıstırmalı tezligi ν ǵana kiredi. Solay etip, basqa barlıq fizikalıq qubılıslar sıyaqlı Doppler qubılısı da qanday da bir sistemanıń "absolyut" tezligin anıqlawǵa múmkinshilik bermeydi.

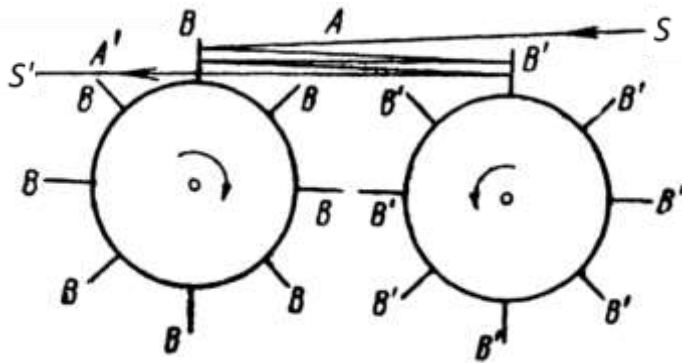
Salıstırmalıq teoriyasınıń ekinshi áhmiyetli nátiyjesi Dopplerdiń kóldeneń qubılısı bolıp tabıladı. Bul qubılıstıń mánisi $X'Y'Z'$ sistemasındağı onıń tezlik v ǵa perpendikulyar baǵıtta tarqalǵandağı jaqtılıqtıń jiyiliginiń ózgerisinen ibarat.

Eger Lorenc túrlendiriwlerin iqtıyarlı baǵıtta tarqalatuǵın tolqınǵa qollansaq, onda (7)-formulanıń ornına

$$\nu' = \nu \frac{1 - \frac{v}{c} \cos \varphi}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad (8)$$

formulası alınadı. Bul formulada φ arqalı jaqtılıqtıń tarqalıw baǵıtı menen ν tezliktiń baǵıtınıń arasındağı múyesh belgilengen (XYZ sistemasında ólshengen). Jaqtılıq tezliktiń baǵıtına perpendikulyar baǵıtta tarqalsa ($\varphi = \pi/2$), (8)-formula mınanı beredi:

Joqarıda keltirilgen tájiriybeler qaysı formulanıń haqıyqatlıqqa (salıstırmalıq teoriyasınıń yamasa klassikalıq teoriyanıń formulasınıń) jaqsıraq sáykes keletuǵınlıǵın tekserip kóriw ushın jetkilikli dárejede dál emes. Eki teoriyanıń sezilerliktey ayırması salıstırmalıq teoriyasınıń "kóldeneń effektı" beretuǵınlıǵında, al eski teoriyada bul effekt jıq. Bul effektıń júdá kishi ekenligine baylanıslı onı eksperimentallıq baqlaw júdá qıyın. Biraq, 1938-jılı tezligi shama menen 10^8 sm/sek shamasına teń kanallıq vodorod nurlandırgán jaqtılıqtı baqlawdıń barısında kóldeneń effektı baqladı. Solay etip, salıstırmalıq teoriyasına sáykes keletuǵın Doppler effektiniń formulası tastıyıqlandı.



203-súwret.
A.A.Belopolskiydiń tájiriibesiniń
sxeması.

§ 301. Salıstırmalıq teoriyasınıń mexanikası. Joqarıda keltirilgen tallawlarımızda Nyuton mexanikasınıń nızamları invariant bolǵan Galiley túrlendiriwleriniń Lorenc túrlendiriwleriniń v/c qatnasınıń nolge umtılatuǵın jaǵdaydaǵı sheklik ańlatpası bolatuǵınlıǵın kórdik. Sonlıqtan Nyuton mexanikasınıń teńlemeleriniń de salıstırmalıq teoriyası talap etetuǵın Lorenc túrlendiriwlerine qarata invariant bolǵan bazı bir ulıwmalıq teńlemelerdiń sheklik dara jaǵday bolıp tabıladı dep oylawǵa boladı.

Eger Nyuton teńlemelerine olardı Lorenc túrlendiriwlerine qarata invariant etetuǵınday ózgerislerdi kirgizsek, onda salıstırmalıq teoriyasınıń mexanikasınıń teńlemeleriniń túrin tabıwǵa boladı.

Nyuton mexanikasınıń teńlemesin vektorlıq túrde jazamız:

$$\frac{d}{dt}(m\mathbf{v}) = \mathbf{f}. \quad (1)$$

Nyuton mexanikasında massa m di qozǵalıslı halınan ǵárezsiz bolǵan turaqlı shama dep esaplaydı. Bul boljawdıń teńlemelerdiń Lorenc túrlendiriwlerine qarata invariant bolıwı talabı menen sáykes kelmeytuǵınlıǵın kórsetiwge boladı. Salıstırmalıq teoriyasınıń mexanikasındaǵı, Nyuton mexanikasındaǵıday, qálegen izolyaciyalanǵan sistemada qozǵalıslı muǵdarınıń saqlanıw nızamınıń orınlanıwı talabı menen bir sistemadan ekinshi sistemaǵa ótkende tezliklerdi túrlendiriw nızamların esapqa alıw salıstırmalı qozǵalıslı halında bolatuǵın hár qıylı sistemalardaǵı deneniń massasınıń hár qanday bolatuǵınlıǵına alıp keledi. Bunday jaǵdayda massalardı túrlendiriw nızamı mınaday túrge iye boladı:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (2)$$

Bul teńlikte m_0 arqalı ol tınıshlıqta turǵan sistemada ólshengen massa, al m arqalı birinshi sistemaǵa salıstırǵanda v tezligi menen qozǵalatuǵın sistemada ólshengen sol massanıń mánisi belgilengen. Eger (1)-formuladaǵı m massasınıń ornına (2)-nızam boyınsha túrlenetuǵın massanı qoysaq, onda mexanikanıń teńlemeleri Lorenc túrlendiriwlerine qarata invariant boladı. Solay etip, salıstırmalıq teoriyasınıń mexanikasınıń teńlemeleri tómendegidey formaǵa iye boladı:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \mathbf{v} \right) = \mathbf{f}. \quad (3)$$

Álbette, Nyuton teńlemelerinen ózgesheliklerge iye bolǵan bul teńlemeler klassikalıq mexanikanıń beretuǵın nátiyjelerinen basqa nátiyjelerdi beriwi kerek. Tájiriybelerdegi bul nátiyjelerdi tekserip kóriw teńlemelerdiń ózlerin tekserip kóriw bolıp tabıladı.

Klassikalıq mexanikada qozǵalıstı teńlemesin mına túrde jazıwǵa da boladı: $\frac{d}{dt} \mathbf{p} = \mathbf{f}$. Bul teńlemede $\mathbf{p}$ arqalı qozǵalıstı muǵdarı belgilengen. Onı (3)-teńleme menen salıstırıp, salıstırmalıq teoriyasınıń mexanikasında qozǵalıstı muǵdarınıń ornın

$$\mathbf{p} = \frac{m_0 \mathbf{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = m \mathbf{v} \quad (4)$$

ıyeleytuǵınlıǵın kóriwge boladı.

(3)-formuladan kelip shıǵatuǵın kúsh penen tezleniwdiń arasındaǵı baylanıs kústıń baslanǵısh tezliktiń baǵıtında yamasa oǵan perpendikulyar baǵıtta tásir etetuǵınlıǵına baylanıslı hár qıylı boladı. Birinshi jaǵdaydaǵı kúsh penen tezleniwdi boylıq (f_t, w_t), al ekinshi jaǵdaydaǵını kóldeneń (f_n, w_n) dep ataydı. Boylıq kúsh ushın

$$\frac{m_0}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{3}{2}}} w_t = f_t,$$

kóldeneń kúsh ushın

$$\frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} w_n = f_n$$

túrindegi ańlatpalar alınadı. Sonlıqtan $\frac{m_0}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{3}{2}}}$ shamasına teń massanı kóldeneń, al $\frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$

shamasına teń massanı boylıq massa dep ataydı. Sońǵı formula II tomdaǵı 218-paragrafta tallanǵan kóldeneń elektr maydanındaǵı elektronlardıń qozǵalıstı ushın tekserip kórildi hám alınǵan nátiyjeler formulalıń durıslıǵın tolıq tastıyıqladı.

Salıstırmalıq teoriyasınıń oǵada áhmiyetli bolǵan nátiyjesi energiya menen massanıń arasındaǵı baylanıstıń ornatılıwı bolıp tabıladı. (3)-formulaǵa tiykarlanıp, bul qatnastı tabamız. Klassikalıq mexanikada materiallıq noqattıń kinetikalıq energiyasınıń ózgerisi usı noqatqa túsirilgen sırtqı kúshler tárepinen islengen jumısqa teń. (3)-teńleme ushın sáykes tallawlar ótkeremiz. f kúshiniń elementar jumısı dA kúsh penen usı kústıń tásirinde noqattıń orın almasırtıwı dr diń skalyar kóbeymesine teń:

$$dA = f \cdot dr.$$

Bul shama noqattıń kinetikalıq energiyasınıń ósimin beriwi kerek:

$$dA = dE_k.$$

(3)-formulanıń tiykarında

$$dE_k = dA = \frac{d}{dt} \left(\frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right) \cdot dr$$

teńliklerin alamız. Differenciallawdı orınlap

$$dE_k = \left(\frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \frac{d\mathbf{v}}{dt} + \frac{m_0 v}{c^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{3}{2}}} \frac{dv}{dt} \mathbf{v} \right) \cdot d\mathbf{r}$$

yamasa, $d\mathbf{r}/dt$ shaması $\mathbf{v}$ tezlikke teń bolǵanlıqtan,

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} \cdot d\mathbf{r} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \cdot d\mathbf{v} = v dv; \quad \frac{dv}{dt} \mathbf{v} \cdot d\mathbf{r} = dv \mathbf{v} \cdot \mathbf{v} = v^2 dv$$

teńlikleriniń orınly ekenligin esapqa alsaq, onda

$$dE_k = \frac{m_0 v}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{3}{2}}} \cdot dv$$

ańlatpasın alamız. Ekinshi tárepten, (2)-formula boyınsha

$$dm = \frac{m_0 v}{c^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{3}{2}}} \cdot dv$$

teńliginiń orınly bolatuǵınlıǵın tabamız. Sońǵı formulalardı bir biri menen salıstırıp dE_k menen dm niń arasında

$$dE_k = c^2 dm \quad (5)$$

túrindegi baylanıstır bar ekenligin tabamız. Energiyanıń ózgerisi massanıń ózgerisine proporcional eken, onıń ústine proporcionallıq koefficienti xızmetin jaqtılıqtır tezliginiń kvadrati atqaradı. Eger E energiya menen m massanıń arasında

$$E = mc^2 \quad (5a)$$

túrindegi ulıwmalıq baylanıs bolatuǵınlıǵın kóremiz.

Massa menen energiya fizika izertleytuǵın materiyanıń túrleriniń sapalıq jaqtan hár qıylı bolǵan qásiyetleriniń xarakteristikaları bolıp tabıladı. Massa materiyanıń inercialıq qásiyetlerin (Nyutonniń ekinshi nızamı) hám pútkil dúnyalıq tartısıwda kórinetuǵın qásiyetleri táriyipleydi. Energiya bolsa ózgerisi sistema tárepinen orınlanǵan jumıstı anıqlaytuǵın shama bolıp tabıladı. Salıstırmalıq teoriyasınan kelip shıǵatuǵın (5)- hám (5a) qatnaslar usı eki xarakteristikalıardıń arasında baylanıstır bar ekenligin kórsetedi: birewiniń ózgerisi ekinshisiniń ekvivalent bolǵan ózgerisine alıp keledi. Sistemaniń massasınıń ózgerisi tek sırtqı deneler menen (atomlar hám molekularlar menen) zat almasıwdıń saldarınan ǵana ózgerip qoymay, sistemaǵa energiyanı beriwdiń saldarınan da ózgeredi. Mısalı, eger sistemaǵa ΔQ jıllılıq energiyası berilse, usınıń saldarınan (5)-teńlikke sáykes onıń massası da bir waqıttır ishinde $\Delta m = \Delta Q/c^2$ shamasına úlkeyedi. Basqa misal: eger nurlanıwdıń saldarınan sistemaniń energiyası ΔE shamasına kemeyetuǵın bolsa, onda sonıń menen bir waqıtta onıń massası $\Delta m = \Delta E/c^2$ shamasına kemeyedi. Jabıq sistema ushın onıń massası saqlanadı, demek onıń tolıq energiyası da saqlanadı.

Jaqtılıqtır boslıqtaǵı tarqalıw tezligi c niń júdá úlken ekenligine baylanıslı energiyanıń ΔE shamasınıń belgili bolǵan sanlıq mánisine massanıń júdá kishi bolǵan Δm shamasına ózgerisi orın aladı. Sistemaniń energiyası bolǵan E shaması $1 \text{ dj} = 10^7 \text{ erg}$ shamasına úlkeygende onıń massası tek $\Delta m \cong 1,1 \cdot 10^{-14} \text{ g}$ shamasına ǵana úlkeyedi. Sonlıqtan denelerdiń energiyasınıń ádettegidey ózgerisinde massalarınıń ózgerisi sonshama kishi boladı hám bunday ózgerislerdi tikkeley seziw qıyın boladı. Biraq, házirgi zaman fizikası yadrolıq reakciyalarda bólinip shıǵatuǵın energiyanıń júdá úlken bolatuǵınlıǵı menen baylanıslı energiya menen massanıń arasındaǵı qatnastı tekseriw múmkinshiligine iye (369-paragraf).

Energiya menen massanıń arasındaǵı qatnastan energiya menen qozǵalıw muǵdarınıń arasındaǵı baylanıstır forması kelip shıǵadı. (5-a) ańlatpaǵa m niń ornına onıń (2)-ańlatpa boyınsha mánisin qoyıp energiya menen massanıń arasındaǵı

$$E = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} c^2 \quad (6)$$

túrindegi baylanıstı alamız. Bul teńlikti kvadratqa kóterip hám algebralıq túrlendiriwlerdi ótkergennen keyin

$$m_0^2 c^4 = E^2 - E^2 \frac{v^2}{c^2}$$

yamasa (4)-ańlatpanıń tiykarında

$$m_0^2 c^4 = E^2 - p^2 c^2 \quad (7)$$

ańlatpalarına iye bolamız.

Salıstırmalıq teoriyası fizikadaǵı basqa qálegen iri ilimiy ashılıw sıyaqlı tolıq qáliplesken hám úyrenshikli bolǵan, solardıń ishinde, mısalı, denelerdiń uzınlıǵınıń olardıń qozǵalı halınan ǵárezsizligi, massanıń ózgermeytuǵınlıǵı h.t.b. kóz-qaraslardı qaytadan qarap shıǵıwdı talap etti. Kóp sanlı burjuaziya filosoflar bul ashılıwlardı idealistik "materiya joǵaldı" h.t.b. kóz-qaraslardı tiykarlaw ushın paydalanıp keldi hám házirgi waqıtları da paydalanbaqta ...

XXVII BAP

JAQTILIQTIŇ AĞISI HÁM NURLANIW TERMODINAMIKASI

§ 302. Kórinıw funkciyası. Jaqtılıqtıń ağısı. Qanday da bir maydan arqalı waqıt birligindegi jaqtılıq tolqını tárepinen alıp ótiletuǵın energıyanı *jaqtılıq energıyasınıń ağısı* dep ataydı. Jaqtılıq energıyasınıń ağısı quwattıń ólshem birligine iye bolıp, ağıstı tolıǵı menen jutatuǵın denegе berilgen jıllılıqtıń muǵdarı boyınsha ólshewge boladı.

Tek ayırım jaǵdaylarda ǵana jaqtılıqtı shama menen bir tolqın uzınlıǵına iye dep qaraydı hám kóz tárepinen "taza" spektrallıq reń sıpatında qabil etiledi (monoxromat jaqtılıq). Kópshilik jaǵdaylarda biz kózge kórinetuǵın da, kózge kórinbeytuǵın da oblastlarǵa sáykes keletuǵın júdá hár qıylı bolǵan tolqın uzınlıqlarına iye tolqınlardıń qosındısı menen is alıp baramız. Qızdırılǵan qattı hám suyıq deneler nurlandıratuǵın aq jaqtılıqta múmkin bolǵan barlıq uzınlıqtaǵı tolqınlar qatnasadı. Bunday jaqtılıqtıń tolıq energıyalıq xarakteristikası ushın *energıyanıń tolqın uzınlıqları boyınsha tarqalıwın* kórsetiw kerek boladı. Ulıwmalıq quwatı E bolǵan jaqtılıqtıń aǵısında bazı bir λ_1 tolqın uzınlıǵınan λ_2 tolqın uzınlıǵına shekemgi tolqın uzınlıqlarınıń intervalın ayırıp alamız. Eger tolqın uzınlıqlarınıń $\lambda_2 - \lambda_1 = \Delta\lambda$ intervalın júdá kishi etip alsaq, onda usı intervalǵa sáykes keletuǵın $\Delta E_{\lambda, \lambda + \Delta\lambda}$ quwatı $\Delta\lambda$ shamasına proporcional dep esaplawǵa boladı:

$$\Delta E_{\lambda, \lambda + \Delta\lambda} = e_\lambda \cdot \Delta\lambda. \quad (1)$$

SHekte $\Delta\lambda$ shamasın sheksiz kishi dep boljaymız hám (1)-qatnastı bilayınsha jazamız:

$$\Delta E_{\lambda, \lambda + \Delta\lambda} = e_\lambda \cdot d\lambda. \quad (1a)$$

Berilgen λ tolqın uzınlıǵınıń qasında alınǵan tolqın uzınlıǵınıń bir birligine sáykes keletuǵın quwatqa teń bolǵan e_λ shamasın *energıyanıń tolqın uzınlıǵı boyınsha tarqalıwı funkciyası* dep ataydı. Bul funkciya tolqın uzınlıǵınıń funkciyası bolıp tabıladı, onıń túri nurlandıırıwshı deneniń tábiyatınan hám nurlanıw júzege kelip atırǵan sharayatlardan ǵárezli. Bazı bir dara jaǵday ushın e_λ funkciyasınıń tolqın uzınlıǵı λ niń funkciyası sıpatındaǵı ózgerisleri 204-súwrette kórsetilgen. λ_1 den λ_2 ge shekemgi shekli intervalǵa sáykes keletuǵın quwat shtrixlangan baǵananiń maydanı menen súwretlenedi. λ_1 den λ_2 ge shekemgi shekli intervalǵa sáykes keletuǵın quwatıń mánisi

$$E_{\lambda_1, \lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} e_\lambda \cdot d\lambda \quad (2)$$

intervalınıń járdeminde beriledi.

Grafikte E_{λ_1, λ_2} quwatı ABCD figurasınıń maydanı menen súwretlenedi.

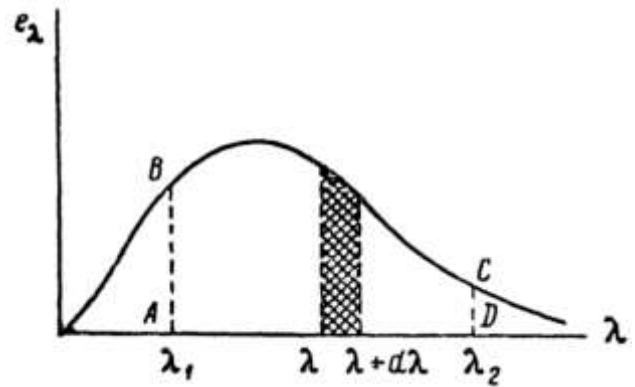
Barlıq tolqın uzınlıǵına sáykes keletuǵın tolıq ağıstı (2)-ańlatpadaǵı integraldı tolqın uzınlıqlarınıń $\lambda_1 = 0$ den $\lambda_2 = \infty$ mánisine shekemgi barlıq oblastına tarqatıw arqalı alamız:

$$E = \int_0^{\infty} e_\lambda \cdot d\lambda. \quad (2a)$$

Jaqtılıq aǵısınıń usı xarakteristikası energıyalıq kóz-qarastan tolıq bolıp tabıladı. Biraq ol jaqtılıq ağısı payda etetuǵın subektivlik sezim haqqında hesh nárseni de ayta almaydı. Seziwdiń intensivligi kózdiń anaw yamasa mınaw tolqın uzınlıǵına sezgirliginiń dárejesinen ǵárezli boladı. Quramında infraqızıl hám ultrafiolet nurlar bar, Biraq kózge kórinetuǵın nurlar bolmaǵan aǵıs usı aǵıs tárepinen alıp júřiletuǵın energıyanıń shaması júdá úlken bolǵan jaǵdayda da, hesh qanday kóriw sezimin payda etpeydi. Kerisinshe, kóz eń sezgir bolǵan nurlardan turatuǵın ağıstıń quwatı júdá kishi bolǵan jaǵdayda da intensivli túrdegi kóriw sezimin payda etedi. Adamnıń kóziniń kózge kórinetuǵın hár qıylı reńlerge bolǵan sezgirliǵı hár qıylı boladı. Mısalı, birdey intensivliktegi sezimniń payda bolıwı ushın qızıl reńge iye bolǵan nurlardıń quwatı jasıl reńdegi nurlardıń

quwatınan ádewir úlken bolıwı kerek. Sonlıqtan, jaqtılıq aǵısınıń kóriw sezimin payda etiw qábiletligin táriyipleytuǵın shamanı kirgiziw ushın kózdiń hár qıylı uzınlıqtaǵı jaqtılıq tolqınlarına bolǵan sezgirliǵın qaraw kerek boladı. Kózdiń sezgirliǵına qatnası boyınsha ádewir individuallıq awısıwlar ushırasadı. Sonlıqtan "ortasha" sezgirlikti alıwǵa tuwrı keledi. "Ortasha" sezgirlik kóp sanlı adamlardı izertlewdiń nátiyjesinde alınadı. Usı kóp sanlı adamlardıń arasına kóriw defekti bar adamlar kirmeydi. Adamnıń kóziniń usınday "ortasha" salıstırmalı sezgirliǵın táriyipleytuǵın shama *kóriniw funkciyası* dep ataladı.

204-súwret.
Nurlanıw quwatınıń tolqın uzınlıqları
boyınsha tarqalıwı.



Kóriniw funkciyasınıń grafigin dúziw ádewir qıyınshılıq penen ámelge asırıladı. Sebebi subektivlik kóz-qarastan hár qıylı reńlerdiń (mısalı qızıl hám kók) "jarıqlıǵın" anıqlaw ańsat emes (tolıǵıraq 306-paragrafta qarańız).

Házirgi waqıtları kóriniw funkciyasın dúziw ushın "basqıshlı" usıldan paydalanadı. Onıń mánisi tolqın uzınlıqları boyınsha bir birine jaqın bolǵan eki dásteniń subektivlik jarıqlıǵınıń birdey ekenliǵın anıqlawǵa alıp kelinedi.

Meyli, eki qońsılas maydan, mısalı, gúńgirt shiysheniń qońsılas bolǵan eki uchastkası, usınday eki dáste menen jaqtılandırılǵan bolsın. Tolqın uzınlıqlarınıń ayırması kishi bolǵanlıqtan jaqtılandırılǵan eki maydan derlik birdey reńge iye bolıp kórinedi. Bul eki maydannıń subektivlik jarıqlıǵınıń qanday jaǵdayda birdey bolatuǵınıń jetkilikli dárejedegi dállikte anıqlawǵa boladı. Meyli, birinshi aǵıs bazı bir belgili bolǵan λ_1 tolqın uzınlıǵınıń qasındaǵı tar bolǵan $d\lambda$ intervalǵa kiretuǵın tolqınlardan, al ekinshi tolqın bolsa shaması λ_1 tolqın uzınlıǵına jaqın bolǵan λ_2 tolqın uzınlıǵınıń qasındaǵı tar bolǵan $d\lambda$ intervalǵa kiretuǵın tolqınlardan turatuǵın bolsın. Eki aǵıstıń quwatı $dE_{\lambda_1} = e_{\lambda_1} d\lambda$ hám $dE_{\lambda_2} = e_{\lambda_2} d\lambda$ shamalarına teń. Eger kózdiń sezgirliǵı tolqın uzınlıqlarınıń ekewi λ_1 menen λ_2 ge birdey bolatuǵın bolsa, onda quwatlardıń teńliǵı $dE_{\lambda_1} = dE_{\lambda_2}$ orın alǵanda maydanlardıń ekewi de birdey jarıq bolıp kórinedi. Haqıyqatında bolsa, subektivlik jarıqlıqlardıń teń bolıwı ushın aǵıslarınıń hár qıylı bolǵan dE_{λ_1} hám dE_{λ_2} quwatların alıwǵa tuwrı keledi: kózdiń sezgirliǵı úlken bolǵan tolqın uzınlıqları ushın aǵıstıń kishi quwatın alıw jetkilikli.

Sonlıqtan, kózlerdi $\Phi(\lambda)$ kóriniw funkciyasınıń járdeminde táriyiplep, usı $\Phi(\lambda)$ kóriniw funkciyasınıń bir birine jaqın bolǵan λ_1 hám λ_2 tolqın uzınlıqları ushın san mánisiniń jarıqlıqtıń birdey sezimin beretuǵın dE_{λ_1} hám dE_{λ_2} quwatlarına keri proporcional boladı dep boljaymız:

$$\frac{\Phi(\lambda_2)}{\Phi(\lambda_1)} = \frac{dE_{\lambda_1}}{dE_{\lambda_2}}. \quad (3)$$

Bir qońsılas spektrallıq uchastkadan ekinshisine izbe-iz ótiw jolı menen kózge kórinetuǵın barlıq spektrdiń sheklerindeki kóriniw funkciyası $\Phi(\lambda)$ niń salıstırmalı mánislerin anıqlawǵa boladı. Adamnıń kóziniń sezgirliǵı tolqın uzınlıǵı 0,555 mkm bolǵan jasıl jaqtılıqqa joqarı. Bul tolqın uzınlıǵı ushın kóriniw funkciyasınıń mánisin 1 ge teń etip aladı. Bunday jaǵdayda basqa tolqınlardıń barlıǵı ushın $\Phi(\lambda) < 1$, al kózge kórinetuǵın spektrdiń shekleriniń sırtında $\Phi(\lambda) = 0$.

$\Phi(\lambda)$ kóriniv funkciyasınıń hár qıylı tolqın uzınlıqları ushın mánisleri VII keste de berilgen; $\Phi(\lambda)$ funkciyasınıń tolqın uzınlığına baylanıslı ózgerisi 205-súwrette keltirilgen (1-tutas sızıq).

Mısalı, VII kestenen birdey jaqtılandırılğanlıq sezimin beriw ushın tolqın uzınlığı 0,650 mkm bolğan qızıl nurlardıń quwatınıń tolqın uzınlığı 0,555 mkm bolğan jasıl nurdıń quwatınan derlik 10 ese úlken bolıwınıń kerek ekenligi kórinip tur.

VII keste

Kóriniv funkciyasınıń san mánisleri

mkm lardağı λ .	$\Phi(\lambda)$ kóriniv funkciyası
1,400	0,0004
0,450	0,038
0,500	0,323
0,550	0,995
0,555	1,000
0,560	0,995
0,590	0,757
0,650	0,107
0,700	0,0041
0,760	0,00006

Kóriniv funkciyasın qarap, biz jaqtılıqtı kóriw sezimin payda ete alıw qábiletligi boyınsha táriyipley alatuǵın jańa shamanı kirgize alamız. Bunday shama *jaqtılıq aǵısı* dep ataladı hám *onıń mánisi jaqtılıq energiyasınıń aǵısı menen kóriniv funkciyasınıń kóbeymesinen* turadı. λ tolqın uzınlığınıń qasındaǵı tolqın uzınlıqlarınıń júdá tar intervalı $d\lambda$ ge sáykes keletuǵın monoxromat aǵıs ushın jaqtılıq aǵısı

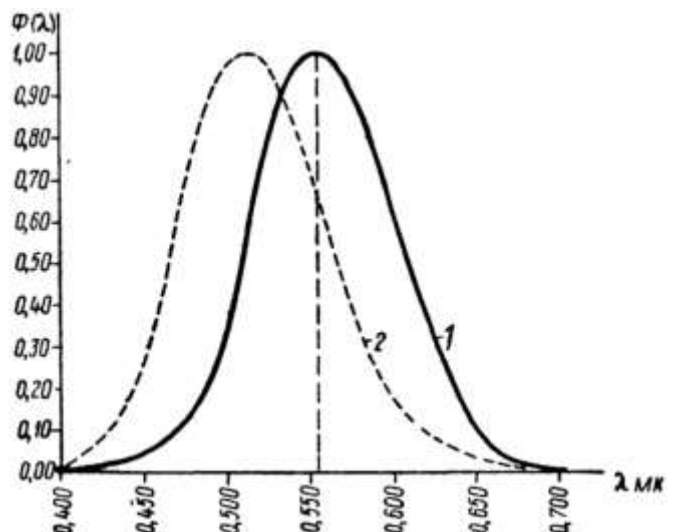
$$dF_{\lambda} = \Phi(\lambda) \cdot dE_{\lambda} = \Phi(\lambda) \cdot e_{\lambda} d\lambda \quad (4)$$

túrinde jazıladı. Nurlanıwdıń tolıq aǵısı F mınaǵan teń

$$F = \int_0^{\infty} \Phi(\lambda) \cdot e_{\lambda} d\lambda. \quad (4f)$$

Integrallaw 0 den ∞ ke shekemgi sheklerde ótkeriledi, sebebi kózge kórinetuǵın spektrge sáykes keletuǵın tolqın uzınlıqlarınıń shekleriniń sırtında $\Phi(\lambda) = 0$. F jaqtılıq aǵısı boyınsha berilgen quwatqa iye hám berilgen spektrallıq quramdaǵı jaqtılıqtıń qanday subektivlik kóriw sezimin payda etiwge qábiletli ekenligin aytıwǵa múmkinshilik beredi.

205-súwret.
Kóriniv funkciyası:
1 - kúndizgi kóriw;
2 - gewgimdlık kóriw.



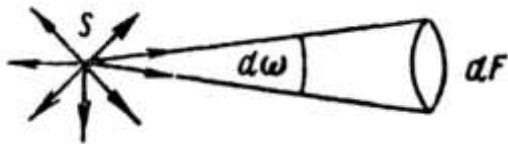
§ 303. Jaqtılıqtıń kúshi, jarqınlıq hám jaqtılandırılǵanlıq. Jaqtılıqtı barlıq táreplerge tarqatatuǵın S noqatlıq deregin qaraymız (206-súwret). Bazı bir baǵıtta sheksiz kishi $d\omega$ denelik múyeshin ayırıp alamız. Meyli, usı denelik múyeshiń sheklerinde dF jaqtılıq aǵısı tarqalatuǵın bolsın. Bunday jaǵdayda

$$I = \frac{dF}{d\omega} \quad (1)$$

shamasın derektiń berilgen baǵıttaǵı jaqtılıǵınıń kúshi dep ataydı. (1)-qatnastan jaqtılıqtıń kúshiniń bir birlik denelik múyeshke sáykes keletuǵın jaqtılıqtıń aǵısına teń ekenligi kórinip tur. Eger derek izotrop bolsa, yaǵnıy onıń jaqtılıq kúshi barlıq baǵıtlarda birdey bolsa, onda (1)-qatnastaǵı sheksiz tar denelik múyeshi Ω denelik múyeshi menen almasırwǵa boladı hám bunday jaǵdayda

$$I = \frac{F}{\Omega}$$

qatnasına iye bolamız.



206-súwret.
Sheksiz tar $d\omega$ denelik múyeshiń sheklerindegi jaqtılıq aǵısı.

Sońǵı teńlikten izolyaciyalangan derek ushın

$$F = I \cdot \Omega \quad (2)$$

teńligine iye bolamız.

(2)-teńliktegi Ω denelik múyeshin 4π ge teń dep boljap, izotrop derek tárepinen barlıq táreplerge nurlandırılatuǵın tolıq aǵıs F ti alamız:

$$F = 4\pi I. \quad (2a)$$

Izotrop emes derek ushın hár qıylı baǵıtlardaǵı jaqtılıqtıń kúshi hár qıylı. Polyar koordinatalardı kirgizgen jaǵdayda biz jaqtılıq kúshiniń polyar múyeshlerdiń funkciyası bolatuǵınlıǵın kóremiz: $I = I(i, \varphi)$.

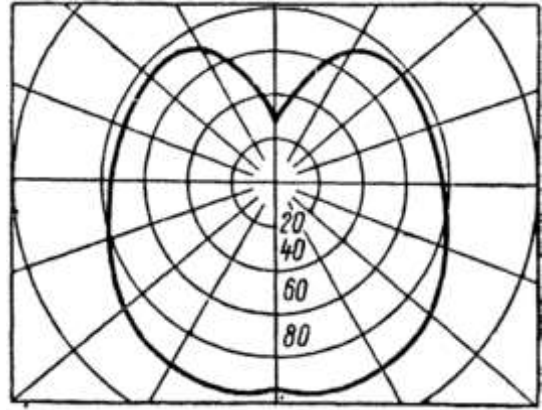
Grafikalıq túrde izotrop bolmaǵan derekti bazı bir baslanǵısh O noqatınan barlıq táreplerge qaray radius-vektorlardı júrgiziw arqalı súwretlewge boladı. Usı radius-vektorlardıń uzınlıqları hár bir berilgen baǵıtta usı baǵıttaǵı jaqtılıqtıń kúshi $I = I(i, \varphi)$ ge proporcional bolıwı kerek. Bul radius vektorlardıń ushların qorshap turatuǵın sızıq hár qıylı táreplerdegi derektiń jaqtılıq kúshi haqqındaǵı kóz-qarastı beredi. 207-súwrette ádettegeıdey elektr lampası ushın usınday vektorlıq diagramma keltirilgen.

Izotrop emes derek ushın tallawlardı ótkeriwge

$$I_0 = \frac{F}{4\pi} \quad (3)$$

qatnasınıń járdeminde anıqlanatuǵın *jaqtılıqtıń ortasha sferalıq kúshi* I_0 dep atalatuǵın shamanı kirgiziwge boladı. Bul teńlikte F arqalı derek tárepinen barlıq táreplerge nurlandırılatuǵın tolıq aǵıs belgilengen.

207-súwret.
Elektr lampasınıń jaqtılıq kúshiniń vektorlıq
diagramması.



(3)- hám (2a) teńliklerin salıstırıw izotrop derek ushın jaqtılıqtıń ortasha sferalıq kúshiniń onıń haqıyqıy jaqtılıq kúshi I ge teń ekenligin kórsetedi.

(1)-teńlik boyınsha izotrop emes derek tárepinen nurlandırılatuǵın jaqtılıq aǵısınıń sheksiz tar bolǵan denelik múyesh $d\omega$ nıń sheklerindegi mánisi mınaǵan teń:

$$dF = I(i, \varphi) \cdot d\omega. \quad (4)$$

Polyar koordinatalarda denelik múyesh $d\omega = \sin i \cdot di \cdot d\varphi$ teńliginiń járdeminde anıqlanatuǵınlıǵı belgili. Bunnan, (4)-formulanı bılayınsha kóshirip jazıwǵa boladı:

$$dF = I(i, \varphi) \cdot \sin i \cdot di \cdot d\varphi. \quad (4a)$$

Ω múyeshiniń sheklerindegi F aǵısın (4)- yamasa (4a) ańlatpasın integrallaw jolı menen alamız:

$$F = \int_{\Omega} I(i, \varphi) \cdot d\omega = \int_{\varphi} \int_i I(i, \varphi) \cdot \sin i \cdot di \cdot d\varphi.$$

Endi jaqtılıq kúshi I bolǵan izotrop noqatlıq derek tárepinen tóbesindegi múyesh α ge teń bolǵan konustıń sheklerinde shıǵarılatuǵın jaqtılıq aǵısın anıqlaymız.

Konustıń kósherin sferalıq koordinatalar sistemasınıń OZ kósheri menen sáykeslendiremiz (208-súwret). Konustıń tóbesindegi múyeshtiń shaması súwret tegisliginde jatırǵan OA hám OB jasawshılarınıń arasındaǵı múyeshke teń. Konustıń sheklerinde tarqalatuǵın jaqtılıq aǵısı F tiń mánisi (5)-integraldıń járdeminde anıqlanadı. Bul jaǵdayda turaqlı bolıp tabılatuǵın jaqtılıqtıń kúshi I di integral belgisinen sırtqa shıǵarıwǵa boladı:

$$F = I \int_{\varphi} \int_i \sin i \cdot di \cdot d\varphi.$$

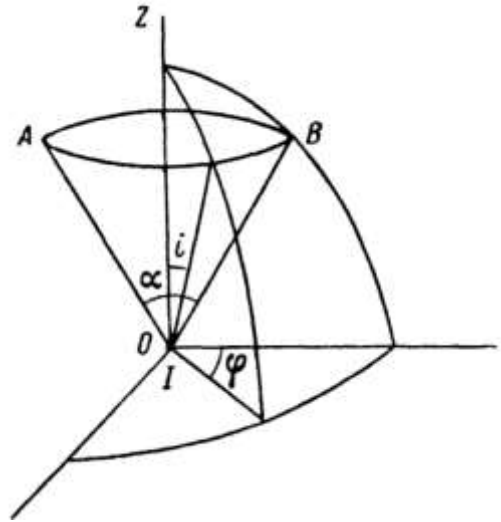
Integrallawdı φ múyeshi boyınsha 0 den 2π ge shekem, al i múyeshi boyınsha 0 den $\alpha/2$ ge shekem ózgertiwge boladı. Nátiyjede biz mınaǵan iye bolamız

$$\begin{aligned} F &= I \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\alpha}{2}} \sin i \cdot di \cdot d\varphi = 2\pi I \int_0^{\frac{\alpha}{2}} \sin i \cdot di = \\ &= 2\pi \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2}\right) I. \end{aligned} \quad (6)$$

$1 - \cos \frac{\alpha}{2}$ shamasın $2 \sin^2 \frac{\alpha}{4}$ shaması menen almasıwıp, eń aqırında

$$F = 4\pi I \sin^2 \frac{\alpha}{4} \quad (7)$$

ańlatpasın alamız.



208-súwret.

Tóbesindegi múyeshtiń shaması α ge teń bolǵan konustıń sheklerindegi jaqtılıq aǵısın esaplawǵa.

(7)-formuladan izotrop derek tárepinen barlıq táreplerge qaray tarqalatuǵın tolıq jaqtılıq aǵısı ushın (2a) ańlatpanı qaytadan alıwǵa boladı. Haqıyqatında da, (7)-ańlatpada $\alpha=2\pi$ teńligi orınlanadı dep boljap, $F = 4\pi I$ ańlatpasın alamız.

Endi jaqtılıqtıń deregi shekli ólshemlerge iye, mısalı qızdırılǵan qattı dene dep boljaymız. Onda bettiń elementi dS ti ayırıp alamız. Maydanı dS bolǵan usı uchastka tárepinen barlıq táreplerge (2π shamasına teń denelik múyeshtiń sheklerinde) tarqatılatuǵın tolıq jaqtılıq aǵısın dF arqalı belgileybiz (209-súwret).

$$R = \frac{dF}{dS} \quad (8)$$

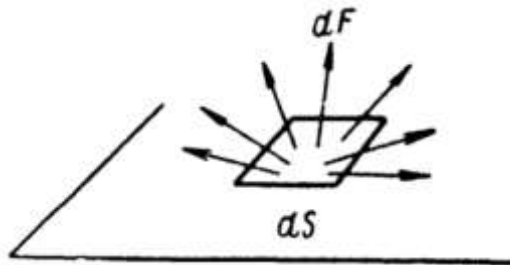
shaması dS maydanınıń *jarqınlıǵı* dep ataladı. *Jarqınlıq san mánisi boyınsha jaqtılıq shıǵarıp turǵan deneniń betiniń maydanı tárepinen shıǵarılatuǵın tolıq jaqtılıq aǵısına teń.*

Jaqtılıq aǵısı denelerden olardıń tek jaqtılıq terbelisleriniń óz betinshe deregi bolǵanlıǵı sebepli ǵana nurlandırılmaydı (qızdırılǵan deneler, fosforesciyalanıwshı deneler h.t.b.), al basqa deneler tárepinen nurlandırılǵan jaqtılıqtıń olardıń betlerinde shashırawınıń yamasa shaǵılısıwınıń saldarınan da payda boladı. Sonlıqtan, kóp sanlı máselelerdi qaraǵanda jaqtılandırılǵan deneniń anaw yamasa mınaw bólimine qansha muǵdardaǵı jaqtılıq aǵısınıń kelip túsetuǵınlıǵın da biliw kerek boladı. Onıń ushın san mánisi

$$A = \frac{dF}{dS} \quad (9)$$

shamasına teń bolǵan *jaqtılandırılǵanlıq* dep atalatuǵın fizikalıq shama kirgiziledi. Bul teńlikte dF arqalı dS maydanına kelip túsetuǵın tolıq aǵıs belgilengen (210-súwret). San mánisi jaqtılandırılǵanlıq jaqtılandırılatuǵın deneniń betiniń maydanınıń bir birligine túsetuǵın jaqtılıq aǵısına teń.

(8)- hám (9)-formulalardı salıstırıw R jarqınlıq penen A jaqtılandırılǵanlıqtıń bir dF/dS qatnası menen ańǵartılatuǵınlıǵın kórsetedi. Ayırma mınadan ibarat: jarqınlıqtıń ańlatpasındaǵı dF haqqında gáp etilgende dS maydanı tárepinen nurlandırılǵan jaqtılıq aǵısı, al jaqtılandırılǵanlıqtıń ańlatpasında bolsa - dS maydanına kelip túsetuǵın jaqtılıqtıń aǵısı názerde tutiladı.



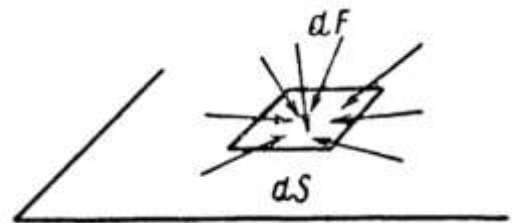
209-súwret.
 dS maydanınan tarqalatuǵın tolıq jaqtılıq aǵısı.

Álbette, óz betinshe jaqtılıq terbelisleriniń deregi bolıp tabılatuǵın deneniń jarqınlıǵı ulıwma aytqanda onıń jaqtılandırılǵanlıǵı bolıp tabılmaıdı. Kerisinshe, jaqtılıqtı shıǵaratuǵın deneniń túsiwshi nurlardıń esabınan shashırawınıń yamasa shaǵılısıwınıń esabınan júzege keletuǵın jarqınlıǵı onıń jaqtılandırılǵanlıǵı boyınsha anıqlanadı. Bunday deneniń jaqtılandırılǵanlıǵı A qanshama úlken bolsa, onda onıń jarqınlıǵı R de sonshama úlken boladı:

$$R = kA. \quad (10)$$

k shaması shashıratiw (shaǵılıstırıw) koefficienti dep ataladı. Barlıq haqıyqıy deneler ushın $k < 1$.

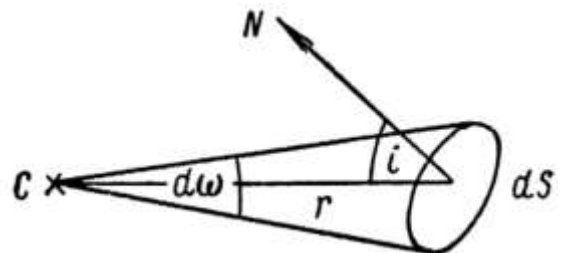
210-súwret.
 dS betiniń jaqtılandırılǵanlıǵı oǵan túsetuǵın tolıq jaqtılıq aǵısı dF boyınsha anıqlanadı.



Denelerdiń kópshiligi jaqtılıqtı selektivli túrde shashıratadı, yaǵnıy olar ushın hár qıylı tolqın uzınlıqlarında k nıń mánisleri hár qıylı boladı. Bunday deneler bizge "boyalǵan" bolıp kórinedi: eger olardıń betine aq jaqtılıq kelip túsetuǵın bolsa, onda shashıraǵan jaqtılıq óziniń quramı boyınsha aq jaqtılıqtan ózgeshe boladı hám belgili bir reń sezimin beredi. Aq dene dep k koefficienti 1 ge jetkilikli dárejede jaqın bolǵan hám kózge kórinetuǵın spektrdiń sheklerindegi barlıq tolqın uzınlıqları ushın turaqlı bolǵan denege aytadı. Al k koefficienti barlıq tolqın uzınlıqları ushın turaqlı hám 1 den kóp kishi bolǵan zat qara zat bolıp tabıladı. Magneziydiń qatlamı menen qaplangan bet yamasa jańa ǵana jawǵan qardıń beti ushın k koefficientiniń mánisi 0,9 ǵa jete aladı. Qara gúńgirt betler ushın $k \cong 0,02$.

Birdey jaqtılandırılǵanlıqta hár qıylı k shashıratiw koefficientlerine iye bolǵan deneler hár qıylı jarqınlıqqa iye boladı. Misalı, biz aq qaǵazdıń betiniń bir bólimin aq etip qaldırısaq, onda $k = 0,8$ ge teńligi orınlı boladı. Al eger usı aq qaǵazdıń betiniń ekinshi bólimin k nıń shaması 0,02 ge teń bolatuǵınday etip qara boyaw menen boyasaq, onda teń ólshemli jaqtılandırılǵanlıqta qarańǵılatılǵan bólimniń jarqınlıǵı aq bólimniń jarqınlıǵınan 40 ese kishi boladı.

211-súwret.
 C noqatlıq derekten alınatuǵın jaqtılandırılǵanlıqtı esaplawǵa.



Bul paragraftıń aqırında jaqtılıq kúshi I ge teń bolǵan noqatlıq jaqtılıq dereginiń r qashıqlıqta turǵan bette qanday jaqtılandırılǵanlıqtı payda etetuǵınlıǵın qaraymız. Meyli, C - jaqtılıqtıń

noqatlıq deregi (211-súwret), al dS - jaqtılandırılátuǵın bet bolsın. Jaqtılıqtıń C dereginen dS betiniń ortasına túsirilgen radius-vektor usı betke túsirilgen normal menen i múyeshin jasaydı dep boljaymız. C deregi turǵan orınnan dS beti kórinetuǵın denelik múyeshti $d\omega$ arqalı belgileybiz. Bunday jaǵdayda jaqtılıqtıń C dereginen maydanı dS bolǵan betke túsetuǵın aǵıs

$$dF = Id\omega$$

shamasına teń boladı. Biraq, denelik múyesh ushın

$$d\omega = \frac{dS}{r^2} \cos i$$

teńligi orınlı boladı. Bunnan

$$dF = dS \frac{I}{r^2} \cos i$$

ańlatpasına iye bolamız. Aǵıstıń shaması dF ti dS betke bólip, A jaqtılandırılǵanlıqtıń shamasın anıqlaymız:

$$A = \frac{dF}{dS} = \frac{I}{r^2} \cos i. \quad (11)$$

(11)-ańlatpadan noqatlıq derek tárepinen payda etiletuǵın jaqtılandırılǵanlıqtıń onıń jaqtılıq kúshi I ge proporcional hám sol noqatlıq derekten jaqtılandırılátuǵın betke shekemgi qashıqlıqtıń kvadratına keri proporcional ekenligi kelip shıǵadı. Usınıń menen birge, jaqtılandırılǵanlıq nurdıń betke túsıw múyeshi i den de ǵárezli: nur betke qanshama úlken qıyalıq penen túsetuǵın bolsa, onda sonshama kishi jaqtılandırılǵanlıq payda boladı.

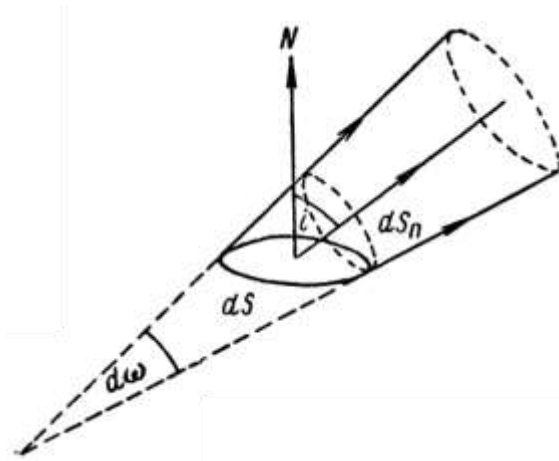
§ 304. Jarıqlıq. Bunnan aldınǵı paragrafta jarqınlıqtıń jaqtılıq shıǵarıp turǵan bettiń barlıq táreplerge nurlandırátuǵın jaqtılıq aǵısı menen anıqlanatuǵınlıǵı kórsetildi. Endi bettiń dS elementi tárepinen betke túsirilgen normal menen i múyeshin jasaytuǵın baǵıttaǵı sheksiz kishi denelik múyesh $d\omega$ nıń sheklerindegi jaqtılıq aǵısı dF ti qaraymız (212-súwret). Bul aǵıs $d\omega$ denelik múyeshine proporcional hám bettiń maydanı dS ten, múyesh i den hám bettiń qanshama ashıq jaqtılıq shıǵarıp turǵanlıǵınan ǵárezli. Aǵıstıń i múyeshinen ǵárezligin anıqlaw ushın aǵıstıń shaması dF ti dS maydanınıń kózge kórinetuǵın ólshemleri menen anıqlanadı, yaǵnıy aǵıs tarqalatuǵın baǵıtqa perpendikulyar tegisliktegi dS_n proekciyası boyınsha anıqlanadı dep boljaymız. $dS_n = dS \cos i$ teńligi orınlı bolǵanlıqtan

$$dF = B \cos i dS d\omega \quad (1)$$

teńligi orınlı boladı dep boljaymız.

B shaması jaqtılıq shıǵarıp turǵan bettiń qásiyetlerinen ǵárezli boladı hám *jarıqlıq dep ataladı*. Eger dF aǵısı dS maydanınıń kózge kórinetuǵın ólshemlerine proporcional degen boljaw durıs bolatuǵın bolsa, onda B jarıqlıq jaqtılıq shıǵarıp turǵan berilgen bet ushın i múyeshinen ǵárezli bolmaǵan turaqlı bolıwı kerek. Eger bunday bolmaǵanda dF aǵısınıń i múyeshinen ǵárezliligi (1)-teńliktegi $\cos i$ kóbeytiwshisiniń bar bolıwı menen sheklenip qoymaǵan hám B jarıqlıqtıń ózi bolsa i múyeshiniń bazı bir funkciyası bolıp tabılǵan bolar edi. Tájiriybeler kóp sanlı jaqtılıq shıǵaratuǵın deneler ushın (mısalı gedir-budır betke iye qızdırılǵan deneler ushın) dF aǵısınıń jaqınlasıwdıń jetkilikli dárejesinde $\cos i$ ǵa proporcional ekenligin hám B jarıqlıqtıń turaqlı ekenligin kórsetedi. Bunday denelerdi *kosinuslıq nurlandırıwshı deneler* dep ataydı. Ulıwma aytqanda B jarıqlıqtıń i múyeshinen ǵárezligin esapqa alıw kerek boladı, qala berse hár bir berilgen jaǵday ushın bul ǵárezlik ózine tán xarakterge iye boladı. SHashıraǵan jaqtılıqtıń esabınan jaqtılıq shıǵaratuǵın betler bolǵan jaǵdayda jarıqlıq siyrek turaqlı boladı. Tek gúńgirt bet ushın (mısalı, jiltıraq emes farfordıń, sızılma sızatuǵın qaǵazdıń, jańa ǵana jawǵan kardıń beti) juwıqlawdıń jetkilikli dárejesinde i múyeshinen ǵárezli emes. (1)-qatnas dál orınlanatuǵın shashıratıwshı betti *ideal shashıratqısh* dep ataydı. Is júzinde bar bolǵan betler ushın B jarıqlıqtıń shaması tek bettiń óziniń qásiyetlerinen ǵana emes, al túsıwshı nurdıń baǵıtınan da ǵárezli boladı. Bet qanday da muǵdarda "jiltıraytuǵın" bolsa, onda B jarıqlıqtıń shaması aynalıq shaǵılısıw

bağıtında basqa bağıtlardağıǵa salıstırǵanda úlkenirek boladı (251-paragrafta ayılǵanlar menen salıstırınız).



212-súwret.
Jarıqlıqtı anıqlawǵa.

(1)-formula jaqtılıq shıǵarıp turǵan bettiń dS elementiniń sheksiz kishi bolǵan $d\omega$ denelik múyeshtiń sheklerindegi dF aǵısın beredi. Bettiń dS elementiniń Ω denelik múyeshtiń sheklerindegi dF aǵısın (1)-ańlatpanı integrallaw jolı menen anıqlanadı:

$$dF = dS \int_{\Omega} B \cos i \, d\omega. \quad (2)$$

Eger berilgen bettiń jarıqlıǵı B turaqlı bolsa, onda onı integral belgisinen sırtqı shıǵarıwǵa boladı hám bunday jaǵdayda

$$dF = B \, dS \int_{\Omega} \cos i \, d\omega \quad (2a)$$

teńligine iye bolamız.

Bettiń jarıqlıǵı menen onıń jarqınlıǵınıń arasındaǵı baylanıstı tabamız. Onıń ushın dS maydanı tárepinen barlıq táreplerge nurlandırılatuǵın dF aǵısın qaraymız. Polıar koordinatar sistemasın kirgizemiz (213-súwret) hám onıń OZ kósherin dS betine perpendikulyar etip ótkeremiz. $d\omega$ denelik múyeshi polıar koordinatar sistemasında bılayınsha jazıladı $d\omega = \sin i \, di \, d\varphi$. Sonlıqtan dS betinen sheksiz kishi bolǵan $d\omega$ denelik múyeshiniń sheklerinde nurlanatuǵın dF aǵıs ushın ańlatpanı bılayınsha jazamız:

$$dF = B \cos i \sin i \, di \, d\varphi \, dS. \quad (3)$$

Barlıq táreplerge tarqalatuǵın tolıq dF aǵısın alıw ushın (3)-teńlikti φ múyeshi boyınsha 0 den 2π ge, al i múyeshi boyınsha 0 den $\pi/2$ ge shekemgi sheklerde integrallaymız:

$$dF = B \, dS \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{i=0}^{\pi/2} \cos i \sin i \, di \, d\varphi = 2\pi B \, dS \int_0^{\pi/2} \cos i \sin i \, di.$$

Usınıń menen birge

$$\int_0^{\pi/2} \cos i \sin i \, di = \frac{1}{2}$$

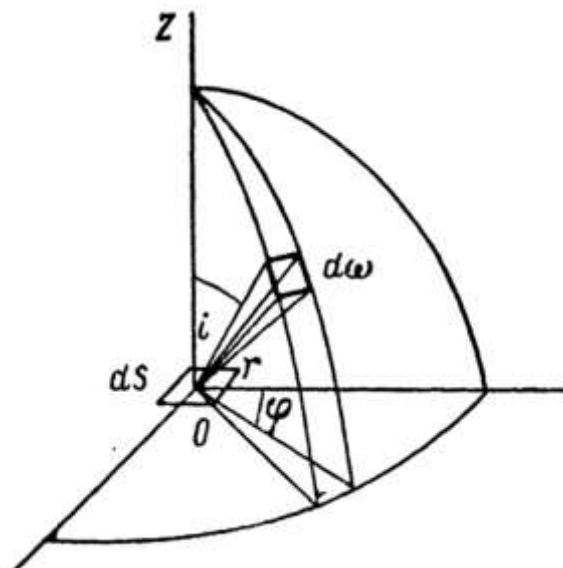
teńligi orınlı bolǵanlıqtan

$$dF = \pi B \, dS \quad (3a)$$

ańlatpasına iye bolamız.

213-súwret.

Berilgen jarıqlıqqa iye bolǵan maydannan shıqqan tolıq jaqtılıq aǵısın esaplawǵa.



303-paragrafta ayılǵanlar boyınsha tap sol bettiń jarqınlıǵı bolǵan R shaması dF/dS ke teń. Bunnan

$$R = \frac{dF}{dS} = \pi B$$

yamasa

$$B = \frac{1}{\pi} R \quad (4)$$

teńligin alamız.

Alınǵan qatnas tek kosinuslıq nurlandırawshı ushın durıs, sebebi tek sonıń ushın jarıqlıq B turaqlı hám, sonlıqtan, onı (2)-ańlatpadaǵı integraldıń aldına shıǵarıwǵa boladı. Solay etip, kosinuslıq nurlandırgısh ushın bettiń jarıqlıǵı onıń jarqınlıǵınan π ese kishi boladı.

Eger bet ózine túsetuǵın nurlanıwdıń esabınan jaqtılıq shıǵaratuǵın bolsa, onda 303-paragrafta ayılıp ótilgenindey, onıń jarqınlıǵı R onıń jaqtılandırılǵanlıǵı A arqalı

$$R = kA$$

ańlatpasınıń járdeminde anıqlanadı. Bul ańlatpada k arqalı shashıraw koefficienti belgilengen.

(4)-qatnastı paydalanıp, biz R jarqınlıqtı B jarıqlıq arqalı ańlata alamız. Bunday jaǵdayda

$$B = \frac{k}{\pi} A \quad (5)$$

formulasına iye bolamız. (5)-formulada shashıraǵan jaqtılıqtıń esabınan jaqtılıq shıǵaratuǵın bettiń jarıqlıǵınıń onıń jaqtılandırılǵanlıǵı menen shashıraw koefficientine proporcional ekenligi kórinip tur.

Endi jarqınlıq penen jaqtılıqtıń kúshiniń arasındǵı baylanıstı tabamız. Onıń ushın (1)-ańlatpanı bilayınsha qaytadan jazamız:

$$B = \frac{dF}{dS \cos i \, d\omega} \quad (6)$$

Biraq, 303-paragraftaǵı (1)-teńlik boyınsha

$$\frac{dF}{d\epsilon} = I.$$

Bul teńlikte I arqalı jaqtılıqtıń kúshi belgilengen. Bunnan

$$B = \frac{I}{dS \cos i} \quad (6a)$$

ańlatpasına iye bolamız.

Bul ańlatpadan mınaday jaǵday kelip shıǵadı: *bettiń jarıqlıǵı normal baǵıtta bettiń maydanınıń bir birliǵı tárepinen beriletuǵın jaqtılıqtıń kúshine teń* ($i = 0$).

Usı paragraftıń aqırında bettiń jarıqlıǵı B bolǵan dS elementi tárepinen onnan r qashılıǵında jaylasqan bettiń dS' elementindeki jaqtılandırılǵanlıqtı qaraymız. Meyli, r baǵıtı betlerdiń dS hám dS' elementlerine túsirilgen normallar menen i hám i' múyeshlerin jasaytuǵın bolsın (214-súwret). dS' maydanına bettiń dS elementinen shıqqan jaqtılıqtıń $d\omega$ denelik múyeshiniń sheklerindeki jaqtılıq aǵısı kelip túsedi (dS maydanında turıp qaraǵanda dS' maydanı $d\omega$ denelik múyeshiniń ishinde bolıp kórinedi). (1)-ańlatpa boyınsha bul aǵıs mınaǵan teń:

$$dF = B dS \cos i d\omega.$$

Biraq, $d\omega$ denelik múyeshi tómendegidey teńlik orınlı boladı:

$$d\omega = B \frac{dS dS' \cos i \cos i'}{r^2}$$

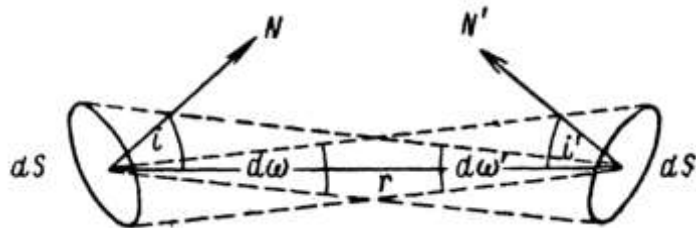
Bul soǵı ańlatpanı túrlendiriwge boladı. Onıń ushın $\frac{dS \cos i}{r^2}$ shamasınıń dS' maydanı jaylasqan orınnan ishinde dS maydanı kórinetuǵın $d\omega'$ denelik múyeshi bolıp tabıladı. Bunnan

$$dF = B dS' d\omega' \cdot \cos i'$$

formulasın alamız. dS' maydanınıń biz izlep atırǵan jaqtılandırılǵanlıǵı mınaǵan teń:

$$A' = \frac{dF}{dS'} = B d\omega' \cdot \cos i'. \quad (8)$$

Solay etip, bettiń jaqtılıq shıǵarıp turǵan elementi tárepinen payda etiletuǵın jaqtılandırılǵanlıq, usı elementtiń jarıqlıǵına hám bul element jaqtılandırılǵanlıǵı anıqlanıp atırǵan noqattan qaraǵanda kórinetuǵın denelik múyeshiniń shamasına proporcional.



214-súwret. Berilgen jarıqlıqqa iye bolǵan maydannan alınatuǵın jaqtılandırılǵanlıqtı esaplawǵa.

Bul nátiyjeni 303-paragraftaǵı (11)-formula menen salıstırıwdıń barısında mınanı kóremiz: jaqtılıq shıǵarıp turǵan bet tárepinen payda etiletuǵın jaqtılandırılǵanlıq onıń jarıqlıǵına proporcional, al jaqtılıqtıń noqatlıq dereǵı tárepinen payda etiletuǵın jaqtılandırılǵanlıq onıń jaqtılıq kúshine proporcional.

§ 305. Fotometrlik shamalardıń ólshem birlikleri. Jaqtılıq aǵısın hám jaqtılıq qubılıslarınıń sanlıq xarakteristikaların ólsheytuǵın fizikanıń bólimi *fotometriya* dep ataladı.

Tiykargı fotometrlik birlik sıpatında jaqtılıq kúshiniń birliǵı qabıl etilgen. Hár qıylı waqıtlarda bul birlik hár qıylı usıllar menen anıqlandı. Eń dáslep birlik sıpatında shamnıń jalınıń belgili bolǵan baǵıtta beretuǵın jaqtılıq kúshi qabıl etildi. SHam standartlastırıldı - onıń materialı, diametri, piliktiń uzınlıǵı kórsetildi. Bunnan keyin shamnıń jalını taza amilacetat janatuǵın belgili bolǵan konstrukciyaǵa iye lampanıń jalını menen almasırdı. Bunnan keyin plikli lampa elektr lampası menen almasırdı. Bunday jaǵdayda jaqtılıq kúshiniń birliǵı sıpatında etalon elektr lampasınıń ortasha sferalıq jaqtılıq kúshi qabıl etildi. Lampanıń konstrukciyası, ólshemleri, oǵan elektr energiyasın beriw sharayatlardı standartlastı. Metrologiyalıq mákemelerde usınday etalon lampalardıń jıynaqları saqlanıp tur hám jaqtılıqtıń kúshiniń birliǵı barlıq jıynaqtıń lampalarınıń jaqtılıq kúshiniń ortasha mánisi sıpatında tabıladı. Waqıttıń ótiwi menen lampalar ózleriniń qásiyetlerin ózǵertetuǵın bolǵanlıqtan (qartayadı), lampalardıń jınaǵı turaqlı túrde jańalanıp turǵan. Bunday jaǵdayda etalonnıń turaqlı bolıwı lampalardı bir biri menen salıstırıp kóriw jolı menen ámelge asırıladı. Usınday usıl menen anıqlanǵan jaqtılıq kúshin *xalıq aralıq sham* dep ataydı (qısqaşa x.sh.)

SSSR da házirgi waqıtları qaytadan tiklenetuǵın jaqtılıq etalonı qabıl etilgen. Bul etalon platinanıń qatıw temperaturasındaǵı (2046,6 K) absolyut qara dene túrinde soǵılǵan. Bunday

jaqtılıq etalonı Pútkil Soyuzlıq metrologiya ilim-izertlew institutınıń prof. P.M.Tixodeev tárepinen basqarılauıǵın fotometriya laboratoriyasında júzege keltirilgen. Jaqtılıqtıń kúshiniń birligi bolǵan jańa sham (sh) sıpatında joqarıda ayılǵan etalonnıń 1 sm^2 betinen normal baǵıtta nurlandırılǵan jaqtılıq kúshiniń $1/60$ bólimi qabıl etiledi. Onnan burıńǵı xalıq aralıq sham jańa shamnıń $1,005$ bólimine teń.

Qalǵan fotometrlik shamalardıń ólshem birlikleri jaqtılıqtıń kúshi menen baylanıslardıń nızamlıqları tiykarında ornatıladı.

Jaqtılıq aǵısınıń birligi 303-paragraftaǵı (1)-qatnastıń tiykarında tabıladı:

$$dF = I d\omega.$$

Jaqtılıq aǵısınıń birligi sıpatında lyumen (qısqaşa lm) qabıl etilgen. Onıń shaması jaqtılıq kúshi 1 sh bolǵan izotrop derekten 1 steradian denelik múyeshtiń sheklerindegi jaqtılıqtıń aǵısına teń.

Lyumenniń usı jaqtılıq etalonınıń járdeminde tikkeley anıqlanıwı da múmkin. Atap aytqanda: lyumen betiniń maydanı $5,305 \cdot 10^{-3} \text{ sm}^2$ bolǵan platinanıń qatıw temperaturasındaǵı absolyut qara dene tárepinen shıǵarılauıǵın jaqtılıqtıń aǵısına teń.

303-paragraftaǵı (2a) formula boyınsha jaqtılıq kúshi 1 sh bolǵan izotrop derek tárepinen nurlandırılauıǵın tolıq aǵıs mınaǵan teń:

$$F = 4\pi I = 3\pi \text{ lm} \cong 12,566 \text{ lm}.$$

Jaqtılandırılǵanlıqtıń birligi 303-paragraftaǵı (9)-formulanıń tiykarında tabıladı:

$$A = \frac{dF}{dS}.$$

Jaqtılandırılǵanlıqtıń birligi sıpatında 1 sm^2 maydanda bir tekli tarqalǵan 1 lm aǵısqa teń *fot* (qısqaşa *f*) qabıl etilgen. Fot penen bir qatarda jaqtılandırılǵanlıqtıń basqa birligi *lyuks* (qısqaşa *lk*) qollanıladı. Onıń shaması 1 lm aǵıs tárepinen 1 m^2 maydanda teń ólshewli tarqalǵan aǵıs tárepinen payda etilgen jaqtılandırılǵanlıqqa teń. Kórinip turǵanınday, lyuks penen fottıń arasında mınaday qatnas bar:

$$1 \text{ lyuks} = 10^{-4} \text{ fot}. \quad (1)$$

$R = dF/dS$ qatnasınıń járdeminde anıqlanatuǵın jarıqlıq ta fotlarda ólshenedi.

Stilb (qısqaşa *sb*) dep atalatuǵın jarıqlıqtıń ólshem birligin anıqlaw ushın 304-paragraftaǵı (6a) qatnasınan paydalanamız:

$$B = \frac{I}{dS \cdot \cos i}.$$

Usı qatnastıń tiykarında stilbtıń maydanı 1 sm^2 bolǵan tegis betten teń ólshemli túrde kúshi 1 sh ǵa teń jaqtılıqtıń normal baǵıtta ($i = 0$) beretuǵın jarıqlıqqa teń ekenligin kóremiz.

SHashıraǵan jaqtılıqtıń esabınan payda bolatuǵın betlerdiń jarıqlıǵın ólshew ushın geypara jaǵdaylarda *apostilb* dep atalatuǵın basqa birlik paydalanıladı. Apostilb jaqtılandırılǵanlıǵı 1 lk shamasına teń ideal túrdegi shashıratıwshı bettiń jarıqlıǵına teń. Ideal aq (yamasa absolyut aq) bet dep barlıq tolqın uzınlıqları hám barlıq tolqın uzınlıqları ushın $k = 1$ koefficientine iye bolǵan betke aytadı.

304-paragraftaǵı (5)-formula boyınsha shashıraǵan jaqtılıqtıń esabınan jaqtılıq shıǵaratuǵın bettiń jarıqlıǵınıń

$$B = \frac{k}{\pi} A$$

shamasına teń. Bul teńlikte A - jaqtılandırılǵanlıq. A nı fotlarda, B nı stilblerde ólshep hám $1/\pi$ diń shama menen $0,318$ ge teń ekenligin esapqa alıp, mınanı alamız:

$$B (\text{stilb}) = 0,318 kA (\text{fot}).$$

Bunnan, túsiwshi nur betinde $1 \text{ lyuks} = 10^{-4} \text{ fot}$ jaqtılandırılǵanlıqtı payda etetuǵın ideal aq bettiń ($k = 1$) jarıqlıǵınıń

$$B = 0,318 \cdot 10^{-4} \text{ sb} = 3,18 \cdot 10^{-5} \text{ sb}$$

shamasına teń ekenligin alamız.

Bul jarıqlıq 1 apostilbke teń dep qabıl etiletuǵın bolǵanlıqtan,

$$1 \text{ apostilb} = 3,18 \cdot 10^{-5} \text{ stilb}$$

teńligine iye bolamız.

Joqarıda keltirilgen jaqtılıq kúshi, jaqtılandırılğanlıq hám jariqlıq penen bir qatarda olarğa uqsas bolğan energiyalıq shamalardı qarawğa da boladı. Olardı tap sol qatnaslardıń járdeminde jaqtılıqtıń aǵısın energiyalıq aǵıs E menen almastırıwdıń járdeminde alınadı. Bul shamalardı absolyut ólshemde ólshewge boladı. Mısalı, energiyalıq jaqtılandırılğanlıqtı (erg/sek) $\cdot \text{sm}^2$ yamasa vt/sm^2 h.t.b. ólshew múmkin. VIII kesteде tiykarǵı fotometrlik hám energiyalıq shamalar jáne olardıń ólshem birlikleri keltirilgen.

Jiyi ushırasatuǵın jaǵdaylar ushın jaqtılandırılğanlıqlar menen jariqlıqlardıń juwıq túrde alınan mánislerin IX kesteде kóriwge boladı.

1 lm shamasına teń jaqtılıq aǵısına jaqtılıqtıń spektrallıq quramınıń qanday bolıwına baylanıslı hár qıylı aǵıslar sáykes keledi. Biraq, eger gáp spektrallıq quramı belgili bolğan jaqtılıq haqqında aytilatuǵın bolsa, onda 1 lm shamasına teń aǵısqa mánisi belgili bolğan quwat sáykes keledi hám, solay etip, fotometrlik hám energiyalıq birliklerdiń arasındaǵı baylanıstı qurıwğa boladı. $\lambda = 0,555$ mkm tolqın uzınlıǵınıń, yaǵnıy adamnıń kóziniń sezgirliǵı maksimal bolğan jaǵdayǵa sáykes keletuǵın tolqın uzınlıǵınıń qasına tiyisli tar intarvalǵa kiretuǵın jaqtılıqtı qaraw qabıl etilgen. Bul oblastta 1 lm aǵısqa 0,00155 vt quwat sáykes keledi:

$$1 \text{ lyumen} (1 = 0,555 \text{ mk}) = 0,00155 \text{ watt.} \quad (2)$$

Basqa qálegen spektrallıq quramǵa 1 lm jaqtılıq aǵısına úlken quwat sáykes keledi. Sonlıqtan 0,00155 vt/lm shaması *jaqtılıqtıń minimallıq mexanikalıq ekvivalenti* atamasına iye.

VIII keste.

SHama	Ólshem birlikleri	
	fotometrlik	energiyalıq
Jaqtılıq aǵısı F, E	lyumen	erg/sek; vt
Tarqalıw funkciyası e_λ	-	erg/(sek·sm); vt/sm
Jaqtılıq kúshi I	xalıq aralıq sham	erg/(sek·str); vt/str
Jaqtılandırılğanlıq A	fot, lyuks	erg/(sek·sm ²); vt/sm ²
Jarqınlıq R	fot	erg/(sek·sm ²); vt/sm ²
Jariqlıq B	stilb	erg/(sek·str·sm ²); vt/(str·sm ²)

IX keste

Jaqtılandırılğanlıq	Lyuksler	Jariqlıq	Stilbler
Quyashtıń nurlarınıń tuwrı astında (jazda).	10^5	Quyashtıń atmosfera arqalı.	$1,47 \cdot 10^5$
Kúndiz, Quyashtıń bolmaǵandaǵı ashıq orında.	$\sim 10^3$	Elektr doǵasınıń krateriniń.	$1,5 \cdot 10^4$
Kúndiz ójireniń ishinde.	$\sim 10^2$	Gaz benen toltırılğan volfram sımınıń.	$4,5 \cdot 10^2$
Oqıw ushın zárúrli bolğan.	$3 \cdot 10^1$	75 ⁰ taǵı ashıq aspandaǵı Quyashtan.	$1,5 \cdot 10^{-1}$
Mayda jumıslardı orınlaw ushın zárúrli bolğan.	10^2	Atmosfera arqalı Aydıń betiniń.	$2,5 \cdot 10^{-1}$
Tolıq Ayda.	$2,5 \cdot 10^{-2}$	Quyashtıń nurı tuwrı túsip turǵan aq bettiń.	3

8-shamadağı juldızdan.	$1,4 \cdot 10^{-9}$	30 lk bolğan jaǵdaydaǵı aq bettiń.	10^{-3}

(2)-qatnastan

$$1 \text{ vatt } (\lambda = 0,555 \text{ mkm}) = 650 \text{ lyumen} \quad (3)$$

teńliginiń orınlı ekenligin kóremiz. Qálegen tolqın uzınlıǵına teń bolğan monoxromat jaqtılıq ushın mınaday qatnas orınlı:

$$1 \text{ vatt } (\lambda) = 650 \cdot \Phi(\lambda) \text{ lyumen.} \quad (3a)$$

Bul teńlikte $\Phi(\lambda)$ arqalı sol tolqın uzınlıǵı ushın kórinıw funkciyasınıń mánisi belgilengen.

Tómendegidey mısaldı qaraymız.

Bettiń ústinde $h = 4 \text{ m}$ biyiklikte jaqtılıq kúshi $I = 100 \text{ sh}$ bolğan noqatlıq izotrop derek jaylastırılǵan. Tegisliktiń betinde h kesindisiniń tómengi bóliminen x qashıqlıǵında jaylasqan C noqatıdaǵı jaqtılandırılǵanlıqtı tabıw kerek (215-súwret).

Sheshimi. 303-paragraftaǵı (11)-formula boyınsha C noqatıdaǵı jaqtılandırılǵanlıqtıń shaması mınaǵan teń:

$$A = \frac{I \cos i}{r^2}. \quad (4)$$

Bul teńlikte r arqalı derekten C noqatına shekemgi qashıqlıq belgilengen. Sızılmadan

$$r = \sqrt{x^2 + h^2}, \quad \cos i = \frac{h}{r} = \frac{h}{\sqrt{x^2 + h^2}}$$

teńlikleriniń orınlı ekenligin kóremiz. Bunnan keyin (4)-formula mınaday túrge enedi:

$$A = \frac{I h}{(x^2 + h^2)^{3/2}}. \quad (5)$$

I di xalıq aralıq shamlarda, h penen x tı metrlerde ańǵartıp, A nı lyukslerde alamız. Jaqtılıqtıń dereginıń astında ($x = 0$):

$$A = \frac{100}{16} \text{ lk} = 6,2 \text{ lk}.$$

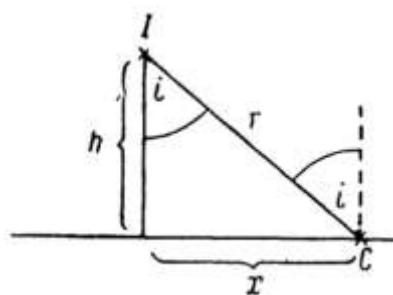
$x \gg h$ bolğan jaǵdaylarda (5)-formuladaǵı h tı x qa salıstırǵanda esapqa almawǵa boladı hám bunday jaǵdayda

$$A \cong \frac{I h}{x^3}$$

teńligine iye bolamız.

215-súwret.

I noqatlıq deregi beretuǵın jaqtılandırılǵanlıqtı esaplawǵa.

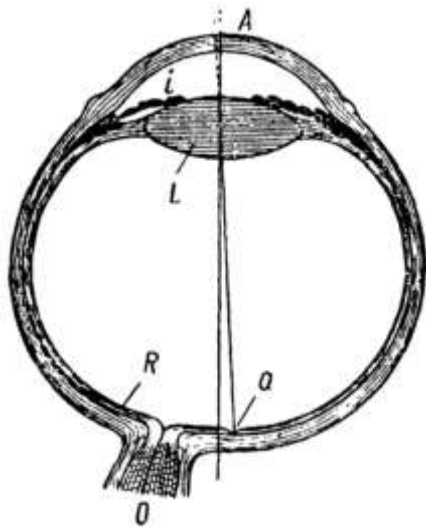


Joqarıda keltirilgen mısaldı jaqtılıq kúshi 100 sh bolğan noqatlıq derekten bir neshe metr qashıqlıqtaǵı jaqtılandırılǵanlıq kitap oqıw ushın zárúrli bolğan jaqtılandırılǵanlıqtan kishi ekenligi kórinip tur (30 lk). Biraq, eger ójirede 100 sh lampa bar bolatuǵın bolsa, onnan bir neshe metr qashıqlıqta kitaptı oqıwǵa bolatuǵınlıǵın hámmege málim. Másele sonnan ibarat, ójireniń ishinde jaqtılıqtıń diwallardaǵı, tóbedegi, polda kóp qaytara shaǵılıswı orın aladı. Al bul jaǵday jaqtılandırılǵanlıqtıń úlkeyiwine alıp keledi (307-paragraf penen salıstırıńız).

§ 306. Jaqtılıqtı qabıllaw. Fotometrlik shamalardı ólshew vizuallıq túrde (vizuallıq fotometriya) yamasa anaw yamasa mınaw qabıl etetuǵın apparaturanıń járdeminde ámelge

asırıladi (*obektivlik fotometriya*). Sonlıqtan eń dáslep jaqtılıqtı qabıl etetuǵın apparat sıpatında kóz benen, sonıń menen birge jaqtılıqtı qabıllaw ushın xızmet etetuǵın basqa da obektivlik apparatlar menen tanısıw zárúr.

Subektivlik vizuallıq sezim kózdiń tor tárizli qabıǵın jaqtılandırıwdıń nátiyjesinde payda bolatuǵın kóriw nerviniń titirkeniwiniń nátiyjesinde payda boladı. Adamnıń kóziniń kesimi 216-súwrette keltirilgen. Bul súwrette *A* - móldir qabıq, *L* — xrustalik, *i* — radugalıq yamasa irislik qabıq, *R* - torlı qabıq, *O* - kóriw nervi. Móldir qabıq penen xrustaliktıń arasındaǵı keńislik suyıqlıq penen, al xrustalik penen tor tárizli qabıqtıń arasındaǵı keńislik shiyshe tárizli dene dep atalatuǵın dene menen toltırılǵan. Radugalıq qabıq qarashıq dep atalatuǵın tesikke iye. Qarashıqtıń ólshemleri ózgeredi hám sonıń saldarınan kózdiń ishine kelip túsetuǵın jaqtılıq aǵısınıń shamasın retleydi.



216-súwret.
Adamnıń kóziniń kesimi.

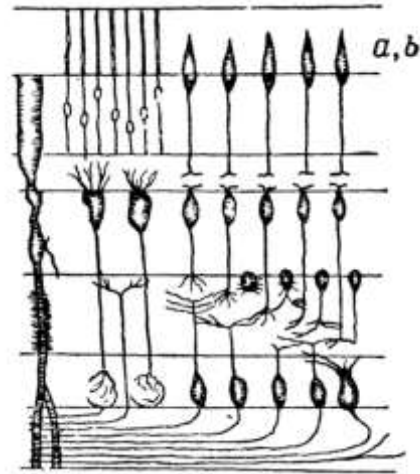
Júdá quramalı qurılısqa iye bolǵan torlı qabıq kóriw nervi talshıqlarınıń tarmaqlanıwı bolıp tabıladı. Tóimde qarap óiletuǵın (326-paragraf) kózdiń optikalıq sisteması torlı qabıqta kózden sırtta jaylasqan predmetlerdiń haqıyqıy súwretin beredi. Kóriw seziminiń intensivligi torlı qabıqta kózge túsetuǵın jaqtılıq aǵısı payda etetuǵın jaqtılandırılıw boyınsha anıqlanadı. Torlı qabıqtıń sxema túrindegi kesimi 217-súwrette keltirilgen.

Tayaqshalar yamasa kolbalar (a, b) dep atalatuǵın elementler kózdiń jaqtılıqtı sezetuǵın elementleri bolıp tabıladı. Adamnıń kózindegi kolbalarlıń sanı 7 mln ǵa, al tayaqshalardıń sanı 100 mln ǵa jetedi. Torlı qabıqtıń periferiyalıq bólimi tek tayaqshalarǵa iye. Kolbalar bolsa tiykarınan torlı qabıqtıń oraylıq bóliminde jaylasqan. Kóriw nervinen azmaz bir tárepte *oraylıq oyıqlıqqa iye bolǵan sarı daq* jaylasadı (216-súwrettegi *a*). Oraylıq oyıq oblastında tek kolbalar jaylasadı. Kózge kóriw nervi kiretuǵın orın jaqtılıqtı qabıl etpeydi (qarańǵı daq).

Kóriw sezimi payda bolǵanda tayaqshalar menen kolbalar hár qıylı orındı iyeleydi. Tayaqlardıń sezgirliǵi kolbalarlıń sezgirligine salıstırǵanda ádewir joqarı, Biraq olar reńlerdi ayırıw múmkinshiligin bermeydi. Reńdi seziw kolbalarlıń titirkeniwiniń saldarınan júzege keledi. Usınıń menen bir qatarda setchatkanıń kolbalar menen tolǵan oblastları tayaqshalar menen tolǵan oblastına salıstırǵanda ádewir kóp sanlı detallardı ayırıwǵa múmkinshilik beredi. Usıǵan sáykes, adam hár qıylı bolǵan eki kóriwge iye boladı. Kolbalarlıń titirkeniwi menen baylanıslı bolǵan olardıń biri jetkilikli úlken bolǵan jaqtılandırılarda háreket etedi, ol reńlerdi ajratıwǵa hám kóp sanlı detallardı bir birinen ajratıp kóriwge múmkinshilik beredi. Bul kóriwdi *kúndizgi kóriw* dep ataydı. Ekinshisi tayaqshalardıń titirkeniwi menen baylanıslı bolıp, ona *gewgimdegi kóriw* dep ataydı. Tayaqshalar torlı qabıqtıń periferiyasında jaylasqan bolǵanlıqtan, onı *periferiyalıq kóriw*

dep te ataydı. Ádette eki kóriw de qanday da bir dárejede bir waqıtta háreket etedi, Biraq jaqtılandırılǵanlıq kishi bolǵan jaǵdayda tek gewgimdegi kóriw ǵana hárekette boladı.

217-súwret.
Kózdiń torlı qabıǵınıń kesimi.



Úlken jaqtılandırıwlardan kishi jaqtılandırıwǵa ótkende tayaqshalar dárhál maksimallıq seziwge ótpeydi, usınıń saldarınan kúndizgi kóriwden gewgimdegi kóriwge ótiw salıstırmalı ástelik penen júzege keledi. Kúndiz kósheden jaman jaqtılandırılǵan imaratqa kirip kelgende dáslep hesh nárseniń kórinbey qalatuǵınlıǵı hámmege málim. Tek ástelik penen, kózdiń "úyreniwi" menen hár qıylı predmetlerdi bir birinen ajratıp kóriw qábiletligi payda boladı. Gewgimlik kóriwdiń iske túsiw processin *adaptaciya* dep ataydı. Toliq adaptaciya ushın kózlerdi qarańǵıda 30-40 min uslap turıw kerek. Toliq adaptaciyalangan kózdiń sezgirliǵı júdá úlken: ol energiyası shama menen $4 \cdot 10^{-10} \text{ erg/sek}$ bolǵan jaqtılıqtı seze aladı²¹. Jasıl reńli nurlar ushın bul qarashıqtaǵı shama menen $5 \cdot 10^{-10}$ lk jaqtılandırıwǵa sáykes keledi. Kóriw sezimin payda ete alatuǵın minimallıq jaqtılıq aǵısı *kóriniw shegi* dep ataladı. Álbette adaptaciyalangan kóz ushın kóriniw shegi haqqında gáp etiw kerek. Kúndizgi kóriwde kóz 200 erg/sek aǵıstı da qabıl ete aladı. Úlken quwatlarda awır sezimler payda boladı hám torlıq qabıqtıń zaqımlanıwı múmkin. Zaqımlanıw kishi aǵıslardan úlken aǵıslarǵa júdá tez ótiwdiń saldarınan da payda bola aladı. Bunday jaǵdayda ulıwma aytqanda úlken quwattıń mánisi kózdiń awırmay qabıl ete alatuǵın quwattıń sheginen úlken bolmaydı.

Kóriwdiń shekli múyeshi menen kórinetuǵın predmetlerdiń subektivlik jarıqlıǵınıń olardıń fotometrlik jarıqlıǵı menen baylanıslı ekenligin biz keyinirek kóremiz (327-paragraf).

Gewgimdegi kóriwde hár qıylı uzınlıqlardaǵı jaqtılıq sók-sur reńdegi birdey sezimdi payda etedi. Hár qıylı tolqın uzınlıqları ushın gewgimlik kóriwdiń sezgirliǵı hár qıylı boladı. Gewgimlik kóriwdi kúndizgi kóriwdiń kóriniw funkciyasınan basqa kóriniw funkciyası menen táriyiplewge boladı. Usınday gewgimlik kóriw ushın kóriniw funkciyası 205-súwrettegi 2-punktirlik iymeklik penen súwretlengen. 2-iymekliktiń maksimumı kúndizgi kóriwdiń kóriniw funkciyasın beretuǵın 1-iymeklikke salıstırǵanda qısqaqarq tolqınlar oblastına qaray jılısqan; ol $0,510 \text{ mkm}$ tolqın uzınlıǵınıń qasında jatadı.

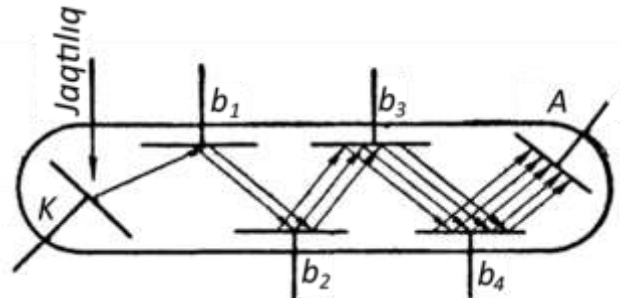
Kóriwdiń joqarıda keltirilgen ózgeshelikleri kózdi fotometrlik ólshewlerde qabıl etetuǵın apparat sıpatında paydalanǵanda júdá áhmiyetli.

Kúndizgi kóriwden gewgimlik kóriwge ótiwdi hám onıń ózine tán ózgesheliklerin demonstraciyalawdı salıstırmalı jeńil ámelge asırıwǵa boladı. Onıń ushın tolıq qarańǵılatılǵan ójirede proekciyalıq fonardıń

²¹ Demek, adamnıń kózinde kóriw seziminiń payda bolıwı ushın kózge 1 sek waqıttıń ishinde hár biriniń energiyası $2,48 \text{ eV} = 3,97 \cdot 10^{-12} \text{ erg}$ bolǵan (bul kóz sezgir bolǵan jasıl-sarı jaqtılıqqa sáykes keledi) júz fotonnıń kelip túsiwi kerek (Awdarıwshılar).

járdeminde ekranga hár qıylı reńge iye bolǵan (mısalı, birewi qızıl, ekinshisi kók) eki yarım dóńgelek proekciyalanadı. Bul yarım dóńgeleklerdiń reńlerin olardı birdey jarıq bolıp kórinetuǵınday etip saylap alınadı. Bunnan keyin jaqtılıq aǵısın ástelik penen hásizlendiriw kerek, usınıń járdeminde reńli súwrettiń ekewi de payda boladı. Bunu fonardıń obektiviniń qasındaǵı dásteler bir birinen ele ajıraspaǵan orında eki nikoldi qoyıw jolı menen ámelge asırıwǵa boladı. Nikollerdiń "parallel" haldan "atanaq" halǵa izbe-iz ótiwinde qızıl hám kók súwretlerdi payda etetuǵın aǵıslardıń quwatı birdey shamaǵa hásireydi. Biraq júdá kishi bolǵan jaqtılandırıwda kók yarım dóńgelek qızıl yarım dóńgelekten jarıǵıraq bolıp kórinedi. Aǵıslardı hásiretiwdi bunnan bılay dawam etkende qızıl reńli yarım dóńgelek kók reńli yarım dóńgelekten burın sónedi, sonıń menen birge kók reńli yarım dóńgelek óziniń reńin ózgerterdi hám surlaw bolıp kórinedi. Bul tájiriye bir gewgimlik kóriwdiń tásirinde reńlik sezimniń joǵalıwın hám gewgimlik kóriwdiń qızıl reńge salıstırǵanda kók reńge sezgirliginiń joqarı bolatuǵınlıǵın ayqın túrde kórsetedi.

218-súwret.
Fotoelektrlik kóbeytkish.



Obektiv túrdegi qabıl etetuǵın apparatlardan biz mınaday principlerde isleytuǵınların atap ótemiz: fotoelektrlik, termoelektrlik, fotografiyalıq hám jıllılıq.

Fotoelektrlik qubılıslar principinde isleytuǵın apparatlardı *fotoelementler* dep ataydı (333-paragraf). Vakuumlıq hám qattı fotoelementler bar. Fotoelement qosılǵan shıńırǵa túsiwshi jaqtılıqtıń tásirinde elektr toǵı payda boladı. Payda bolǵan toqtıń kúshi fotoelementke túsetuǵın *jaqtılıq aǵısı* boyınsha anıqlanadı. Vakuumlıq fotoelementler ushın toqtıń kúshi menen jaqtılıqtıń quwatınıń arasında tuwrı proporcionallıq orın aladı (berilgen tolqın uzınlıǵında). Qattı fotoelementler ushın tuwrı proporcionallıq orın almaydı. Sonıń menen birge olar vakuumlıq fotoelementlerge salıstırǵanda kemirek turaqlılıqqa iye. Fotoelementler kúshli kórinetuǵın selektivlikke iye: olardıń hár qıylı tolqın uzınlıqlarına bolǵan sezgirliǵi hár qıylı. Sezgirlik iymekligi jaqtılıqtı sezgish qatlardıń tábiyatınan ǵárezli hám hár qıylı qatlamlar ushın pútkilley hár qıylı boladı. Barlıq fotoelementlerdiń sezgirliǵi úlken tolqın uzınlıqları tárepinen sheklengen. Beti taza ceziyden turatuǵın vakuumlıq fotoelement $\lambda = 0,63$ mkm ge shekemgi jaqtılıqtı sezedi, kislorodli-ceziyli katodqa iye fotoelementler $\lambda = 1,2$ mkm, qattı tallofidlik fotoelementler $\lambda = 1,4$ mkm, al selenlik-qorǵasınlı hám tellurli-qorǵasınlı katodqa iye fotoelementler $\lambda = 5,5$ mkm tolqın uzınlıǵına shekemgi jaqtılıqtı sezedi.

Fotoelementler is júzinde inerciyaǵa iye emes hám sonlıqtan júdá qısqa bolǵan jaqtılıq impulslerin hám jaqtılıq aǵısınıń waqtqa baylanıslı ózgerislerin registraciyalaw ushın qullanıladı.

Fotoelementlerdiń sezgirliǵi júdá joqarı hám 1 lyumende 100 mikroamperge jetedi. Al qattı fotoelementler bolsa 500 mka/lm shamasına jetetuǵın onnan da joqarı sezgirlikke iye.

Fotoelektrlik ásbaplardıń sezgirliǵın joqarılatıw ushın házirgi waqıtları elektronlıq lampalarǵa iye bolǵan kúsheytiwshi sxemalar qullanıladı²². Fototoqtı kúsheytiw ushın birinshi ret G.A.Kubeckiy tárepinen usınılǵan ekinshi elektronlıq emissiya qubılısına tiykarlanǵan princip qullanıladı (II tom, 173-paragraf). Usı principte soǵılǵan fotoelektrlik kóbeytkishtiń (FEK) sxeması 218-súwrette kórsetilgen. Bul sxemada *K* - jaqtılıqtı sezgish katod, onnan túsiwshi jaqtılıqtıń tásirinde fotoelektronlar ushın shıǵarıladı. Bul elektronlar túsirilgen elektr maydanınıń tásirinde *b₁* elektrodına qaray tezletiledi. Ekinshi elektronlıq emissianıń saldarınan *b₁* elektrodınan oǵan kelip túsken elektronlardıń sanınan kóp sandaǵı elektronlar

²² Házirgi waqıtları elektronlıq lampalarǵa iye bolǵan kúsheytikishler pútkilley qullanılmaydı.

ushıp shıǵadı. Payda bolǵan elektronlar b_2 elektrodına qaray qaytadan tezletiledi hám bul elektrodta onnan da kóp sanlı elektronlar shıǵarıladı h.t.b. Aqırǵı esapta A anodına K katodınan uship shıqqan elektronlarǵa salıstırǵanda ádewir kóp sanlı elektronlar jetip baradı hám FEK tutastırılǵan shıńjırda ólshew ańsat bolǵan jetkilikli dárejede kúshli toq payda boladı. Házirgi waqıtlardaǵı FEK lerdiń sezgirliǵı hár lyumenge bir neshe amperge jetedi.

Termoelektrik ásbaplar II tomnıń 170-paragraftında táriyiplendi. Olarda elektr toǵı elektr toǵı dánekerlengen orınlardıń qızıwınıń esabınan payda boladı hám keń sheklerde nurlanıwdıń quwatına proporcional. Sonıń menen birge dánekerlengen orınlardı qaraǵa jaqsılap boyalǵanda termoelektrik ásbaplar selektivlikke iye bolmaydı hám principinde qálegen tolqın uzınlıqlarınıń aǵısların ólshew ushın jaramlı. Fotoelementlerge salıstırǵanda termoelektrik ásbaplar sezilerliktey inerciyaǵa iye boladı.

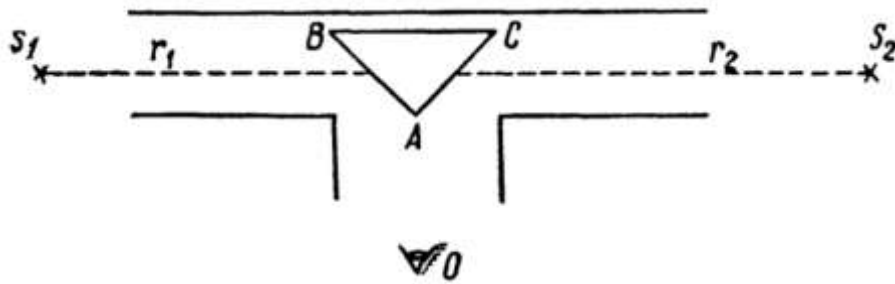
Fotografiyalıq plastinka da jaqtılıq aǵısların registraciyalıw hám ólshew ushın keń túrde paydalanıladı. Fotografiyalıq plastinkanıń qarawıtıwı jaqtılandırılǵanlıq boyınsha anıqlanadı. Biraq bir aǵıstıń qanday maydanǵa tarqalǵanlıǵına baylanıslı pútkilley hár qıylı qarawıtıwdı beriwı múmkin. Fotoplastinka integrallawshı qásiyetke de iye boladı; jaqtılandırıw waqtınıń úlkeyiwı qarwıtıwdıń úlkeyiwine alıp keledi. Bul fotoplastinkanıń járdeminde júdá kishi bolǵan quwattı tabıwǵa múmkinshilik beredi (eger olar jetkilikli dárejede uzaq waqt tásir ete alatuǵın bolsa). Házirgi zaman fotografiyalıq usılları júdá kishi bolǵan tolqın uzınlıqlarınan shama menen 1,2 mkm ǵa shekemgi tolqın uzınlıqların registraciyalaw ushın qollanıladı.

Jıllılıq usılları túsken jaqtılıq aǵısın jutiwdıń tásirinde qızıwdıń saldarınan payda bolatuǵın ekinshi qubılıslarǵa tiykarlanǵan. Sońǵı waqıtları bul usıllar sovet fizikleri tárepinen tabıslı islep shıǵılmaqta.

M.L.Veyngerov denelerdiń jıllılıq keńeyiw boyınsha nurlanıwdı registraciyalawdıń usılın islep shıqtı. Balqıtılǵan kvarctıń júdá juqa plenkasına metall vismuttıń qarawıtqan qatlamı túsiriledi. Bunday qos planka vakuumda ildirip qoyıladi. Oǵan nurlanıw kelip túskende ol biraz qızadı hám bunday jaǵdayda balqıtılǵan kvarc penen vismuttıń jıllılıq keńeyiw koefficientleriniń hár qıylı bolıwı sebepli mayısadı. Mayısıwdı mikroskoptıń járdeminde tikkeley baqlawǵa yamasa plankanıń shetindegi shashıraǵan jaqtılıq nurınıń awısıwı boyınsha baqlawǵa boladı.

Ekinshi jıllılıq usılı jutilatuǵın jaqtılıqtıń tásirinde metal jolaqtıń qızıwınıń saldarınan onıń omliq qarsılıǵınıń ózgeriwine tiykarlanǵan. Bul usıldı bolometrlik usıl dep ataydı hám ol XIX ásirde infraqızıl nurlardı registraciyalaw ushın paydalanıldı. Biraq sezgirliǵı jetkilikli dárejede bolmaǵanlıqtan, bul usıl paydalanılmay qaldı. Sońǵı waqıtları B.P.Kozirev onı biraz jetilistirdi hám sonıń nátiyjesinde bul usıl óziniń sapası boyınsha basqalardan tómén emes dárejeye jetti. Bul jaǵdayda da, qaraǵa boyalǵan altın folga vakuumda ildirip qoyıladi. Bul jolaqtıń omliq qarsılıǵınıń ózgerisi toqtıń shamasın bunnan bılay kúsheytip, kópir usılı boyınsha ólshenedi (II tom, 167-paragraf). Jolaqtıń kishi massasına baylanıslı ásbaptıń inerciyası júdá kishi boladı.

§ 307. Fotometrlik shamalardı ólshew. Kóz, basqa da seziw organları sıyaqlı titirkendiriwshige sanlıq baha bere almaydı, yaǵnıy subektivlik kóriw seziminiń tiykarında bir jaqtılıq aǵısınıń ekinshi jaqtılıq aǵısınan neshe ese úlken ekenligin anıqlay almaydı. Biraq, kózler, eger birdey reńdegi jaqtılıq penen jaqtılandırılǵan bolsa, onda eki qońsilas maydanlardıń *birdey bolıp jaqtılandırılǵanlıǵın* joqarı dárejeli dállikte anıqlawǵa múmkinshilik beredi. Sonlıqtan vizuallıq fotometriyanıń barlıq usılları kóz benen baqlanatuǵın jaqtılandırılǵanlıqtı teńlestiriwge alıp klinedi. Eń ápiwayı túrde bul princip úsh qaptallı prizmalı fotometrde júzege keltiriledi (219-súwret). Aq úsh qaptallı ABC prizması qarańǵılatılǵan trubanıń ishinde jaylastırılǵan. Eki simmetriyalı AB hám AC qaptalları eki S_1 hám S_2 derekleri tárepinen jaqtılandırıladi. O kóz benen AB hám AC qaptallarınıń ekewin de kórgende olardıń birdey bolıp jaqtılandırılıw shártin ańsat tabıwǵa boladı.



219-súwret. Úsh qaptallı prizmaǵa iye fotometr.

Kórsetilgen fotometr dereklerdiń jaqtılıq kúshlerin salıstırwǵa múmkinshilik beredi. Eger dereklerdiń ólshemleri kishi bolsa hám olar prizmadan jetkilikli dárejede alısta jaylasqan bolsa, onda olardı noqatlıq derekler dep esaplawǵa boladı.

Bul jaǵdayda 303-paragraftaǵı (11)-formula boyınsha AB hám AC qaptallarınıń jaqtılandırılǵanlıǵı teń:

$$A_1 = \frac{I_1}{r_1^2} \cos i, \quad A_2 = \frac{I_2}{r_2^2} \cos i. \quad (2)$$

Bul teńliklerde I_1 menen I_2 arqalı sáykes S_1 hám S_2 derekleriniń jaqtılıq kúshleri, r_1 hám r_2 ler arqalı olardan prizmaǵa shekemgi qashıqlıqlar, i arqalı nurlardıń prizmanıń qaptalına túsiw múyeshi belgilengen (S_1 hám S_2 derekleri simmetriyalı jaylasqan jaǵdayda AB hám AC qaptallarına nurlar birdey múyesh penen kelip túsedı). Qashıqlıqlardıń birewin, mısalı r_2 ni, ózertip jaqtılandırılǵanlıqlardıń teńligin júzege keltiriw múmkin: $A_1 = A_2$, bunday jaǵdayda (1)-qatnastan

$$\frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2$$

qatnasına iye bolamız. Usınday jollar menen eki derektiń jaqtılıq kúshleriniń qatnasın olarǵa shekemgi qashıqlıqlar r_1 menen r_2 lerdiń qatnası boyınsha ólshewge boladı eken. Eger dereklerdiń biriniń jaqtılıq kúshi belgili bolsa, onda ekinshi derektiń jaqtılıq kúshin ólshewge boladı eken.

(1)-qatnas jaqtılıq prizmanıń AB hám AC qaptallarınan kelip túsetuǵın hám qorshaǵan predmetlerde shaǵılısqan yamasa shashıraǵan jaqtılıq bolmaǵan jaǵdayda ǵana orınlanadı. Sonlıqtan fotometrlegende dereklerdiń artqı tárepleri menen qaptalların qarańǵılatılǵan betler menen jawıp qoyıw kerek.

SHekli ólshemlerge iye bolǵan derekler ushın olar payda etken jaqtılandırılǵanlıq olardıń B jariqlıǵına proporcional. 304-paragraftaǵı (7)-formula boyınsha jaqtılıq shıǵarıp turǵan dS betinen dS' betine túsetuǵın aǵıs mınaǵan teń

$$dF = B \frac{dS dS' \cos i \cdot \cos i'}{r^2}.$$

Bul ańlatpada r - maydanlardıń arasındaǵı qashıqlıq hám i, i' - nurlar menen eki betke túsilgen normallardıń arasındaǵı múyeshler. Usı qatnasqa tiykarlanıp, joqarıda ayılǵan fotometrdiń járdeminde jaqtılıq shıǵarıp turǵan eki bettiń jariqlıǵın salıstırwǵa boladı. Meyli, bir biri menen salıstırıp kóritetuǵın S_1 hám S_2 derekleri fotometrdiń kósherine normal baǵıtta jaylasqan úlken bolmaǵan jaqtılıq shıǵarıp turǵan dS hám dS' maydanları bolsın ($i_1 = i_2 = 0$), bunday jaǵdayda AB hám AC qaptallarınıń jaqtılandırılǵanlıǵı sáykes mınalardı teń:

$$A_1 = \frac{dF_1}{dS'} = B_1 \frac{dS_1 \cos i'}{r_1^2},$$

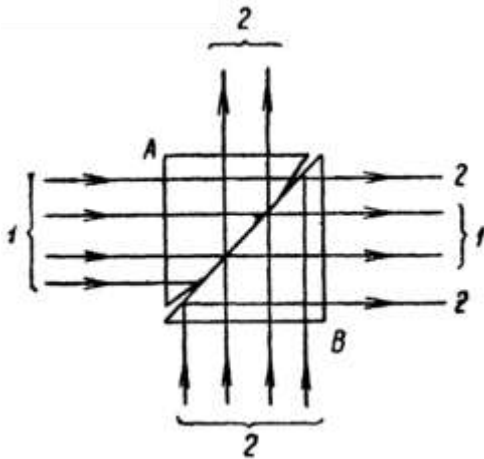
$$A_2 = \frac{dF_2}{dS'} = B_2 \frac{dS_2 \cos i'}{r_2^2}.$$

Bul ańlatpalarda dS' arqalı AB hám AC prizmalarınıń biriniń beti, i' arqalı usı qaptallargá nurlardıń túsiw múyeshi belgilengen. r_1 menen r_2 qashıqlıqların sáykes túrde saylap alıp, biz A_1 menen A_2 jaqtılandırılǵanlıqlarınıń birdey bolıwına qaytadan jetisiwimiz múmkin. Bunday jaǵdayda (2)-ańlatpadan tómendegidey qatnası alamız:

$$\frac{B_1}{B_2} = \frac{dS_2}{dS_1} \cdot \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2.$$

Bunnan maydanlardıń qatnası bolǵan dS_2/dS_1 qatnasınıń hám r_1/r_2 qatnasınıń shamasın bilip, jaqtılıq shıǵarıp turǵan eki bettiń jarıqlıqlarınıń qatnasın tabıwdıń múmkin ekenligi kelip shıǵadı.

Dáhirek bolǵan fotometrlerde ABC prizması Lummer-Brodhun kubı dep atalatuǵın kub penen almasırladı. Bul kishkene kub (220-súwret) A hám B tuwrı múyeshli shiyshe prizmalarınan turadı, olardıń birinde (220-súwrettegi A qaptalı) gipotenuzaǵa sáykes keletuǵın qaptal tek oraydı tegis etip qaldırılǵan; onıń shetleri shlifovkalangan. Prizmalardıń bir birine tiyisip turǵan orınlarda bir tekli móldir denedey qásiyetke iye bolıwı ushın olar bir birine qısılǵan ("optikalıq kontaktqa" keltirilgen). Meyli, kubqa 1 hám 2 jaqtılıq aǵısları kelip túsetuǵın bolsın. 1-aǵıs kontaktqa keltirilgen orın arqalı ótip oń tárepke qaray shıǵadı. A prizmasınıń qaptalı shlifovkalangan orınlarda 1-nur qaptallargá shashıraydı. 2-aǵıs kontaktqa keltirilgen orın arqalı joqarı qaray ótedi. Qalǵan orınlarda ol tolıq ishki shaǵılısıwǵa ushıraydı hám oń tárepke qaray shıǵadı. Usınıń saldarınan oń tárepke qaray aǵıslardıń ekewiniń de nurları shıǵadı, bul bir waqıtta eki jaqtılandırılǵan maydandı baqlawǵa múmkinshilik beredi. Lummer-Brodhun kubı fotometriniń ulıwmalıq sxeması 221-súwrette kórsetilgen. Bul sxemada S_1 menen S_2 - ólshenetuǵın derekler, E - eki tárepi de tolıq birdey bolǵan aq ekran, E' penen E'' - basqa eki aq ekran, AB - Lummer-Brodhun kubı, L - lupa, O - baqlawshınıń kózi. Baqlawlardı ótkergende kubtıń orayı S_1 dereginen shıqqan nur menen, al kubtıń sırtqı bólimi S_2 degerinen shıqqan nur menen jaqtılandırıladı. Solay etip, bir derek tárepinen jaqtılandırılǵan maydan basqa derek tárepinen jaqtılandırılǵan maydandı qorshap turadı hám jaqtılandırıwlar birdey bolmaǵan jaǵdayda olardıń arasındaǵı ayırma keskin túrde kórinedi. Jaqtılandırıwlar birdey bolǵanda shegara tolıq joǵaladı.

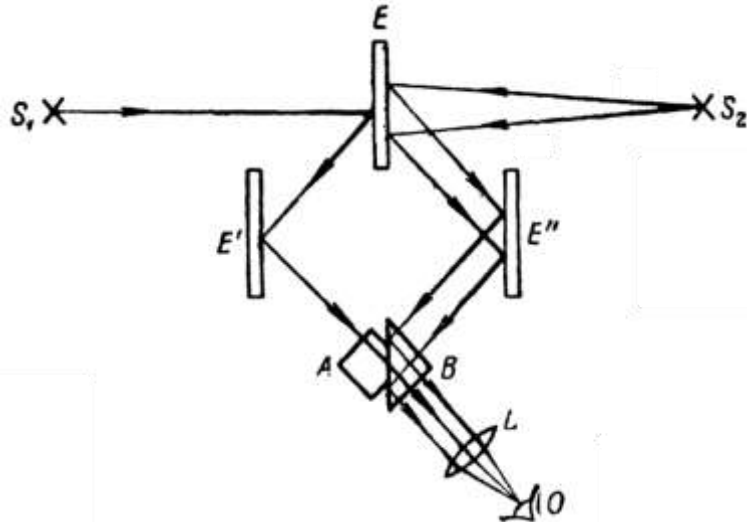


220-súwret.
Lummer-Brodhun kubı.

Jaqtılandırılǵanlıqlardı teńlestiriwdi tek dereklerge shekemgi qashıqlıqlardı ózgeriw jolı menen ǵana emes, al basqa da dúzilislerdiń járdeminde ámelge asırıwǵa boladı. Olardıń ishindegi eń jiyi qullanılatuǵını jutiwshı sinalar menen polarizaciyalıq sistemalar bolıp tabıladı.

Jaqtılıq dástelerin hálsiretiw ushın simlarınıń maydanına qatnası boyınsha úlken yamasa kishi bolǵan torlar hám hár qıylı ólshemlerge iye kesilgen sańlaqlargá iye bolǵan aylanatuǵın diskler de qullanıladı. Sońǵı dúzilis is júzinde aǵıstı emes, al aǵıstıń tásir etiw waqıtın ózǵertedi. Al aǵıstıń hám onıń tásir etetuǵın waqıtınıń bir birine ekivalent emes ekenligin atap ótemiz.

Vizuallıq fotometriyanıń joqarıda talqılانған usılları hár qıylı reńge iye bolған ağıslardı salıstırıwǵa jaramaydı (geteroxromlıq fotometriya), eger bul jaqtılandırılғанlıqlardı reńi boyınsha bir birinen kúshli ayırılutın jaqtılıq ağısları payda etetuǵın bolsa eki maydannıń jaqtılandırılғанlıqlarınıń ayırmasın tabıwǵa bolmaydı. Geteroxromlı fotometriyanıń máselelerin vizuallıq túrde adaptaciyalانған kózdıń járdeminde sheshiwge boladı (S.I.Vavilov usılı, mayda shrift penen jazılған tekstti qarańız).

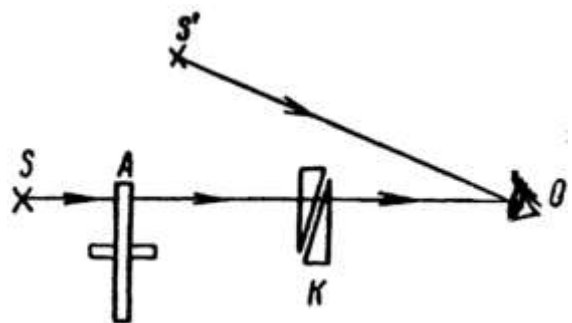


221-súwret. Lummer-Brodhun kubı bar fotometrdiń sxeması.

S.I.Vavilov hám onıń xızmetkerleri tárepinen adaptaciyalانған kóriwdiń bosaqasınıń úlken turaqlılıqqa iye bolatuǵınlıǵın kórsetildi. Bul júdá hálisiz bolған jaqtılıqtıń dereklerin fotometrlewdiń usılların islep shıǵıwǵa múmkinshilik beredi. Kóriw seziminiń joǵalıw momentin dálirek belgilew ushın jıpılıqlawlar usılı qollanıladı. Bul usıldıń sxeması 222-súwrette keltirilgen. Baqlawshınıń kózi O qosımsha bolған ázzi S' jaqtılıq deregine qaray baǵdarlanған. S jaqtılıq dereginen shıqqan ólshenetuǵın aǵıs kózdıń torlı qabıǵınıń periferiyalıq (shetki) bólimine kelip túsedı. Nátiyjede bul derektiń jaqtılıǵınıń periferiyalıq (gewgimlik) qabıl etiliwin támiyinleydi. Nurdıń SO jolına sańlaǵı bar aylanatuǵın A diski qoyıladı hám ol S dereginiń jılpıldısın payda etedi. K sınasınıń járdeminde S dereginen jetip kelgen aǵıstı belgili bir san ese hálisiretiwge boladı. Jaqtılıqtıń quwatı kóriniw bosaqasınan kishi bolǵanda jılpıldı joǵaladı.

222-súwret.

S.I.Vavilovtıń adaptaciyalانған kóriwdiń bosaqası boyınsha fotometrlew usılınıń sxeması.



Jılpıldılardıń joǵalıwı ushın jaqtılıqtıń dereginen kózdıń qarashıǵına kelip túsetuǵın dáslepki aǵıs F tiń shaması k ese hálisiretilgen dep boljaymız. Bunday jaǵdayda

$$\frac{F}{k} = F_0. \quad (3)$$

Bul teńlikte F_0 - kóriw bosaqasına sáykes keletuǵın aǵıs. Eger berilgen baqlawshı ushın adaptaciyalانған kóriw bosaqasınıń shaması aldın-ala ólshengen bolsa, onda (3)-qatnas F shamasın ólshewge múmkinshilik beredi. Dáslep hár qıylı tolqın uzınlıqları ushın kóriw bosaqasın ólshep, usınday jollar menen tek ǵana birdey reńge iye bolған jaqtılıq dereklerin ǵana emes, al hár qıylı tolqın uzınlıqlarına iye jaqtılıqtı beretuǵın dereklerde de, yaǵnıy geteroxromlıq fotometriyanıń máselelerin sheshiwge boladı.

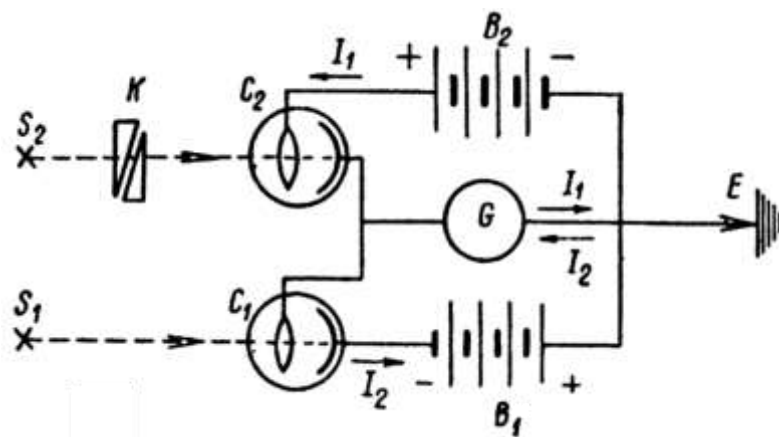
Obektivlik fotometriya usıllarında bunnan aldırǵı paragraftaǵı jaqtılıqtı sezetuǵın usıllardıń biri qullanıladı. Apparatı tek aǵıslardıń teń ekenligin anıqlaw ushın paydalanıwǵa boladı. Bunday usıllar differenciallıq atamasına iye hám apparatqa kelip túsetuǵın jaqtılıq aǵısı menen usı apparat kórsetken shamalıń arasındaǵı proporcionallıqtı talap etpeydi. Eki fotoelementke iye bolǵan differenciallıq fotometrdiń ápiwayı sxeması 223-súwrette keltirilgen. Bul súwrette S_1 menen S_2 - bir biri menen salıstırılauǵın jaqtılıqtıń derekleri, C_1 menen C_2 - birdey bolǵan eki fotoelement, B_1 menen B_2 - batareyalar, G - galvanometr. SHınjırdıń E noqatı Jer menen tutastırılǵan. Fotoelementlerdi jaqtılandırǵanda olar arqalı strelkalardıń baǵıtında I_1 hám I_2 toqları ótedi. Kórinip turǵanıday, galvanometr arqalı $I_1 - I_2$ toqlardıń ayırmasına teń toq ótedi. Meyli, S_2 deregi S_1 dereginen intensivlirek bolsın. Bunday jaǵdayda S_2 dereginen shıqqan dásteniń aldına K sınaqın jaylastırıp, eki fotoelementke kelip túsetuǵın aǵıslardı teńlestiriwge boladı. Usınıń nátiyjesinde $I_1 - I_2$ toqlardıń ayırması nolge teń boladı hám G galvanometriniń strelkasınıń burılıwı toqtaydı. Eger onıń ushın S_2 dereginen shıqqan dásteniń intensivligin k ese kemeytiw kerek bolsa, onda

$$\frac{1}{k} F_2 = F_1$$

teńligine iye boladı. Bul ańlatpada F_1 arqalı S_2 dereginen keletuǵın aǵıs belgilengen. Bunnan eki derektiń aǵıslarınıń qatnasın alamız:

$$\frac{F_2}{F_1} = k.$$

Payda bolatuǵın elektr toǵınıń shaması olarǵa túsetuǵın jaqtılıq aǵısına proporcional bolǵan vakuumlıq fotoelement penen termopararı aǵıslardıń shamaların tikkeley ólshew ushın paydalanıwǵa boladı. Bunday jaǵdayda termopara, sonıń menen birge M.L.Veyngеров penen B.P.Kozirevtiń qaraǵa jaqsılap boyalǵan jıllılıq ásbapları hár qıylı tolqın uzınlıqlarına iye aǵıslardıń quwatların salıstırıp, yaǵnıy geteroxromlıq fotometriyanıń máselelerin sheshiw ushın jaramlı.



223-súwret. Differenciallıq fotoelektrlik fotometrdiń sxeması.

Fotoelementler menen termoparlaradaǵı jaqtılandırıwdıń nátiyjesinde payda bolǵan toqlardı kúsheytıw ushın radiotexnikalıq kúsheytıwshi sxemalar paydalanıladı. Usınday kúsheytıwshi sxemalardı paydalanıw jaqtılıq aǵısların ólshew menen registraciyalawdıń obektivlik usıllarınıń sezgirlikin kóp ese joqarılatıwǵa múmkinshilik beredi.

Selektivlik qásiyetleriniń bar bolıwına baylanıslı fotoelementlerdi geteroxromlıq fotometriyanıń máselelerin tikkeley sheshiw ushın paydalanıwǵa bolmaydı. Biraq, eger energiyanıń spektri belgili bolsa, onda hár qıylı tolqın uzınlıqlarına iye eki jaqtılıq aǵısı ushın quwatlıqlardıń qatnasın anıqlawǵa boladı. Onıń ushın aǵıslardıń hár qaysısı energiyanıń tarqalıwı belgili bolǵan derektiń spektriniń sáykes uchastkası menen salıstırıladı. Bunnan nurlandırılauǵın aǵıslardıń quwatlarınıń qatnası tabıladı. Energiyasınıń spektr boyınsha tarqalıwı belgili bolǵan

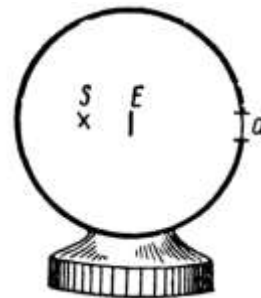
derek sıpatında óziniń qásiyetleri boyınsha múmkin bolǵanınsha absolyut qara denegе jaqın derek alınadı (309-paragraf).

Is júzında belgili bolǵan orınlardaǵı, solardıń ishinde jumıs ornındaǵı jaqtılandırılǵanlıq máselesin sheshiwge tuwrı keledi. Jaqtılandırılǵanlıqtı ólsheytuǵın hám lyukslerde graduırovkalanǵan ásbaplardı lyuksometrler dep ataydı. Ápiwayı lyuksometrlerde ólshenetuǵın jaqtılandırılǵanlıq stardart lampa tárepinen payda etilgen jaqtılandırılıw menen salıstırıladı. Sońǵı waqıtları galvanometr menen tutastırılǵan qattı fotoelementten turatuǵın lyuksometrler keń tarqala basladı. Galvanometrdiń shkalası lyukslerde graduırovkalanadı. Bunday lyuksometrler úlken turaqlılıq hám dálilik penen ayrılıp turmaydı, Biraq kóplegen ámeliy máselelerdi sheshiwde olar tolıq jaramlı hám paydalanıw ushın qolaylı.

Jaqtılıq texnikasında jaqtılıq dereginiń ortasha sferalıq kúshin anıqlaw áhmiyetli máselelerdiń qatarına kiredi.

Biraq, derek is júzinde jiıı ushırasatuǵın anizotrop bolǵan jaǵdayda (mısalı elektr lampası) jaqtılıq kúshiniń ortasha sferalıq kúshin anıqlaw ádewir qıyınshılıqlardı payda etedi. Bunday jaǵdayda hár qıylı baǵıtlardaǵı jaqtılıqtıń kúshin kóp sanlı ólshewler hám alınǵan nátiyjelerdi ortashalaw talap etiledi. Bul qıyınshılıq *integrallıq fotometr* dep atalatuǵın ásbaptıń járdeminde ańsat sheshiledi. Bunday fotometr ishi quwıs, ishki tárepi aqqa boyalǵan ıdıs túrine iye boladı. Bunday ıdıstıń eń qolaylı túri - sferalıq (shar tárizli) fotometr bolıp tabıladı. Ólshenetuǵın derek (224-súwret) shardıń ishine jaylastırıladı. ıdıstıń ishinde jaqtılıqtıń kóp sanlı shaǵılıswlarınıń saldarınan derektiń jaqtılıqtıń ortasha sferalıq kúshine teń jaqtılandırıw payda boladı. Bul jaqtılandırıwdı ólshew ushın sharda a gúńgirt shiyshe menen jawıp qoyılǵan tesik islenedi. Móldir emes E plastinkası gúńgirt shiyshe S dereginen tuwrı shıqqan nurlardan saqlaydı.

224-súwret.
SHar fotometr.



Esaplawlar shardıń ishindegi onıń betindegi jaqtılandırılǵanlıqtıń mınaǵan teń ekenligin kórsetedi:

$$A = A_0 + \frac{kI_0}{(1-k)R^2}. \quad (4)$$

Bul teńlikte I_0 - jaqtılıq dereginiń ortasha sferalıq kúshi, k - diywallar tárepinen jaqtılıqtı shashırıwıw koefficienti, R - shardıń radiusı hám A_0 - derek payda etetuǵın jaqtılandırıw.

SHar fotometrde (224-súwret) a gúńgirt aynası tuwrı jaqtılandırıwdan saqlaytuǵın E plastinkasınıń járdeminde saqlanǵan, sonlıqtan onıń ushın $A_0 = 0$ hám

$$A = \frac{kI_0}{(1-k)R^2},$$

yaǵnıy jaqtılandırılıw jaqtılıqtıń sferalıq kúshi I_0 boyınsha anıqlanadı. Kórinip turǵanıday, bul jaǵdayda A nıń mánisi derektiń shardıń ishindegi qaysı orında jaylasqanlıǵınan ǵárezli emes. k menen R di bilip hám ólshengen jaqtılandırılǵanlıq A boyınsha jaqtılıqtıń ortasha sferalıq kúshi I_0 di anıqlawǵa boladı.

(4)-ańlatpa biz ushın basqa tárepten de qızıq: k nıń shaması 1 ge jaqın bolǵan jaǵdaylarda jaqtılıqtıń sferanıń ishki betinde kóp sanlı shashırıwınıń saldarınan payda bolǵan jaqtılandırıwdıń shaması nurlardıń derekten tuwrıdan-tuwrı kelip túsiwiniń nátiyjesinde payda bolǵan jaqtılandırıwdıń shamasınan ádewir úlken boladı (305-paragrafta aytılıp ótilgen jaǵday menen salıstırıńız). Mısal ushın jaqtılıq kúshi I ge teń bolǵan noqatlıq derektiń shardıń orayında turǵan jaǵdaydı qaraymız.

Bunday jaǵdayda $A_0 = I/R^2$ hám tolıq jaqtılandırılǵanlıq A ushın mınaday ańlatpaǵa iye bolamız:

$$A = \frac{I}{R^2} + \frac{kI}{(1-k)R^2} = \frac{1}{1-k} \cdot \frac{I}{R^2}.$$

Demek, bunday jaǵdayda payda bolatuǵın jaqtılandırılǵanlıqtıń mánisi tuwrı jaqtılandırılǵanlıq A_0 dıń mánisin $\frac{1}{1-k}$ ese úlken boladı eken. $k = 0,9$ teńligi orınlı bolǵanda $\frac{1}{1-k} = 10$, yaǵnıy tolıq jaqtılandırılǵanlıq ishki beti qaraǵa boyalǵan shardaǵı tuwrı jaqtılandırılǵanlıqtan 10 ese úlken boladı eken.

§ 308. Temperaturalıq nurlanıw. 275-paragrafta aytıp ótkenimizdey, jaqtılıqtıń shıǵarılıwı menen jutılıwı atomlar menen molekulalardaǵı zaryadlangan bólekshelerdiń terbelisleriniń saldarınan júzege keledi. Sonlıqtan, jaqtılıqtıń shıǵarılıwı menen jutılıwı qubılısların tolıq táriyiplewdi zaryadlangan bóleksheler menen nurlanıw arasındaǵı óz-ara tásirlesiwlerdiń nızamlarınıń tiykarında beriw kerek. Keyinirek (332-paragraf) biz bul nızamlardıń klassikalıq elektrodinamikanıń sheklerinden shıǵatuǵınlıǵın hám ayrıqsha kvantlıq xarakterge iye bolatuǵınlıǵın kóremiz. Biraq jaqtılıqtıń shıǵarılıwı menen jutılıwı menen baylanıslı bolǵan bir qatar qubılıslardı olardıń mexanizmlerin esapqa almay, al olardı tek energiyalıq (termodinamikalıq) kóz-qaraslarda turıp tallawǵa boladı. Usınday tallawlar menen shuǵıllanatuǵın fizikanıń bólimin *nurlanıw termodinamikası* dep ataydı.

Qálegen nurlanıw energiyasınıń joǵalıwı menen júzege keledi. Sonlıqtan nurlanıw deneniń óziniń energiyasınıń kemeyiwı yamasa sırttan alıńǵan energiya menen baylanıslı.

Bir neshe mısallar keltiremiz.

1. Fotolyuminescenciya qubılısı júzege keledi (332-paragraf): aldın ala jaqtılıqtı jutqan dene ózinen-ózi jaqtılıq shıǵaradı. Jaqtılıqtı jutqanda denede ózgerisler júzege keledi, nátiyjede ol qozdırıw energiyası (yamasa aktivaciya energiyası) dep atalatuǵın bazı bir energiyanı aladı. Bunnan keyingi nurlanıw qozdırıw energiyasınıń esabınan boladı.

2. Denen ximiyalıq reaksiyalardıń esabınan jaqtılıq shıǵaradı (ximilyuminescenciya). Mısalı hawadaǵı kislorodtaǵı ástelik penen okisleniwdiń saldarınan fosfor jaqtılıq shıǵaradı. Bul jaǵdayda ximiyalıq processte ajralıp shıǵatuǵın energiyasınıń esabınan nurlanıw energiyası payda boladı.

3. Siyrekletilgen gaz arqalı elektr toǵı ótkende usı gazdıń jaqtılıqtı shıǵıratuǵınlıǵı baqlanadı. Gazdıń nurlanıw ushın jumsaytuǵın energiyası elektronlardıń soqlıǵıswdıń saldarınan atomlar menen molekulalardı beretuǵın energiyasınıń esabınan toltırılıp barıladı.

4. Belgili bolǵan temperaturaǵa shekem qızdırılǵan deneler de jaqtılıq shıǵaradı.

Eger dene qorshaǵan denelerden nurlanıwdı jutıw yamasa shıǵarıw jolı menen energiyanı alatuǵın bolsa, onda nurlanıwdıń esabınan usı deneniń energiyasınıń kemeyiwı kompensaciyalanıp baradı hám bunday process *teń salmaqlı* túrde ótedi. Bunday jaǵdayda nurlanıwshı deneniń halı belgili bolǵan turaqlı T temperaturası menen táriyiplenedi. Temperatura túsiniń statistikalıq teń salmaqlıq orın alǵan jaǵdayda ǵana qollanıwǵa bolatuǵınlıǵın eske túsiremiz (I tom, 66-paragraf). Sonlıqtan joqarıda kórsetilgen teń salmaqlıq nurlanıwı temperaturalıq nurlanıw dep ataladı.

Dene tárepinen sırttan alınatuǵın jallılıqtıń muǵdarı nurlanıw energiyasını tolıq kompensaciyalaw ushın jetkilikli bolmasa, onda nurlanıw energiyasınıń bir bólimi deneniń ishki energiyasınıń zapasınıń esabınan alınadı. Ulıwma aytqanda, bul jaǵdayda bólekshelerdiń tarqalıwı buzıladı hám nurlanıw teń salmaqlıq nurlanıwı bolıwdan qaladı. Biraq, eger nurlanıw sonday ástelik penen júretuǵın bolsa, onda denedegi ishki energiyasınıń tarqalıwı teńlesiwge úlgeredi hám nurlanıw teń salmaqlıq nurlanıwı bolıp qala beredi. Bunday jaǵdayda nurlanıw teń salmaqlıq xarakterge iye boladı. Biraq, deneniń temperaturası tómendeydi hám hár bir berilgen momenttegi deneniń halın teń salmaqlıq hal dep qarawǵa hám oǵan temperaturanıń belgili bolǵan mánisin beriwge boladı.

Qarap shıǵıw ushın *deneniń energiyalıq jarqınlıǵı* dep atalatuǵın R_e shamasın kirgizemiz hám onı, 303-paragrafta ayılǵanlarǵa sáykes, jaqtılıq shıǵarıp turǵan deneniń betiniń maydanınıń bir birliginen shıǵatuǵın jaqtılıq aǵısı dE niń san mánisine teń dep anıqlaymız²³:

$$R_e = \frac{dE}{dS}. \quad (1)$$

Bul ańlatpada dE *jaqtılıq energiyasınıń integrallıq aǵısı*, yaǵnıy dene tárepinen shıǵarılatuǵın barlıq tolqın uzınlıqlarındaǵı jaqtılıq energiyasınıń aǵısı bolıp tabıladı. (1)-teńlik boyınsha dE ushın

$$dE = R_e dS \quad (2)$$

teńligine iye bolamız.

302-paragrafta biz jaqtılıq aǵısındaǵı energiyanıń tolqın uzınlıqları boyınsha tarqalıwın táriyipleytuǵın e_λ shamasın kirgizgen edik. Tap sonday jol menen tolqın uzınlıǵı r_λ boyınsha tarqalıw funkciyası bolǵan energiyalıq jarqınlıq R_e funkciyasın da kirgiziwimiz múmkin. Bunday jaǵdayda tolqın uzınlıqlarınıń $\lambda, \lambda + d\lambda$ intervalına tiyisli bolǵan hám dS maydanınan nurlandırılatsuǵın jaqtılıq energiyasınıń tıǵızlıǵı ushın

$$dE_\lambda = r_\lambda d\lambda dS \quad (3)$$

ańlatpasın alamız. r_λ shaması berilgen λ tolqın uzınlıǵınıń qasındaǵı tolqın uzınlıǵınıń bir birlik intervalına sáykes keletuǵın energiyalıq jarqınlıq bolıp tabıladı; onı deneniń *nur shıǵarıw qábiletligi* dep ataydı.

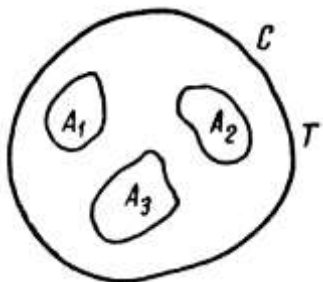
Barlıq tolqın uzınlıqlarına sáykes keletuǵın R_e integrallıq energiyalıq jarqınlıq, álbette, mınaday integraldıń járdeminde beriledi:

$$R_e = \int_0^\infty r_\lambda d\lambda. \quad (4)$$

Endi deneniń jaqtılıqtı jutuın qaraymız. Meyli, denegе bazı bir belgili bolǵan λ tolqın uzınlıǵınıń qasındaǵı kishi tolqın uzınlıqları $d\lambda$ intervalına kiretuǵın jaqtılıq energiyasınıń aǵısı dE_λ túsetuǵın bolsın. Bul aǵıstıń bir bólimi denegе shashıraydı hám shaǵılısadı (móldir denelerde bolsa jaqtılıqtıń bir bólimi dene arqalı ótedi), bir bólimi jutıladı. Tap sol $d\lambda$ intervalına kiretuǵın aǵıstı dE'_λ arqalı belgileymiz. Bunday jaǵdayda berilgen λ tolqın uzınlıǵındaǵı aǵıstıń qanday bóliminiń jutılatsuǵın ańǵartatuǵın

$$a_\lambda = \frac{dE'_\lambda}{dE_\lambda} \quad (5)$$

shamasın *deneniń jutu qábiletligi* dep ataladı. Is júzinde denelerdiń barlıǵı selektivlikke iye boladı, yaǵnıy olar hár qıylı tolqın uzınlıqların birdey jutpaydı. Olar ushın a_λ tolqın uzınlıǵınıń funkciyası bolıp tabıladı. Eger qanday da bir dene tolqın uzınlıqlarınıń bazı bir intervalında jaqtılıqtıń aǵısın tolıǵı menen jutatuǵın bolsa, onda usınday tolqın uzınlıqları ushın $a_\lambda = 1$. Aǵıs tolıǵı menen jutılmaytuǵın barlıq jaǵdaylarda $dE'_\lambda < dE_\lambda$ hám $a_\lambda < 1$.



225-súwret.

Temperaturası T turaqlı bolǵan qabıqtıń ishindegi deneler.

²³ Jarqınlıq R menen energiyalıq jarqınlıq R_e diń arasındaǵı ayırma tolqın uzınlıǵınıń $d\lambda$ intervalına sáykes keletuǵın jaqtılıq aǵısı menen jaqtılıq energiyasınıń aǵısınıń arasındaǵı ayırmanıń Φ kóbeytiwshisiniń bar ekenligine baylanıslı (kóriniw funkciyası, 302-paragraf).

Tájiriybeler denelerdiń shıǵarıw r_λ hám jutıw a_λ qábiletlikleriniń arasında belgili bolǵan baylanıstıń bar ekenligin kórsetedi. Bir neshe A_1, A_2, A_3 denesi turaqlı T temperaturasında uslap turılátuǵın C qabıǵınıń ishinde jaylastırılǵan bolsın (225-súwret). Meyli, qabıqtıń ishi boslıq bolıp, deneler bir biri hám qabıq penen jaqtılıqtı shıǵarıw yamasa jutıw jolı menen energiya almasatuǵın bolsın. Tájiriybeler denelerdiń usınday sistemasınıń bazı bir waqıttan keyin jıllılıq teń salmaqlıǵına keletuǵınlıǵın, yaǵnıy denelerdiń barlıǵınıń qabıqtıń temperaturasına teń bolǵan T temperaturasına iye bolatuǵınlıǵın kórsetedi. Biraq úlken energiyalıq jarqınlıq R_e ge iye bolǵan deneler waqıt birliginde betleriniń maydanınıń bir birliginen kishi energiyalıq jarqınlıqqa iye bolǵan denege salıstırǵanda kóbirek energiyanı joǵaltadı. Demek, basqa denelerdiń temperaturasında bolǵan T temperaturasında turıwı ushın, bunday denelerdiń energiyanı kóbirek jutıwı kerek. Solay etip, tek nurlanıw hám jutıw menen energiya almasatuǵın denelerdiń arasındaǵı termodinamikalıq teń salmaqlıqtıń orın alıwı ushın denelerdiń shıǵarıw hám jutıw qábiletlikleriniń arasında proporcionallıqtıń orın alıwı shárt. Kirxgof bul proporcionallıqtıń óz aldına alınǵan tolqın uzınlıqlarınıń hár bir intervalı ushın orınlanatuǵınlıǵın kórsetti. Eger $A_1, A_2, A_3, \dots$ deneleri sáykes $r_{\lambda_1}, r_{\lambda_2}, r_{\lambda_3}, \dots$ hám $a_{\lambda_1}, a_{\lambda_2}, a_{\lambda_3}, \dots$ nur shıǵarıw hám nurdı jutıw qábiletliklerine iye bolsa, onda

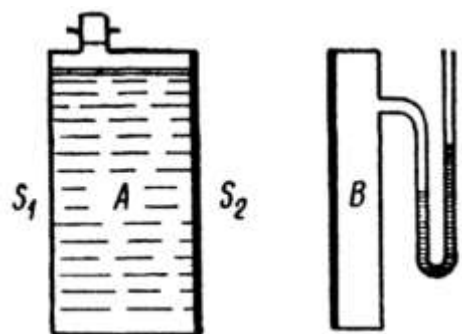
$$\frac{r_{\lambda_1}}{a_{\lambda_1}} = \frac{r_{\lambda_2}}{a_{\lambda_2}} = \frac{r_{\lambda_3}}{a_{\lambda_3}} = \dots = f(\lambda, T) \quad (6)$$

qatnası orınlanadı. Bul (6)-qatnas Kirxgof nızamın ańǵartadı: *nur shıǵarıw qábiletligi menen nurdı jutıw qábiletliginiń qatnası r_λ/a_λ deneniń tábiyatınan ǵárezli emes hám onıń mánisi barlıq deneler ushın birdey bolǵan jáne tolqın uzınlıǵı λ menen T temperaturanıń funkciyası bolǵan $f(\lambda, T)$ funkciyasına teń.*

Nur shıǵarıwshılıq hám nurdı jutıwshılıq qábiletliklerdiń arasındaǵı baylanıstı ańsat demonstraciyalawǵa boladı. Nurlandıırıwshı sıpatında parallelepiped túrine iye ıdıs alınadı (226-súwret) hám onıń bir tárepi S_1 jaqsı polirovkalanǵan metaldan soǵılǵan, al ekinshi tárepi (S_2) qaraǵa boyalǵan. ıdıs ıssı suw menen toltırılǵan hám nátiyjede ol jetkilikli quwatqa iye bolǵan infraqızıl nurlardıń deregine aylanadı. S_1 beti ózine túsken nurlardıń úlken bólimin shaǵılıstıradı hám soǵan sáykes ázzi jutadı. S_2 beti kúshli jutadı. Kirxgof nızamı boyınsha S_1 betiniń S_2 betine salıstırǵanda ázzirek nurlandıırıwı kerek. Nurlanıwdıń deregi sıpatında manometr menen tutastırılǵan jabıq B ıdısı alınadı. Bul ıdıstıń diywallarınıń biri qarańǵılátılǵan. Eger onıń qarańǵılátılǵan betin A nurlandıırǵışınıń S_2 betine qaray bursaq (bul jaǵday 226-súwrette kórsetilgen), onda B ıdısı jutılǵan nurlanıwdıń esabınan sezilerliktey qızadı hám onıń ishindegi gaz keńeyedi. Bul jaǵdayda monometrdiń kórsetiwinen anıqlawǵa boladı. Eger A ıdısın qarańǵılátılǵan bet tárepte polirovkalanǵan bet qaraytuǵınday etip bursaq, onda hawanıń keńeyiwiniń shaması ádewir kishi boladı. Bul temperaturanıń bir mánisinde polirovkalanǵan S_1 betiniń qarańǵılátılǵan S_2 betine salıstırǵanda nurdı kem shıǵaratuǵınlıǵın kórsetedi.

226-súwret.

Polirovkalanǵan hám qaraǵa boyalǵan betlerdiń nurdı hár qıylı shıǵaratuǵınlıǵın demonstraciyalaw.



§ 309. Absolyut qara dene. Qálegen temperaturada qálegen quramǵa iye jaqtılıqtı tolıq jutatuǵın deneni alıw múmkin dep boljayıq. Onıń ushın jutıw qábiletligi a_λ niń temperaturadan ǵárezsiz hám qálegen tolqın uzınlıǵı ushın 1 ge teń bolıwı kerek. Bunday deneni *absolyut qara dene* dep ataydı.

308-paragraftaǵa (6)-formula menen ańlatılatuǵın Kirxgof nızamı boyınsha, barlıq deneler ushın nur shıǵırıw qábiletligi r_λ diń jutıw qábiletligi a_λ ǵa qatnası tolqın uzınlıǵı menen temperaturanıń barlıq deneler ushın birdey bolǵan funkciyasına teń:

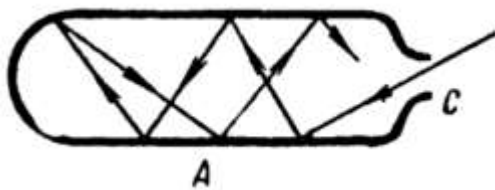
$$\frac{r_\lambda}{a_\lambda} = f(\lambda, T).$$

Absolyut qara dene ushın $a_\lambda = 1$ hám usıǵan sáykes onıń nur shıǵarıwshılıq qábiletligi $f(\lambda, T)$ funkciyasınıń járdeminde tikkeley anıqlanadı:

$$r_\lambda = f(\lambda, T). \quad (1)$$

Anıqlaması boyınsha nur shıǵarıwshılıq qábiletligi bolǵan r_λ shaması jarqınlıqtıń tolqın uzınlıǵı boyınsha tarqalıwı bolǵanlıqtan, onda (1)-qatnastan biz mınaday jaǵdayǵa iye bolamız: *berilgen temperaturada barlıq absolyut qara deneler nurlandırılatuǵın energıyanıń tolqın uzınlıǵınan birdey tarqalıwına iye boladı; barlıq qara denelerdiń jarqınlıǵı temperaturaǵa baylanıslı birdey bolıp ózgeredi.*

Tábiyatta qásiyetleri boyınsha absolyut qara deneniń qásiyetlerindey bolǵan deneler bolmaydı. Kúyik menen yamasa qara platina menen qaplangan deneler tek tolqın uzınlıǵı λ niń sheklengen intervalında ǵana 1 ge jaqın bolǵan a_λ jutıw qábiletligine iye boladı; alıstaǵı infraqızıl oblastta olardıń jutıw qábiletligi 1 den sezilerliktey kishi. Biraq, absolyut qara denegе jasalma túrde qálegenshe jakınlasıwǵa boladı. Úlken bolmaǵan C sańlaǵına iye derlik jabıq ıdıstı alamız (227-súwret). Usı C sańlaǵı arqalı ıdıstıń ishine kirgen nur tek kóp sanlı shaǵılısıwlardan keyin ǵana sırtqa shıǵa aladı. Meyli, ıdıstıń ishki betine bir ret túsken nurdıń jaqtılıq energıyasınıń k úlesi ǵana shaǵılısatuǵın bolsın. n ret shaǵılısıwda dáslepki aǵıstıń nk bólimi ǵana shaǵılısadı. k nıń mánisi barlıq waqıtta 1 den kishi bolǵanlıqtan, n shamasınıń jetkilikli dárejedegi úlken mánislerinde nk shamasınıń mánisi júdá kishi boladı. Solay etip, C sańlaǵı arqalı kirgen nurlardıń tek oǵada kishi bolǵan bólimi ǵana sırtqa shıǵa aladı hám, sonlıqtan barlıq tolqın uzınlıqları ushın C sańlaǵınıń jutıw qábiletligi 1 ge júdá jaqın boladı.



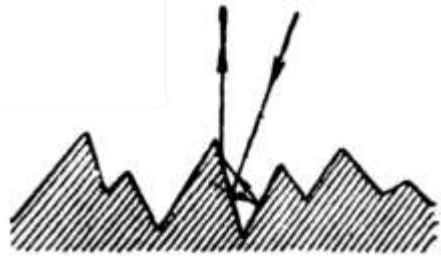
227-súwret.
Absolyut qara deneniń modeli.

Usınday juwmaq ushın ápiwayı mısıl retinde kóshede turıp qaraǵandaǵı aynalardıń ashılıwı xızmet ete aladı. Aynalardıń ólshemleri ójireniń ólshemlerine salıstırǵanda kishi bolǵanlıqtan, hátte ójiriniń diywallarında jaqtılıq jaqsı shaǵılısatuǵın bolǵan jaǵdayda da, aynalardan kirgen jaqtılıqtıń tek úlken bolmaǵan bólimi ǵana kóshege keri baǵıtta qaytadan shıǵadı. Sonlıqtan ishtegi diywallardıń reńinen ǵárezsiz aynalardıń ishi biraz qarańǵı bolıp kórinedi.

Usınıń menen birge, qaytadan shaǵılısıwdıń saldarınan nurlardıń hálsirewiniń nátiyjesinde, qanday da bir deneniń gedir-budır beti tap sol deneniń polirovkalangan betinen qarańǵıraq bolıp kórinedi. Gedir-budır betke túsken nur kópshilik jaǵdaylarda sırtqa shıǵaman degenshe bir neshe ret shaǵılısadı (228-súwret).

228-súwret.

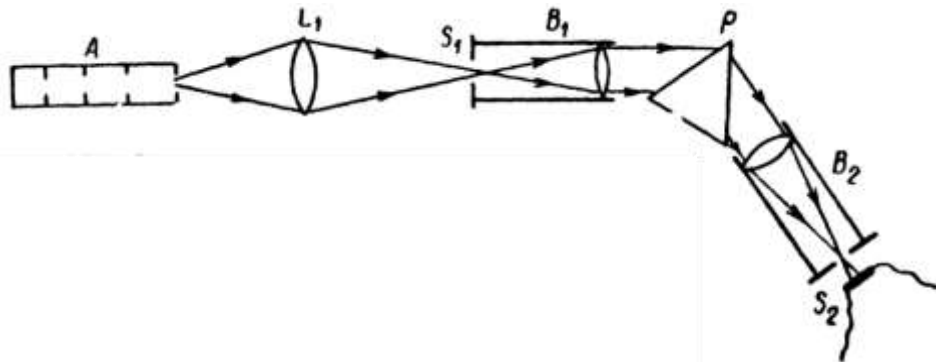
Gedir-budır betten jaqtılıqtıń shaǵılısıwı.



Kirxgof nızamı boyınsha α_λ shaması 1 ge jaqın bolǵan bettiń jarqınlıǵı absolyut qara deneniń jarqınlıǵına jaqın boladı. Solay etip, eger A ıdısınıń diywalları bazı bir T temperaturasına iye bolsa (227-súwret), onda C sańlaǵınan temperaturası tap sol T temperaturaǵa jaqın bolǵan absolyut qara deneniń nurlanıwına jaqın bolǵan nurlanıw shıǵadı.

Ámelde absolyut qara deneniń joqarıda keltirilgen modelin ádette qıyın balqıytuǵın metaldan islengen uzın hám jıńishke nay túrinde soǵadı. Jaqtılıqtıń qıya baǵıtta túsiwinde orın alatuǵın kóp qaytara shaǵılısıwlardı boldırmaw ushın sańlaqları bar bir qatar ótkellerdi ornalastıradı.

Naydı elektr qızdıırǵışınıń ishine jaylastıradı hám usı qızdarǵıştıń járdeminde naydıń diwiwalları biz qálegen bazı bir T temperaturasına shekem qızdırıladı. Naydıń bir ushınan shıqqan nurlanıw óziniń qásiyetleri boyınsha absolyut qara deneniń nurlanıwına usaydı. Usınday modeldiń járdeminde shama menen 3000 K temperaturasına shekemgi jarqınlıqtı alıwǵa boladı.



229-súwret. Absolyut qara deneniń jarqınlıǵın anıqlaw boyınsha ótkeriletuǵın tájiriypeniń sxeması.

229-súwrette absolyut qara deneniń jarqınlıǵınıń tolqın uzınlıqları boyınsha tarqalıwın anıqlawǵa múmkinshilik beretuǵın tájiriypeniń sxeması kórsetilgen. Bul sxemada A - absolyut qara deneniń xızmetin atqaratuǵın qızdırılatuǵın nay, L_1 - jaqtılıq dástesin B_1 nayınıń S_1 sańlaǵına jıynaytuǵın linza. B_1 nayı P prizmasına túsetuǵın parallel nurlardıń aǵısın beredi. P prizması hár qıylı uzınlıqtaǵı tolqınlardıń dástesin hár qıylı múyeshlerge buradı (281-paragrafqa qarańız)²⁴. B_2 nayınıń qanday múyeshke burılǵanlıǵına sáykes S_2 sańlaǵı arqalı belgili λ_1 menen $\lambda_1 + \Delta\lambda_1$ aralıǵındaǵı tolqın uzınlıqları uchastkasına sáykes keletuǵın jaqtılıq aǵısı ótedi. Bul aǵıs beti qaraǵa boyalǵan termoelementke kelip túsedı hám ol sol aǵıstıń energiyası ΔE_{λ_1} di ólsheydi. B_2 nayınıń basqa burılıw múyeshinde S_2 sańlaǵı arqalı belgili λ_2 menen $\lambda_2 + \Delta\lambda_2$ aralıǵındaǵı tolqın uzınlıqları uchastkasına sáykes keletuǵın basqa ΔE_{λ_2} shamasına teń bolǵan jaqtılıq aǵısı ótedi. 308-paragraftaǵı (3)-formula boyınsha bul aǵıslardıń qatnası $\Delta E_{\lambda_1}/\Delta E_{\lambda_2}$ deneniń nur shıǵarıw qábiletligi r_λ menen baylanıslı:

²⁴ Prizmanıń ornına burılıw múyeshiniń shaması boyınsha tolqın uzınlıǵın ólshewge múmkinshilik beretuǵın difrakciyalıq pánjereniń paydalangan qolaylı (270-paragraf). Biraq bunday almastırıw dúzilistiń principiallıq sxemasın ózgertpeydi.

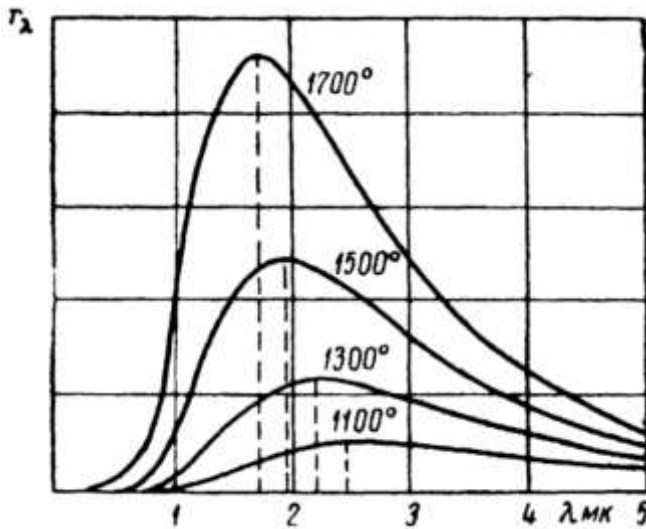
$$\frac{\Delta E_{\lambda_1}}{\Delta E_{\lambda_2}} = \frac{r_{\lambda_1}}{r_{\lambda_2}} \cdot \frac{\Delta \lambda_1}{\Delta \lambda_2}.$$

Bunnan,

$$\frac{r_{\lambda_1}}{r_{\lambda_2}} = \frac{\Delta E_{\lambda_1}}{\Delta E_{\lambda_2}} \cdot \frac{\Delta \lambda_2}{\Delta \lambda_1} \quad (2)$$

qatnasına iye bolamız.

Sonday jollar menen berilgen T temperaturasındaǵı hár qıylı tolqın uzınlıqları λ ler ushın absolyut qara deneniń nur shıǵarıwshılıq qábiletligi r_λ niń ayırım mánisleriniń alınıwı múmkin. Bunday tájiriybelerdi ótkergendegi qıyınshılıqlar qabıl etetuǵın ásbaptıń (termoparaniń) selektivliginen hám ásbaptıń optikalıq bólimi tárepinen qosılatuǵın mayısıwlardan qutılıwdıń joq ekenligi menen baylanıslı. Biraq, usınday jaǵdaylarǵa qaramastan, házirgi waqıtları absolyut qara deneniń jarqınlıǵınıń tolqın uzınlıqları boyınsha tarqalıwı jaqsı belgili. Berilgen T temperaturasındaǵı nur shıǵarıwshılıq qábiletligi r_λ niń tolqın uzınlıǵınan ǵárezligi 230-súwrette keltirilgen. Usı 230-súwrettegi hár qıylı iymeklikler hár qıylı temperaturalarǵa tiyisli. Kórinip turǵanıday, absolyut qara deneniń nurlandırıw qábiletligi r_λ temperaturaǵa baylanıslı tez ósedı.



230-súwret.

Absolyut qara deneniń jarqınlıǵınıń tolqın uzınlıqları boyınsha tarqalıwına sáykes keletuǵın iymeklikler.

Hár bir iymeklik bir maksimumǵa iye, ol temperaturanıń ósiwi menen qısqa tolqınlar tárepke qaray jılısadı hám ótkirirek túrge iye boladı. Bul iymekliklerdiń túri jarqınlıqtıń, soǵan sáykes denelerdiń jariqlıǵınıń temperaturanıń joqarılawına baylanıslı tez ósetuǵınlıǵı hám shıǵarılatuǵın jaqtılıqtıń reńiniń ózgeriw faktın jaqsı túsindiredi. Tómengi temperaturalarda nur shıǵarıw qábiletliginiń maksimumı úlken tolqın uzınlıqları oblastına sáykes keledi hám dene tiykarınan infraqızıl nurlardı nurlandıradı. Bunday jaǵdayda nurlardıń kózge kórinetuǵın nurlarǵa sáykes keletuǵın úlesiniń shaması júdá kishi hám, sonlıqtan, onı kóz qabıl etpeydi. Bir neshe júz gradus temperaturadaǵı nurlanıwdıń quramı usınday. SHama menen 600°C temperaturada kózge kórinetuǵın spektrdiń uzın tolqınlı shetine sáykes keletuǵın quwat kóriw sezimin payda etiw ushın jetkilikli boladı hám dene qarańǵı-qızıl reńdegi jaqtılıqtı shıǵaradı. Temperaturanıń bunnan bılay joqarılawı menen maksimum qısqa tolqınlar tárepke qaray jılısadı, kózge kórinetuǵın nurlarǵa sáykes keletuǵın quwattıń bólimi úlkeyedi hám dene shıǵarıp turǵan jaqtılıq kem-kemnen aq reńge ene baslaydı.

Absolyut qara dene kosinuslıq nurlandırıwshı bolıp tabıladı (304-paragraf). Sonlıqtan, absolyut qara deneniń energiyalıq jarqınlıǵı menen energiyalıq jariqlıǵınıń arasında ápiwayı qatnas orın aladı:

$$B_e = \frac{1}{\pi} R_e.$$

Tolqın uzınlıqlarınıń bir intervalına sáykes keletuǵın energiyalıq jarqınlıq r_λ (nur shıǵarıw qábiletligi) menen bir qatar da tolqın uzınlıqlarınıń bir birligine sáykes keletuǵın b_λ energiyalıq jarıqlıqtı da kirgiziwge boladı. b_λ shaması absolyut qara deneniń nur shıǵarıwshılıq qábiletligi r_λ menen mınaday qatnas boyınsha baylanısqa:

$$b_\lambda = \frac{1}{\pi} r_\lambda.$$

Bunnan absolyut qara deneniń energiyalıq jarıqlıǵınıń tolqın uzınlıqları boyınsha tarqalıwınıń onıń energiyalıq jarqınlıǵınıń tarqalıwına sáykes keletuǵınlıǵın kelip shıǵadı.

§ 310. Absolyut qara deneniń nurlanıw nızamları. Bunnan buringı paragraflarda ayılǵanlardan absolyut qara deneniń nur shıǵarıwınıń xarakteriniń onıń temperaturası T menen táriyiplenetuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Absolyut qara deneniń nurlandıırıwshılıq qábiletligi r_λ tolqın uzınlıǵı menen temperaturanıń belgili funkciyası bolıp tabıladı: $r_\lambda = f(\lambda, T)$. Tek termodinamikalıq kóz-qaraslardagı tallawlar bul funkciyanıń túrin anıqlawǵa múmkinshilik bermeydi. Biraq, termodinamikalıq tallawlardan absolyut qara deneniń nurlanıwı baǵınıwı kerek bolǵan bir qatar ulıwmalıq nızamlardı keltirip shıǵarıwǵa boladı. Birinshi nızam integrallıq jarqınlıqqa tiyisli: *absolyut qara deneniń integrallıq energiyalıq jarqınlıǵı R_e deneniń absolyut temperaturasınıń tórtinshi dárejesine proporcional ósedi*

$$R_e = \sigma T^4. \quad (1)$$

Bul nızamdı *Stefan-Bolcman nızamı* dep ataydı. Integrallıq jarqınlıq nur shıǵarıwshılıq qábiletligi r_λ menen 308-paragraftaǵı (4)-qatnas boyınsha baylanısqa bolǵanlıqtan, Stefan-Bolcman nızamın bilayınsha jazıwǵa boladı:

$$\int_0^\infty r_\lambda d\lambda = \sigma T^4. \quad (1a)$$

Ólshewler σ turaqlısı ushın mınaday mánisti beredi:

$$\sigma = 5,71 \cdot \frac{\text{erg}}{\text{sek} \cdot \text{sm}^2 \cdot \text{grad}^4} = 5,71 \cdot 10^{-12} \frac{vt}{\text{sm}^2 \cdot \text{grad}^4}.$$

230-súwrettegi grafiklerde integrallıq jarqınlıq sáykes nurlandıırıw qábiletliginiń tarqalıw iymekligi menen abscissa kósheriniń arasındagı maydan menen súwretlenedi.

Ekinshi nızam 230-súwrettegi nur shıǵarıwshılıq qábiletligi r_λ niń maksimumlardıń turgan orınlarına tiyisli. Vinniń awısıw nızamı dep atalatuǵın bul nızam boyınsha nur shıǵarıwshılıq qábiletligi r_λ diń maksimumına sáykes keletuǵın tolqın uzınlıǵı λ_{max} absolyut temperaturaǵa keri proporcional ózgeredi:

$$\lambda_{max} = \frac{C'}{T}. \quad (2)$$

Bul teńlikte C' arqalı belgili bolǵan konstanta belgilengen.

Absolyut qara deneniń temperaturası qanshama joqarı bolsa, nur shıǵarıwshılıq qábiletligi r_λ diń maksimumına sáykes keletuǵın tolqın uzınlıǵı λ niń shaması kishi boladı. Ólshewler C' turaqlısı ushın mınaday sanlı mánisti beredi:

$$C' = 2886 \text{ mkm} \cdot \text{grad}.$$

Vin nızamınan nurlanıwdıń maksimumı sáykes keletuǵın λ_{max} tolqın uzınlıǵınıń mikronlardagı mánisiniń mınaday bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı:

$$\lambda_{max}(\text{mkm}) = \frac{2886}{T}. \quad (2a)$$

Bul teńlikte T temperaturalardıń absolyut shkalasında ólshengen. (2a) qatnastan temperaturanıń ámelde jetiw bolǵan mánislerinde absolyut qara deneniń nurlandıırıw qábiletliginiń maksimumına sáykes keletuǵın tolqın uzınlıǵınıń infraqızıl oblastta jatatuǵınlıǵın kóriwge boladı. 3000 K temperaturada nurlanıw qábiletliginiń maksimumı spektrdiń kózge kórinetuǵın sheginiń sırtında, $\lambda = 0,96 \text{ mkm}$ shamasınıń qasında jatadı. Tek 5000 K temperaturada

ğana maksimum spektrdiń sarı-jasıl oblastına kiredi ($\lambda_{max} = 0,577$ mkm). 7200 K nen joqarı temperaturalarda maksimum ultrafiolet oblastta jatadı.

Úshinshi nızam absolyut qara deneniń maksimum nurlandıırwshılıq qábiletligi $r_{\lambda_{max}}$ shamasınıń absolyut qara deneniń temperaturasınıń besinshi dárejesine proporcional ósetuǵınlıǵın kórsetedi:

$$r_{\lambda_{max}} = C'' T^5. \quad (3)$$

Ólshewler C'' ushın mınaday san mánisti beredi:

$$C'' = 1,301 \cdot 10^{-15} \frac{vt}{cm^2 \cdot mkm \cdot grad^5}.$$

X kesteде absolyut qara deneniń hár qıylı temperaturalardaǵı integrallıq jarqınlıǵınıń hám jariqlıǵınıń mánisleri keltirilgen.

X kestden absolyut qara deneniń jarqınlıǵınıń temperaturanıń ósiwi menen júdá tez ósetuǵınlıǵın hám joqarı temperaturalarda júdá úlken bolǵan mánislerge iye bolatuǵınlıǵın kórinip tur. 6000 K temperaturalarda absolyut qara deneniń betiniń hár bir kvadrat santimetrinen 7399 vt, yaǵnıy 10 "at kúshinen" artıǵıraq quwatlıqqa iye aǵıs shıǵadı.

X keste.

Kelvinlerdegi temperatura	Mikronlardaǵı λ_{max}	vt/sm^2 lardaǵı energiyalıq jarqınlıq	lm/sm^2 lardaǵı jarqınlıq	Sb lardaǵı jariqlıq
1200	2,405	11,84	0,0452	0,0144
1600	1,804	37,41	6,55	2,08
2000	1,443	91,34	139,1	44,2
3000	0,962	462,4	888,1	2824
4000	0,721	1461	$7,351 \cdot 10^4$	$2,338 \cdot 10^4$
5000	0,577	3568	$2,642 \cdot 10^5$	$3,402 \cdot 10^4$
6000	0,481	7399	$6,230 \cdot 10^5$	$1,931 \cdot 10^5$
8000	0,361	23 384	$1,830 \cdot 10^6$	$5,819 \cdot 10^5$
10000	0,289	57 090	$3,503 \cdot 10^6$	$1,114 \cdot 10^5$

§ 311. Absolyut qara deneniń jarqınlıǵınıń tolqın uzınlıqları boyınsha tarqalıwı. Moskvalı fizik V.A.Mixelson birinshi bolıp eksperimentallıq iymekliklerdi qanaatlandıratuǵın $r_\lambda = f(\lambda, T)$ funkciyasınıń analitikalıq túrin anıqlawǵa tırıstı. Biraq, funkciyanıń ol tapqan funkciyanıń túri 310-paragraftaǵı (1)-, (2)- hám (3)-termodinamikalıq nızamlardı qanaatlandırmadı.

XIX ásirdeń aqırında statistikalıq fizikadaǵı energiyanıń erkinlik dárejeleri boyınsha teńdey tarqalıwı talabınan kelip shıqqan halda Reley hám Djins $r_\lambda = f(\lambda, T)$ funkciyasınıń túrin anıqlawǵa tırıstı. Diywalları ideal shaǵıtıstıratuǵın hám ishinde elektromagnit nurlar bar bolǵan jabıq ıdıstı kóz aldımızǵa elesleteyik. Diywallardaǵı shaǵılısıwlarıń nátiyjesinde ıdısta sheksiz kóp sanlı turǵın tolqınlar payda boladı. Eger nurlanıw T temperaturasına sáykes keletuǵın teń salmaqlıq bolsa, onda energiyanıń erkinlik dárejeleri boyınsha tarqalıwı nızamı boyınsha hár bir menshikli terbelis ushın T ǵa proporcional birdey energiyanıń sáykes keliwi kerek. Elektromagnitlik tolqınlarǵa energiyanıń eki túri sáykes keledi - elektrlik hám magnitlik. Sonlıqtan, hár bir menshikli terbeliske $2 \cdot \frac{1}{2} kT = kT$ energiyasınıń sáykes keliwi kerek. Bul teńlikte k arqalı Bolcman turaqlısı belgilengen (qattı denedegi bólekshelerdiń hár bir terbelmeli erkinlik dárejesine terbelislerdiń kinetikalıq hám potentsiallıq energiyalarınıń bar bolatuǵınlıǵına baylanıslı kT energiyasınıń sáykes keletuǵınlıǵı sıyaqlı). Biz qarap atırǵan kólemi V ǵa teń bolǵan absolyut

shashıratatuǵın diywalları bar ıdıstır ishinde payda bolǵan menshikli terbelislerdiń sanı sol V kólemge iye bolǵan tutas ortalıq terbele alatuǵın menshikli terbelislerdiń sanına teń. Menshikli terbelislerdiń sanı Reley hám Djins tárepinen esaplandı. Olar ıdıstır ishindegi tolqın uzınlıqlarınır $d\lambda$ intervalına sáykes keletuǵın nurlanıw energiyasınıń tıǵızlıǵı ushın mınaday ańlatpanı aldı:

$$u_\lambda = 8\pi kT \lambda^{-4} d\lambda. \quad (1)$$

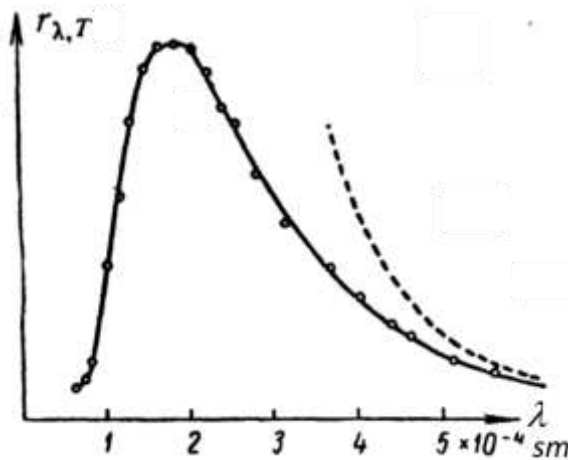
(1)-formulanı Reley-Djins formulası dep ataydı. ν jıyilikleri shkalasında bul formula mınaday túrge iye boladı:

$$u_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} kT d\nu. \quad (1a)$$

Reley-Djins formulanıń aqılǵa muwapıq kelmeytuǵın nátiyjege alıp keletuǵının ańsat kóriwge boladı: energiyanıń integrallıq tıǵızlıǵınıń shaması sheksizlikke teń bolıp shıǵadı. Haqıyqatında da, nurlanıw energiyasınıń integrallıq tıǵızlıǵı U ushın mınanı alamız:

$$U = \int_0^\infty u \cdot d\nu = \frac{8\pi kT}{c^3} \int_0^\infty \nu^2 \cdot d\nu = \infty.$$

Bul deneler menen nurlanıwdır arasındaǵı teń salmaqlıqtır nurlanıwdır sheksiz úlken tıǵızlıǵında orın alatuǵınlıǵın ańǵartadı. Bul jaǵday tájiriyyede alınǵan jaǵdaylarǵa keskin qayshı keledi. Absolyut qara deneniń Reley-Djins formulasına sáykes keletuǵın jarqınlıǵınıń tarqalıw iymekligi tolqın uzınlıǵınıń kishireyiwi menen monotonlıq hám tez ósiwdi beredi. Al, haqıyqatında, absolyut qara deneniń jarqınlıǵınıń spektr boyınsha tarqalıwı qońıraw túrizli túrge iye boladı (230-súwret). Tek 1900-jılı ǵana Plankke tájiriyyelerde alınǵan maǵlıwmatlarǵa sáykes keletuǵın hám 310-paragraftaǵı (1)-, (2)- hám (3)-termodinamikalıq nızamlar dara jaǵdayı bolıp tabılatuǵın $f(\lambda, T)$ funkciyasınıń túrin tabıwdır sáti tústi.



231-súwret.

Ekspirimentallıq maǵlıwmatlardı Plank hám Reley-Djins formulaları menen salıstırıw.

Plank boyınsha

$$r_{\lambda, T} = f(\lambda, T) = 2\pi h c^2 \frac{\lambda^{-5}}{e^{hc/kT\lambda} - 1} \quad (2)$$

nızamı orınlı boladı. Bul nızamda c - jaqtılıqtır tezligi, k - Bolcman turaqlısı, h - jańa turaqlı. Onıń mánisi $h = 6,624 \cdot 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{sek}$. Bul turaqlını Plank turaqlısı dep ataydı. 231-súwrettegi tutas iymeklik $T = 1600 \text{ K}$ temperatura ushın Plank formulasına sáykes keledi; noqatlar sol temperatura ushın ótkerilgen eksperimentlerde alınǵan nátiyjelerdi súwretleydi; punktir menen sızılǵan iymeklik Reley-Djins formulası beretuǵın tarqalıw funkciyasın sáwlelendiredi. Solay etip, eksperiment haqıyqatlıqtır Reley-Djins formulasına emes, al (2)-formulaǵa sáykes keletuǵınlıǵın ayqın túrde kórsetedi. Biraq, (2)-formulanı keltirip shıǵarıw ushın Plankke klassikalıq kóz-qaraslar ushın jat bolǵan boljawdı usınıwǵa, atap aytqanda jaqtılıq energiyanıń $\varepsilon = h\nu$ shamasına teń

porciyaları túrinde bólek-bólek nurlandırıladi dep esaplawğa tuwrı keldi, bul teńlikte ν - nurlanıwdıń jıyılıgı, al h - Plank turaqlısı.

Durıslığı kóp sanlı tájiriybeler tárepinen tastıyqlanğan hám jaqtılıqtıń tábiyatı hám atomlardıń ishindegi processlerdiń tábiyatı haqqındaǵı biziń kóz-qaraslarımızdıń rawajlanıwında oǵada áhmiyetli orındı iyeleytuǵın bul boljawda biz tómende toqtaymız (XXIX hám XXX baplar).

Eger, absolyut qara deneniń spektri boyınsha energıyanıń tarqılıwın jıyilikler shkalasında kórsetetuǵın bolsaq, onda $r_{\lambda,T}$ nıń ornına jıyiliklerdiń bir birlik intervalına sáykes keletuǵın $r_{\nu,T}$ jarqınlıǵın kirgiziwge tuwrı keledi. Bunday jaǵdayda

$$dR = r_{\nu,T} d\lambda = r_{\nu,T} d\nu. \quad (3)$$

$\lambda = \frac{c}{\nu}$ teńligi orınlı bolǵanlıqtan, c - jaqtılıqtıń boslıqtaǵı tezligi, $|d\lambda| = \frac{c}{\nu^2} d\nu$ teńligin paydalanamız hám (3)-ańlatpadan

$$r_{\nu,T} = r_{\lambda,T} \frac{|d\lambda|}{d\nu} = r_{\lambda,T} \frac{c}{\nu^2}$$

teńligine iye bolamız.

$r_{\nu,T}$ menen $r_{\lambda,T}$ arasındaǵı usı qatnastı paydalanıp, jıyilikler shkalası ushın Plank formulasına mınaday ańlatpanı tabamız:

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi h}{c^2} \cdot \frac{\nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1}. \quad (4)$$

Úlken jıyilikler oblastı ushın $h\nu \gg kT$ hám usıǵan sáykes (4)-formulanıń bólimindegi 1 di esapqa almawǵa boladı hám bunday jaǵdayda juwıq túrdegi

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} e^{-h\nu/kT} \quad (4a)$$

formulanı alamız. Tap sonday jollar menen $\lambda T \ll hc/k$ teńsizligi orınlanatuǵın jaǵdaylar ushın (2)-formuladan juwıq túrdegi

$$r_{\lambda,T} = C_1 \lambda^{-5} e^{-C_2/\lambda T} \quad (5a)$$

formulaǵa iye bolamız. Bul formuladarda qısqaalıq ushın $2\pi hc^2$ hám hc/k shamaları sáykes C_1 hám C_2 arqalı belgilengen. Olar mınaday san mánislerine iye: $C_1 = 3,70 \cdot 10^{-5} \text{ erg}\cdot\text{sm}^2/\text{sek}$ hám $C_2 = 1,433 \text{ sm}\cdot\text{grad}$.

(5)- hám (5a) formulalardıń absolyut qara deneniń nurlandıruw qábiletligi iymekliginiń maksimumǵa salıstırǵanda kishi tolqın uzınlıqlarında jetetuǵın bólimin juwıq túrde kórsetiwge jaraytuǵınlıǵın ańsat kórsetiwge boladı.

310-paragraftaǵı (1)-, (2)- hám (3)-nızamlardıń Plank formulasınan kelip shıǵatuǵınlıǵın ańsat tekserip kóriwge boladı. Onıń ushın (2)- Plank formulasına jańa $x = C_2/\lambda T$ ózgeriwshisin kirgizemiz hám $2\pi hc^2$ shamasın C_1 arqalı belgileybiz. Bunday jaǵdayda

$$r_{\lambda,T} = f(x) = \frac{C_1 T^5}{C_2^5} \cdot \frac{x^5}{e^x - 1} \quad (6)$$

formulasına iye bolamız.

Bunnan integrallıq energiyalıq jarqınlıq R_e ushın mınaday ańlatpanıń orınlı ekenligin tabamız:

$$R_e = \int_0^\infty r_{\lambda,T} d\lambda = \frac{C_1 T^4}{C_2^4} \int_0^\infty \frac{x^3}{e^x - 1} dx.$$

Bul ańlatpanıń oń tárepinde turǵan anıq integral mınaday mániske iye:

$$\int_0^\infty \frac{x^3}{e^x - 1} dx = 6,4939.$$

Bunnan

$$R_e = 6,4939 \frac{C_1}{C_2^4} T^4$$

teńligine iye bolamız. $6,4939 \frac{C_1}{C_2^4}$ shamasın σ arqalı belgilep,

$$R_e = \sigma T^4$$

formulasın alamız hám onıń 310-paragraftaǵı (1)-formulasınıń járdeminde berilgen Stefan-Bolcman nızamı ekenligin ańǵaramız.

310-paragraftaǵı (2)- hám (3)-nızamlardı keltirip shıǵarıw ushın (6)-teńlik penen beriletuǵın $f(x)$ funkciyasınıń maksimumın tabamız. $f(x)$ funkciyasınan tuwındı alıp hám onı nolge teńlestirip, mınaday ańlatpaǵa iye bolamız:

$$f'(x) = \frac{5x^4(e^x - 1) - x^5 e^x}{(e^x - 1)^2} = 0.$$

Bunnan

$$5(e^x - 1) - x e^x = 0$$

teńlemesi kelip shıǵadı. Bul transcendent teńlemeniniń sheshimi

$$x_{max} = 4,9650$$

bolıp tabıladı. Bul sheshim $f(x)$ funkciyasınıń maksimumına sáykes keledi. Bunnan iymekliktiń maksimumınıń koordinataları bolǵan λ_{max} menen $r_{\lambda_{max}}$ shamalarınń mınalargá teń ekenligin tabamız:

$$\lambda_{max} = \frac{C_2}{x_{max} T} = \frac{C_2}{4,9650} \cdot \frac{1}{T}$$

$$r_{\lambda_{max}} = \frac{C_1 T^5}{C_2^5} \cdot \frac{(4,9650)^5}{e^{4,9650} - 1} = 21,202 \frac{C_1}{C_2^5} T^5.$$

$\frac{C_2}{4,9650}$ hám $21,202 \frac{C_1}{C_2^5}$ shamaların sáykes C' hám C'' arqalı ańlatıp,

$$\lambda_{max} = \frac{C'}{T}$$

hám

$$r_{\lambda_{max}} = C'' T^5$$

formulaların alamız hám olardıń 310-paragraftaǵı termodinamikalıq (2)- hám (3)-formulalarǵa sáykes keletuǵınlıǵın ańǵaramız.

$$\xi = \frac{\lambda}{\lambda_{max}}, \quad \eta = \frac{r_{\lambda}}{r_{\lambda_{max}}} \quad (7)$$

salıstırmalı koordinataların kirgiziw jolı menen (2)- Plank formulasın túrlendiriwge boladı. Bul teńliklerde λ_{max} hám $r_{\lambda_{max}}$ arqalı energiyanıń spektr boyınsha tarqalıw iymekliginiń maksimumınıń koordinataları belgilengen. λ_{max} hám $r_{\lambda_{max}}$ shamalarınń olardıń (2)- hám (3)-ańlatpalar boyınsha mánislerin qoyıp,

$$\lambda = \lambda_{max} \xi = \frac{C'}{T} \xi$$

hám

$$r_{\lambda} = r_{\lambda_{max}} \eta = C'' T^5 \eta$$

ańlatpalarına iye bolamız.

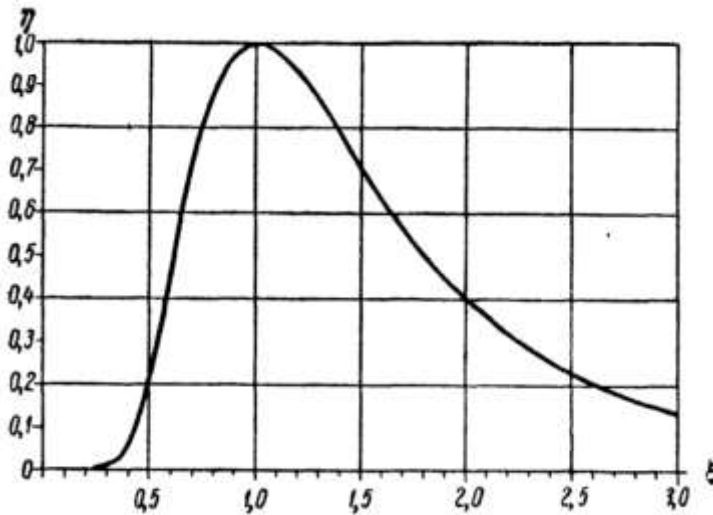
λ menen r_{λ} shamalarınń bul mánislerin (2)-formulaǵa qoyıw jolı menen keltirilgen túrdegi Plank formulasın alamız:

$$\eta = \frac{C_1}{C'' C'^5} \cdot \frac{\xi^{-5}}{e^{C_2/C' \xi} - 1}. \quad (8)$$

Eger bul formulaǵa C_1 , C_2 , C' hám C'' shamalarınń san mánislerin qoysaq, onda (8)-formula mınaday túrge enedi:

$$\eta = 142,32 \frac{\xi^{-5}}{e^{4,9650/\xi} - 1}. \quad (8a)$$

(8)- hám (8a) formulalar T temperaturaǵa ayqın túrde iye emes. Olar 232-súwrettegi durıs masshtablarda súwretlengen iymeklikti beredi. Iymeklik $\xi_{max} = 1$ hám $\eta_{max} = 1$ bolǵan jaǵdayda maksimumdı beredi.



232-súwret.
Plank tarqalıwınıń keltirilgen
koordinatalardaǵı iymekligi.

Endi, absolyut qara deneniń nurlanıwınıń quwatınıń qanday bóliminiń λ_1 den λ_2 ge shekemgi tolqın uzınlıqlarınıń intervalına sáykes keletuǵınıń anıqlaymız. Álbette, bul bólimniń shaması

$$k = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} r_{\lambda} d\lambda} = \frac{\int_{\xi_1}^{\xi_2} \eta d\xi}{\int_0^{\infty} \eta d\xi} \quad (9)$$

teńliginiń járdeminde anıqlanadı. Bul teńlikte λ_1 hám λ_2 tolqın uzınlıqlarına sáykes keletuǵın ξ shamasınıń mánisleri ξ_1 menen ξ_2 arqalı belgilengen.

$\int_{\xi_1}^{\xi_2} \eta d\xi$ integralın bilayınsha kórsetiwge boladı:

$$\int_{\xi_1}^{\xi_2} \eta d\xi = \int_0^{\xi_2} \eta d\xi - \int_0^{\xi_1} \eta d\xi. \quad (10)$$

Tómendegidey belgilewdi kirgizemiz:

$$\psi(\xi) = \frac{\int_0^{\xi} \eta d\xi}{\int_0^{\infty} \eta d\xi}. \quad (11)$$

Bunday jaǵdayda (10)- hám (11)-teńliklerdiń tiykarında tolqın uzınlıqlarınıń λ_1 den λ_2 ge shekemgi intervalına sáykes keletuǵın nurlanıwdıń bóliminiń úlesi ushın mınaday ańlatpanı alamız:

$$k = \psi(\xi_2) - \psi(\xi_1). \quad (12)$$

$\psi(\xi)$ funkciyası mánisin (11)-formula boyınsha esaplawǵa bolatuǵın ξ shamasınıń funkciyası bolıp tabıladı. Durıs masshtabtaǵı bul funkciyanıń túri 233-súwrette keltirilgen.

232- hám 233-súwretlerde keltirilgen iymeklikler absolyut qara deneniń nurlanıwına tiyisli bolǵan máselelerdi sanlı túrde sheshiwge múmkinshilik beredi. Tómendegidey úsh mısaldı qaraymız.

1-mısal. Absolyut qara deneniń jarqınlıǵı r_{λ} niń $T = 5000$ K temperaturadaǵı spektrdiń qızıl shegarasınan ($\lambda_1 = 0,76$ mkm) sarı-jasıl bólimniń ortasına ($\lambda_2 = 0,58$ mkm) shekem qansha shamaǵa ózgeretuǵınıń anıqlańız.

310-paragraftaǵı (2a) Vin nızamı boyınsha $T = 5000$ K temperaturadaǵı nurlanıwdıń maksimumı ushın tolqın uzınlıǵınıń mánisin tabamız:

$$\lambda_{max} = \frac{2886}{T} = \frac{2886}{5000} \text{ mkm} = 0,577 \text{ mkm}.$$

λ_{max} shamasınıń bul mánisi boyınsha (7)-ańlatpa boyınsha ξ diń mánisin tabamız:

$$\xi = \frac{\lambda}{\lambda_{max}} = \frac{\lambda}{0,577} = 1,72 \lambda.$$

Bunnan $\lambda_1 = 0,76$ mkm shamasınıń $\xi_1 = 1,72 \cdot 0,76 = 1,31$ shamasına, al $\lambda_2 = 0,58$ mkm shamasınıń $\xi_2 = 1,72 \cdot 0,58 = 1,00$ shamasına sáykes keletuǵınıń kelip shıǵadı. ξ_1 menen ξ_2 shamalarınń bul mánisleri boyınsha 232-súwrette keltirilgen iymeklik boyınsha $\eta_1 = 0,86$ hám $\eta_2 = 1,00$ shamaların alamız. Bunnan jarqınlıqlardıń qatnası ushın

$$\frac{r_{\lambda_1}}{r_{\lambda_2}} = \frac{\eta_2}{\eta_1} = \frac{1,00}{0,86} = 1,16$$

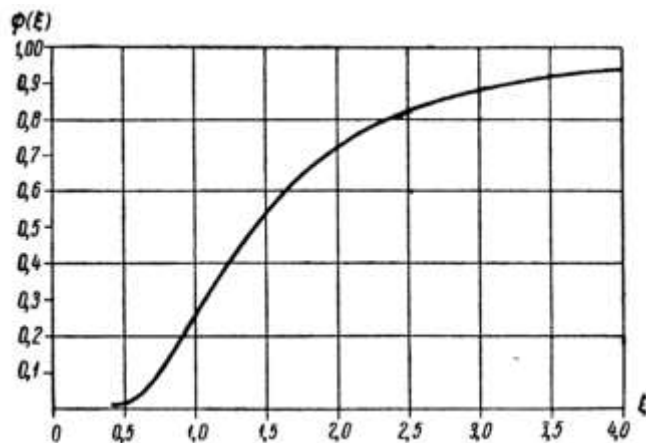
shamasın alamız. Solay etip, 5000 K temperaturada spektrdiń qızıl ushınan onıń sarı-jasıl oblastına ótkende absolyut qara deneniń jarqınlıǵınıń 1,16 ese úlkeyetuǵınlıǵın tabamız.

2-mısal. $T = 5000$ K temperaturadaǵı absolyut qara deneniń spektriniń kózge kórinetuǵın bólimine ($\lambda_1 = 0,40$ mkm, $\lambda_2 = 0,76$ mkm) ulıwmalıq quwattır qanday bóliminiń sáykes keletuǵınlıǵın anıqlańız.

Bunnan aldırǵı mısaldaǵıday, $\xi_1 = 0,69$ hám $\xi_2 = 1,31$ shamaların tabamız. ξ_1 hám ξ_2 shamalarınıń bul mánisleri boyınsha $\psi(\xi)$ funkciyası ushın $\psi(\xi_2) = 0,44$ hám $\psi(\xi_1) = 0,07$ shamaların alamız. Bunnan quwatlardıń qatnası ushın (12)-ańlatpadan mınanı tabamız:

$$k = \psi(\xi_2) - \psi(\xi_1) = 0,44 - 0,07 = 0,37.$$

k nıń tabılǵan mánisi $T = 5000$ K temperaturadaǵı absolyut qara deneniń spektrindegı kózge kórinetuǵın oblastqa onıń nurlandıratuǵın ulıwmalıq quwatınıń 37 procentiniń sáykes keletuǵınlıǵın ańǵartadı.



233-súwret.

0 den berilgen λ ge shekemgi tolqın uzınlıqları intervalına sáykes keletuǵın absolyut qara deneniń nurlanıwınıń salıstırma quwatınıń iymekligi.

3-mısal. Temperaturanı 3000 K dan 5000 K ǵa shekem kótergende absolyut qara deneniń spektrindegı barlıq infraqızıl oblastqa ($\lambda \geq 0,76$ mkm) sáykes keletuǵın quwattır neshe ese ózgeretuǵınlıǵın tabırız.

$\psi(\xi)$ funkciyası $\xi = 0$ shamasınan berilgen ξ shamasına shekemgi oblastqa sáykes keletuǵın quwattır úlesin beredi. Bunnan berilgen ξ den $\xi = \infty$ ge shekemgi oblastqa sáykes keletuǵın quwattır úlesiniń

$$\psi'(\xi) = 1 - \psi(\xi)$$

shaması menen ańlatılatuǵınlıǵına kóz jetkeremiz.

Vin nızamına sáykes $T_1 = 3000$ K temperaturada $\lambda_{max} = 0,962$ mkm. Bunnan usınday temperaturada $\lambda = 0,76$ mkm tolqın uzınlıǵına $\xi_1 = \frac{0,76}{0,962} = 0,79$ shamasınıń sáykes keletuǵınlıǵın tabamız. $T_1 = 5000$ K temperaturada (1-mısalgá qarańız): $\lambda_{max} = 0,577$ mkm, $\xi_2 = 1,31$ shamalarına iye bolamız. Al, 233-súwrette keltirilgen maǵlıwmatlar boyınsha ξ_1 menen ξ_2 shamaları ushın mınalardı tabamız:

$$\psi'(\xi_1) = 1 - \psi(\xi_1) = 1 - 0,12 = 0,88;$$

$$\psi'(\xi_2) = 1 - \psi(\xi_2) = 1 - 0,44 = 0,56.$$

Solay etip, $T_1 = 3000$ K temperaturada infraqızıl oblast ushın nurlanıwdıń ulıwmalıq quwatınıń 0,88, al $T_1 = 5000$ K temperaturada 0,56 bólimi sáykes keledi eken. Stefan-Bolcman nızamı boyınsha nurlanıwdıń ulıwmalıq quwatı T^4 ke proporcional ózgeretuǵın bolǵanlıqtan, infraqızıl nurlanıwdıń biz izlep atırǵan quwatı

$$\frac{0,56}{0,88} \cdot \frac{5000^4}{3000^4} \cong 4,9$$

ese ósedi eken.

Bul mısalda mınaday jaǵday kórinip tur: temperatura 3000 K shamasınan 5000 K shamasına joqarılaǵanda nurlanıwdıń maksimumı infraqızıl oblasttan ($\lambda = 0,962$ mkm) kózge kórinetuǵın ($\lambda = 0,962$

mkm) oblastqa jiljiyтуғınlıǵına qaramastan barlıq infraqızıl oblastqa sáykes keletuǵın quwattırń ádewir (derlik bes ese) úlkeyetuǵınlıǵın kóremiz.

Plank formulasın absolyut qara deneniń tek jarqınlıǵı ushın ǵana emes, al teń salmaqlıq nurlanıwdırń tıǵızlıǵı ushın da paydalanıwǵa boladı. Absolyut qara diywallarǵa iye hám T temperaturasındaǵı jabıq ıdıtı qaraymız. Teń salmaqlıq ornaǵanda ıdıtırń ishindegi keńislik belgili tıǵızlıqqa hám energiyanıń jiyilikler boyınsha belgili bolǵan tarqalıwına iye nurlanıw menen tolǵan boladı. Esaplawlar bunday teń salmaqlıq nurlanıw ushın ν den $\nu + d\nu$ intervalına sáykes keletuǵın jaqtılıq energiyasınıń taǵızlıǵınıń mınaǵan teń ekenligin kórsetedi:

$$u_\nu = \frac{8\pi h}{c^3} \cdot \frac{\nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1} d\nu.$$

Bul formulada T - ishindegi nurlanıw menen teń salmaqlıqta turǵan ıdıtırń diywallarınıń temperaturası. Kórinip turǵanıday, teń salmaqlıq nurlanıwdırń energiyasınıń tıǵızlıǵına sáykes keletuǵın iymekliktiń absolyut qara deneniń energiyalıq jarqınlıǵına sáykes keletuǵın iymeklik penen birdey túrge iye boladı. Sonlıqtan usınday nurlanıwdırń ózin "absolyut qara" dep ataydı. Absolyut qara nurlanıw ushın energiyanıń tıǵızlıǵı menen onıń jiyilikler boyınsha tarqalıwı temperatura T boyınsha bir mánisli anıqlanatuǵın bolǵanlıqtan, T nıń ózin *nurlanıwdırń temperaturası* dep ataydı. Nurlanıw temperaturası túsiniǵı birinshi ret 1893-jılı B.B.Golicin tárepinen kirgizildi.

Jabıq quwıslıqtırń ishinde absolyut qara nurlanıwdırń payda bolıwı ushın, onıń diywallarınıń absolyut qara bolıwınıń zárúrligi joq. Kirxgof nızamı boyınsha qálegen dene ushın nur shıǵarıwshılıq uqıplıǵı menen nurdı jutiwshılıq uqıplıǵınıń qatnası absolyut qara dene ushın jazılǵan tap usınday qatnasqa teń, sonıń ushın jabıq quwıslıqtırń ishindegi teń salmaqlıq nurlanıwdırń quramı diywallardıń tábiyatınan ǵárezsiz birdey boladı. Tek ǵana barlıq jiyilikler ushın jutiw qábiletliginiń nolden ózgeshe bolıwı áhmiyetli. Eger ishinde absolyut qara nurlanıw bar jabıq ıdıtı sańlaq payda etsek, onda sańlaqtırń ishinde energiya boyınsha qanday tarqalıw orın alatuǵın bolsa, usı sańlaq arqalı tap sonday boyınsha energiya boyınsha tarqalıwǵa iye dáste shıǵadı. Tap usınday derlik jabıq bolǵan ıdıs absolyut qara deneniń modeli bolıp tabılatuǵınlıǵın atap aytamız. Usınday derek tárepinen shıǵarılatuǵın jaqtılıqtırń dástesi ushın nurlanıwdırń temperaturası túsiniǵın saqlawǵa boladı.

Álbette, nurlanıw temperaturası túsiniǵın tek (13)-formula boyınsha tarqalıwǵa iye ("Plank" tarqalıwına iye) bolǵan dáste ushın ǵana qollanıwǵa boladı. Eger absolyut qara dene tárepinen shıǵarılǵan jaqtılıq dástesi energiyanıń tarqalıwın ózgetetuǵın qanday da bir jutiwshı zat arqalı ótse, onda ótken dástege temperatura túsiniǵın qollanıwǵa bolmaydı. Tap sol sıyaqlı, jaqtılıq dástesi qanday da bir qara emes dene tárepinen teń salmaqlıq bolmaǵan jaǵdayda shıǵarılatuǵın bolsa, onda energiyanıń tarqalıwı (13)-formula boyınsha energiyanıń tarqalıwınan basqasha bolıp shıǵadı hám bunday dástege temperatura túsiniǵın qollanıwǵa bolmaydı.

§ 312. Jaqtılıqtırń derekleri. Házirgi zamandaǵı jaqtılıqtırń tiykarǵı derekleri bolıp qızdırılǵan qattı deneler xızmet etedi²⁵. Bunday deneler absolyut qara bolmaǵanlıqtan hám nurlanıw teń salmaqlıq bolmaǵan jaǵdayda júzege keletuǵın bolǵanlıqtan, olar tárepinen nurlandırılatuǵın jaqtılıqtırń quramın anıqlaw kerek boladı.

Kirxgof nızamı boyınsha qara emes dene ushın tolqın uzınlıqlarınıń bir birlik intervalı ushın nurlandırw qábiletligi

$$r'_\lambda = a_\lambda r_\lambda \quad (1)$$

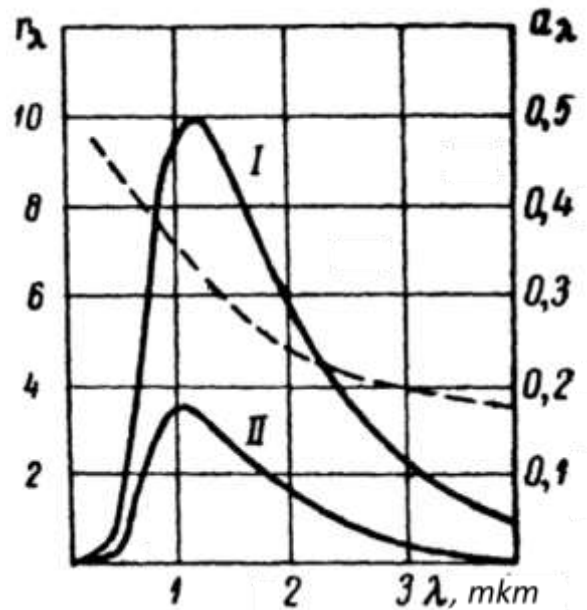
anlatpasınıń járdeminde anıqlanadı. Bul formulada a_λ arqalı biz qarap atırǵan deneniń jutiw qábiletligi, al r_λ arqalı tap sol temperaturadaǵı hám tolqın uzınlıqlarınıń tap sol intervalına tiyisli absolyut qara deneniń jutiw qábiletligi belgilengen.

Barlıq qara emes deneler ushın $a_\lambda < 1$ hám sonlıqtan: *barlıq qara emes denelerdiń nurlandırw qábiletligi sol temperaturadaǵı absolyut qara deneniń nurlandırw qábiletliginen kishi*. Absolyut qara dene berilgen temperaturada múmkin bolǵan maksimallıq nurlandırw qábiletligine iye.

²⁵ Bul kitaptırń XX ásirde jazılǵanlıǵın názerde tutıw kerek. Házirgi waqıtları kósherlerdi, ójirelerdi, basqa da orınlarda jaqtılandırıw ushın qızdırıw lampaları pútkilley qollanılmaydı (Awdarıwshılar).

234-súwret.

Absolyut qara deneniń (*I*) hám wolframnıń (*II*) jarqınlıqlarınıń tarqalıwların salıstırıw; punktir sıziq wolframnıń jutıw qábiletligin beredi.



Eger bazı bir dene ushın a_λ nıń mánisi 1 den kishi, Biraq barlıq λ ler ushın turaqlı bolsa, onda bunday deneni *sur dene* dep ataydı. Tábiyatta qásiyeti sur deneniń qásiyetine dál sáykes keletuǵın deneler bolmaydı, Biraq tolqın uzınlıqlarınıń sheklengen oblastında denelerdiń qásiyetleri sur denelerdiń qásiyetlerine jaqın bolıwı múmkin. Is júzinde uglevodorodlardıń, mısalı acetilinniń jalını "sur" boladı. Sur dene ushın nurlanıw energiyasınıń tarqalıwı sol temperaturadaǵı absolyut qara deneniń spektrindegı tarqalıw menen birdey, Biraq bettiń maydanınıń bir birliginen nurlandırılatuǵın quwat kishi boladı. Qara de emes, sur da emes barlıq haqıyqıy deneler ushın olardıń jutıw qábiletligi a_λ tolqın uzınlıǵınan hám temperaturadan, sonıń menen birge nurlardıń polarizaciya halınan hám túsiw múyeshiniń shamasınan ǵárezli. Bunday denelerdiń spektrindegı tarqalıw iymekligi Plank iymekliginen ayrıladı. 234-súwrette *I* iymekligi absolyut qara deneniń jarqınlıǵınıń $T = 2100$ K temperaturadaǵı tolqın uzınlıqları boyınsha tarqalıwı kórsetilgen, *II* iymeklik wolframnıń jarqınlıǵınıń tarqalıwın, al punktirlik iymeklik - tap sol temperaturadaǵı wolframnıń jutıw qábiletligin beredi. Kórinip turǵanıday, wolframnıń jutıw qábiletligi qısqa tolqınlarda úlken, al uzın tolqınlarda kishi. Usı jaǵdayǵa sáykes, wolframnıń jarqınlıǵı qısqa tolqınlar ushın absolyut qara deneniń jarqınlıǵınan az shamaǵa ayrıladı, al uzın tolqınlardaǵı wolframnıń jarqınlıǵı menen absolyut qara deneniń jarqınlıǵınıń arasındaǵı ayırma úlken. Sonlıqtan wolframnıń nurlanıwınıń reńi absolyut qara deneniń nurlanıwınıń reńinen ózgeshe: wolframnıń nurlanıwında sol temperaturadaǵı absolyut qara deneniń nuralanıwına salıstırǵanda qızıl reń kishirek boladı. Al jarıqlıqqa keletuǵın bolsaq, onda wolfram ushın barlıq tolqın uzınlıqlarındaǵı jarıqlıq absolyut qara deneniń jarıqlıǵına salıstırǵanda kishi.

Barlıq tolqın uzınlıqları ushın tábiyatta bar barlıq denelerde $a_\lambda < 1$, sonlıqtan olardıń integrallıq jarqınlıǵı da absolyut qara deneniń integrallıq jarqınlıǵınan kem. Eger absolyut qara deneniń integrallıq jarqınlıǵı

$$R_e = \sigma T^4$$

Stefan-Bolcman nızamı menen beriletuǵın bolsa ($\sigma = 5,71 \cdot 10^{-5} \text{ erg}/(\text{sek} \cdot \text{sm}^2 \cdot \text{grad}^4)$), onda qara emes deneler ushın

$$R'_e = k\sigma T^4$$

ańlatpasın jaza alamız. Bul teńliktegi k koefficientiniń mánisi deneniń tábiyatınan, onıń betiniń halınan, onıń temperaturasınan h.t.b. ǵárezli. XI kesteде 1500 K temperaturadaǵı bir qatar zatlar ushın k koefficientiniń mánisleri keltirilgen.

XI keste de kórinip turǵanınday, barlıq metallar ushın k koefficientiniń mánisleri 1 den ádewir kishi. Úlken shaǵıstırıwshılıq qábiletlikke iye bolǵan, sonıń saldarınan ózine kelip túsken jaqtılıqtıń tek kishi bólimin ǵana jutatuǵın gúmis ushın k koefficientiniń mánisi ayrıqsha kishi. $T = 1500$ K temperaturada gúmis betiniń bir birliginen absolyut qara denegge salıstırǵanda jaqtılıqtı 25 ese kem shıǵaradı.

k koefficientleriniń mánisleri bettiń halınan kúshli ǵárezli. Joqarıda ayılıp ótilgenindey, berilgen zattıń gedir-budır, gúńgirt betleri olardıń polirovkalangán betlerine salıstırǵanda jaqtılıqtı kúshlierek jutadı. k nıń mánisi temperaturadan da ǵárezli. XI keste de keltirilgen maǵlıwmatlar boyınsha, $T = 1500$ K temperaturada wolfram ushın $k = 0,15$; sol wolfram ushın $T = 3500$ K temperaturada $k = 0,34$.

Jarqınlıqtıń jutıw qábiletliginen ǵárezligin ańsat demonstraciyalawǵa boladı. Eger aq jıltıratılǵan farfordıń betiniń bir bólimin kúye menen qaraǵa boyasa hám bunnan keyin onı qızdıra baslasa, onda kúye menen boyalǵan bólim forfordıń qońsıl asq orınlarına salıstırǵanda jaqtılıqtı kúshlierek shıǵara baslaydı.

Joqarıda ayılǵanlardıń tiykarında jaqtılıqtıń eń utımlı bolǵan temperaturalıq deregi óziniń qásiyetleri boyınsha absolyut qara deneniń qásiyetlerine jaqın hám 6000 K shamasındaǵı temperaturaǵa shekem qızdırılǵan dene bolıp tabıladı. Bunday temperaturada jarqınlıqtıń maksimumı spektrdiń kózge kórinetuǵın oblastında jatadı hám absolyut qara dene shama menen 84 lm/vt jaqtılıqtı beredi.

305-paragrafta biz tolqın uzınlıǵı $\lambda = 0,555$ mkm bolǵan monoxromat jaqtılıqta (kózdiń sezgirliginiń eń joqarı oblastı) 1 vt qa 650 lm niń sáykes keletuǵınlıǵın kórdik. Eger jaqtılıq dereginiń paydalı tásir koefficienti dep onıń jaqtılıq beriwshiliginiń jaqtılıq beriwshiliktıń maksimumı mańisine qatnasına aytatuǵın bolsaq, onda $T = 6000$ K temperaturada absolyut qara deneniń

$$\kappa = \frac{84}{650} = 0,129 \cong 13$$

procent shamasına teń paydalı tásir koefficientine teń bolatuǵınlıǵın kóremiz.

Bunnan joqarıraq yamasa tóménirek temperaturalarda paydalı tásir koefficientiniń mánisi kishi boladı.

XI keste.

Zat	$T = 3500$ K temperaturadaǵı k nıń mánisi
Volfram	0,15
Platina	0,15
Molibden	0,12
Temir	0,11
Gúmis	0,04
Kómir	0,52
Nikeldiń okisi	0,84
Temirdiń okisi	0,89

Qattı denelerdiń basım kópshiliginiń balqıw temperaturası 3000 K nen joqarı emes bolǵanlıqtan, jaqtılıqtıń derekleriniń jetisiw múmkin bolǵan p.t.k. leriniń mánisi 13 % ten ádewir kishi boladı.

Eń kóp tarqalǵan jaqtılıqtıń texnikalıq dereginiń qızdırwıw elektr lampası ekenligi belgili. Ol hawası sorap alıńǵan ıdısqa ornalastırılǵan elektr toǵınıń járdeminde qızdırılatsuǵın shash tárizli metall yamasa kómirden turadı. Is júzinde paydalanıwǵa jaramlı bolǵan birinshi elektr lampaların

1873-jılı res oylap tabıwshısı A.N.Lodigin tárepinen sóıldı. Usı jılı A.N.Lodigin Peterburg qalasında kóshelerdi qızdırılátuǵın elektr lampalarınń járdeminde jaqtılandırıw boyınsha tájiriybeler ótkerdi.

Lodiginniń birinshi lampalarında toqtırn tásirinde kómirden sóılǵan kishkene sterjen qızdırıldı; keyinirek (1890-jılı) Lodigin volframnan, molibdennen hám basqa da qıyın balqıytuǵın metallardan sóılǵan sımǵa iye bolǵan elektr lampalarına patent aldı. Házirgi waqıtlardaǵı qızdırıw lampalarında qızıwdı joqarılatıw maqsetinde jıńışke spiral túrindegi volfram sımı paydalanıladı. Lampa qızatuǵın sımınıń janıp ketpewi hám lampanıń xızmet etiw dáwirin uzaytıw ushın $\frac{1}{2}$ atm ǵa shekemgi basımdaǵı inert gazlardıń biri (argon, kripton) menen toltırıladı. Qızdırıw lampalarınń sanlı xarakteristikaları XII keste de berilgen.

XII keste

Jaqtılıqtıń deregi	Temperatura, K	Jaqtılıq bergishligi, $lm/vt.$	Jarqınlıǵı, $sb.$	P.t.k., %
Kómirden sóılǵan qızdırıw lampası.	2095	2,5	50	0,4
50 wattlıq gaz benen toltırılǵan volfram lampa.	2800	10,0	450	1,6
1000 wattlıq gaz benen toltırılǵan volfram lampa.	3000	20	1000	3,0
Elektr doǵası.	4000	25	15000	4,0
Lyuminescentlik lampa.	-	40	1,5	6,0
Joqarı basımlı sinap lampası.	-	60	15000	9,0

Jaqtılıqtıń bunnan basqa bolǵan kóp paydalanılátuǵın deregi sıpatında russ alımı V.V.Petrov tárepinen (II tom, 190-paragraf) ashılǵan hám P.N.Yablochkov tárepinen kósheni jaqtılandırıw ushın paydalanılǵan kómir elektrodlarınń arasındaǵı elektr doǵası xızmet etedi. Elektr doǵasında tiykarınan on kómir elektrodta payda bolǵan krater jaqtılıq shıǵaradı. Onıń temperaturası 4000 K ge shekem kóteriledi. Kraterden basqa ekinshi elektrod ta, elektrodlardıń arasında payda bolǵan qızdırılǵan puwlar da jaqtılıq shıǵaradı. SHıǵatuǵın jaqtılıqtıń muǵdarın kóbeytiw ushın kómirge hár qıylı metallardıń duzların da qosadı hám bunday jaǵdayda elektrodlardıń arasındaǵı jarıqlıq ádewir kúsheyedi. Biraq, qalay degen menen, doǵanıń jaqtılıq beriwshiligi $25 lm/vt$ shamasınan aspaydı.

Tómengi basımlardaǵı puwlardaǵı elektr razryadındaǵı jaqtılıqtıń shıǵıwında joqarı p.t.k. alıwǵa boladı. Bul jaǵdayda process teń salmaqlıq xarakterine iye bolmaydı hám joqarıda gáp etilgen termodinamikalıq nızamlar orınlanbaydı. Bul jaǵdayda alıp kelinetuǵın elektr energiyasınıń derlik barlıǵınıń kózge kórinetuǵın jaqtılıqtıń energiyasına aylanıwı, yaǵnıy p.t. koefficientiniń mánisiniń 100 procentke jaqınlasıwı múmkin. Is júzinde natriydiń puwları bar lampalardaǵı p.t.k. niń mánisi 70 % ke jetedi. Biraq bul tiptegi lampalar kúshli boyalǵan, kóz ushın pútkilley jaǵımsız bolǵan reńdi beredi. Quramı temperaturası $T = 5600$ K bolǵan absolyut qara deneniń nurlandıratuǵın jaqtılıǵına jaqın bolǵan Quyashtırn jaqtısın biz "aq jaqtılıq" dep esaplaymız. Qızdırıw elektr lampaları bolsa ($T = 3000$ K) sarıraq bolǵan jaqtılıqtı beredi, Biraq bul "sarı" jaqtılıqtıń "aq" jaqtılıqqa salıstırǵandaǵı ayırması úlken emes. Kóbirek yamasa azıraq monoxromat bolǵan jaqtılıq derekleri (joqarıda keltirilgen razryadlı lampalar) óziniń shaǵaratuǵın jaqtılıǵınıń reńleri boyınsha paydalanıwǵa bolmaydı. Usınday lampalardıń reńin dúzetiw ushın S.I.Vavilov tárepinen lyuminesciyalanıwshı zatlardı paydalanıw usınıldı (361-paragraf). Usı principte isleytuǵın házirgi zaman lampaları tómengi basımlardaǵı argon menen sinaptırn puwlarınan turatuǵın razryadlı nay túrinde sóıladı. Sinap puwları arqalı elektr toǵı ótkende

spektrdiń ultrafiolet oblastında jatatuǵın intensivli spektrallıq sızıqlardı shıǵaradı. Razryadlı naydıń ishki betine ultrafiolet nurlardıń tásirinde lyuminesciyaǵa ushıraytuǵın poroshoktıń juqa qatlamı jaǵıladı. Poroshoktıń quramı ol beretuǵın jaqtılıqtıń quramı boyınsha aq jaqtılıqqa sáykes keletuǵınday etip alınadı.

Lyuminescentli lampalar ádettegi qızdıruw lampalarına salıstırǵanda shama menen úsh ese úlken p.t.koefficientine iye boladı. Olardıń jarıqlıǵı qızdıruw lampasınıń spiralınıń jarıqlıǵınan ádewir kishi boladı, Biraq bul jaǵday lyuminescentli lampalardıń artıq mashlıǵı bolıp tabıladı. Másele sonnan ibarat, júdá joqarı jarıqlıqqa iye bolǵan predmetlerge qaraǵan jaǵdayda kózde awırıw sezimi payda boladı. Sonlıqtan ádette qızdıruw lampalarındaǵı spiral júdá joqarı jarıqlıqqa iye bolǵanlıqtan, olardı gúńgirt qalpaqlardıń astına jaylastıradı. Al bul qalpaqlar olardıń paydalı tásir koefficientiniń shamasın jáne de kemeytedi. Lyuminescentlik lampalardı bolsa, olardıń kishi jarıqlıqqa iye bolǵanlıǵı sebepli, qalpaqsız paydalanadı. Lyuminescentlik lampalardan alınatuǵın ulıwmalıq jaqtılıq aǵısınıń shamasın jaqtılıq shıǵaratuǵın bettiń maydanın úlkeytiwdiń esabınan úlkeytiwge boladı.

Razryadlı lampalardıń basqa tipi joqarı basımlardaǵı sinap puwları arqalı elektr razryadı ótetuǵın lampalar bolıp tabıladı.

Bul jaǵdayda júzege keletuǵın processler júdá joqarı temperaturalarǵa sáykes keletuǵın teń salmaqlıq processlerine jaqınlaydı. Bul lampalardıń p.t. koefficienti joqarı, biraq, olar beretuǵın jaqtılıq jasılǵa jaqın túske iye boladı hám olar júdá az jasaw waqtına jáne bir qatar texnikalıq kemshiliklerge iye boladı.

§ 313. Optikalıq pirometriya. Absolyut qara deneniń temperaturasınıń joqarıda qarap ótilgen nurlanıw nızamlarınıń biriniń tiykarında onıń nurlanıwınıń xarakterı boyınsha anıqlanıwı múmkin. Usı nızamlarǵa tiykarlangan temperaturanı anıqlawdıń usılları *optikalıq pirometriyanıń* usılları dep ataladı. Absolyut qara deneniń nurlanıw nızamlarınıń ańlatpalarına temperatura absolyut shkalada kiretuǵın bolǵanlıqtan, optikalıq pirometriya absolyut temperaturalardı anıqlawǵa múmkinshilik beredi. I tomnıń 44-paragrafında biz jıllılıq qásiyetlenin aldın ala biliw múmkin bolmaǵan termometrlik deneniń járdeminde temperaturanı absolyut shkalada ólshewdiń principiallıq qıyınshılıǵın kórsetken edik. Termodinamikanıń ekinshi baslamasına tiykarlangan termodinamikalıq usıl (I tom, 73-paragraf), principiallıq kóz-qarastan termometrlik deneniń tábiyatınan ǵárezsiz temperaturanı ólshewge múmkinshilik beredi, Biraq bul usıldı ámelde júzege keltiriw júdá qıyın máselelerdiń biri bolıp tabıladı. 309-paragrafta atap ótkenimizdey, absolyut bolǵan qara dene qansha bolsa da jaqsı jaqınlasıwda temperaturanı qaytadan kórsete aladı. Bul optikalıq pirometriyanı temperaturanı absolyut shkalada ólshewdiń ámeliy jaqtan jaramlı usılına aylandıradı. Usınıń menen birge, optikalıq usıldı júdá joqarı temperaturalardı ólshew ushın paydalanıwǵa boladı hám bul jaǵday onıń artıq mashlıǵın kórsetedi. Sonlıqtan házirgi waqıtlardaǵı termometrlik shkalanıń joqarı temperaturalardaǵı tiykarǵı noqatları optikalıq usıllardıń járdeminde anıqlanǵan.

Optikalıq pirometriyanıń usılları kóp sanlı ámeliy máselelerdi sheshiw ushın da jaramlı. Kúndelikli turmısta baqlanatuǵın obektıń óziniń qásiyetleri boyınsha absolyut qara deneniń qásiyetine jaqın bolǵan jaǵdaylar jiysi ushırasadı. Mısalı, laboratoriyalıq hám zavodlardaǵı pechler usınday obektlerdiń qatarına kiredi. Eger pechte kishi sańlaq payda etsek, onda ol absolyut qara denegе jaqsı jaqınlasıw bolıp tabıladı. Teń salmaqlıq bolmaǵan sharayatlardaǵı qara bolmaǵan denelerdiń temperaturasın optikalıq usıl menen ólshegende olardıń qásiyetlerin esapqa alıw zárúr. Biraq, eger bul qásiyetler belgili bolsa, onda optikalıq pirometriya óziniń ápiwayılıǵı menen isenimligi boyınsha júdá qolaylı usıl bolıp tabıladı. Temperaturanıń ólsheniwi nurlanıw nızamlarınıń qaysısına tiykarlangan ekenligine baylanıslı, optikalıq pirometriya usılları ózine tán ózgesheliklerge iye boladı. Bul usıllardı óz aldına qaraymız.

1. Jarıqlıqtıń tolqın uzınlıqları boyınsha tarqalıwına tiykarlangan usıl. 310-paragrafta biz absolyut qara deneniń jarıqlıǵınıń tolqın uzınlıqları boyınsha tarqalıwınıń birden-

bir parametr bolǵan temperatura menen anıqlanatuǵınlıǵın kórdik. Sonlıqtan, iymekliktiń túri boyınsha T temperaturanı anıqlawǵa boladı. Mısalı, tarqalıwdıń maksimumı sáykes keletuǵın tolqın uzınlıǵı λ_{max} tı anıqlaw jetkilikli. Bunday jaǵdayda 310-paragraftaǵı (2a) Vin formulası boyınsha T ushın

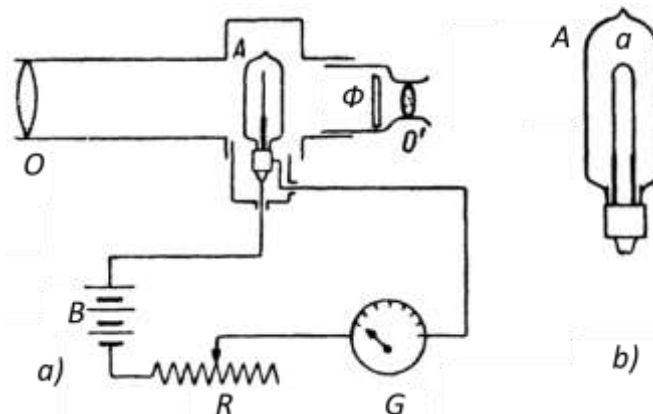
$$T = \frac{2886}{\lambda_{max}} \quad (1)$$

túrindegi anlatpaǵa iye bolamız. Bul anlatpada λ_{max} nıń mánisi mikronlarda beriliwi kerek. Mısalı, usı usıldıń járdeminde Quyashtıń temperaturası anıqlanadı. Jer atmosferasındaǵı jutılıw ushın dúzetiwlerdi esapqa alǵan jaǵdayda Quyashtıń nurlanıwınıń maksimumı $\lambda_{max} = 0,47$ mkm shamasına jaqın jatadı. Bunnan, Quyashtı absolyut qara dene dep esaplap, onıń sırtqı qatlamınıń temperaturası ushın $T = 6150$ K shamasına iye bolamız.

Absolyut qara emes deneler ushın (1)-formula haqıyqıy T temperaturanıń mánisin bermeydi. (1)-formulanıń járdeminde anıqlanǵan usınday denelerdiń temperaturasın *reńli temperatura* dep ataydı.

Eger baqlanatuǵın dene ushın jarıqlıqtıń tolqın uzınlıǵı boyınsha tarqalıwınıń iymekligi Plank iymekliginen úlken ayırmaǵa iye bolmasa, onda reńli temperatura T_r nurlanıwınıń reńi boyınsha baqlanatuǵın deneniń nurlanıwına júdá jaqın bolǵan absolyut qara deneniń temperaturasın ańǵartadı. Nur shıǵarıwında ádewir selektivlik orın alatuǵın deneler ushın reńli temperatura haqqındaǵı túsinik óziniń mánisin joǵaltadı.

2. Jarıqlıq boyınsha anıqlaw usılı. Eger b_λ shaması absolyut ólshemde anıqlanǵan bolsa, onda tek bir λ tolqın uzınlıǵına sáykes keletuǵın jarıqlıq boyınsha Plank formulasınıń járdeminde T temperaturanı anıqlawǵa boladı.



235-súwret. Joǵalatuǵın sımı bar piometr.

Jarıqlıqtıń absolyut mánisin ólshew dım qıyın bolǵanlıqtan, ádette baqlanatuǵın deneniń jarqınlıǵın bazı bir belgili bolǵan jarqınlıq penen salıstırıw menen sheklenedi. Onıń ushın joǵalatuǵın sımı bar piometr dep atalatuǵın ásbaptı paydalanadı. Bul ásbaptıń sxeması 235-súwrette kórsetilgen. Ásbaptıń tiykarǵı bólimi bolıp O obektivine xám O' okulyarına iye bolǵan kóriw trubası xızmet etedi. O obektiviniń fokallıq tegisliginde baqlanatuǵın deneniń súwreti alınadı. Biz keyinirek (324-paragrafta) súwrettiń jarıqlıǵınıń obekttiń jarıqlıǵına proporcional ekenligin kóremiz. O obektiviniń fokallıq tegisliginde bir tekli diywalları bar shıyshe ballon túrinde soǵılǵan A elektr lampochkası ornastırıladı. Lampochkanıń qızdırılatuǵın sımı a ádette yarım dóńgelek túrinde iymeytilgen. O' okulyarında izertlenetuǵın deneniń beti menen lampochkanıń sımı baqlanadı. Tar spektrallıq uchastka O' okulyarınıń qasında jaylastırılǵan Φ jaqtılıq filtriniń járdeminde ajratıp alınadı. Ádette spektrdiń qızıl bólimindegi $\lambda = 0,66$ mkm bolǵan oblast ajratıp alınadı. Lampochkanıń sımına B batareyasınan kernew túsiriledi. Toqtıń kúshin R reostatınıń

járdeminde ózgerip, sımđı azlaw yamasa kóplew qızdırwğa boladı. Eger sımın jırıqlıǵı deneniń betiniń súwretiniń jırıqlıǵınan úlken bolsa, onda ol súwrettiń fonında jaqtılı jolaq túrinde ajırılıp kórinip turadı. Eger onıń jırıqlıǵı kishi bolsa, onda ol qarańǵıraq bolıp kórinedi. Sım menen súwrettiń jırıqlıqları birdey bolǵanda sımın súwreti deneniń súwretiniń fonında joǵaladı. Usınday jollar menen ádewir joqarı dállikte sım menen baqlanatuǵın deneniń betiniń súwretiniń jırıqlıqlarınıń teńligine erisiwge boladı. Ásbaptı absolyut qara dene boyınsha gradiurovkalawğa boladı. Onıń ushın I nakal toqlarınıń kúshleriniń qanday mánislerine sımın joǵalıwınıń sáykes keletuǵın absolyut qara deneniń temperaturalarınıń mánislerin tabıw kerek. Bunnan keyin G ólshew ásbabınıń sımın joǵalıwına sáykes kórsetiwleri boyınsha tolqın uzınlıqlarınıń berilgen intervalındaǵı absolyut qara deneniń qanday b_λ jırıqlıǵına iye bolatuǵınlıǵın hám baqlanatuǵın deneniń jırıqlıǵı b'_λ tı tikkeley tabıwğa boladı. Eger baqlanatuǵın dene absolyut qara dene bolıp tabılatuǵın bolsa, onda usınday jollar menen anıqlanatuǵın temperatura haqıyqıy temperatura bolıp tabıladı. Qara emes deneler ushın usınday usıl menen anıqlanǵan temperaturanı *jırıqlıq boyınsha anıqlanǵan temperatura* dep ataymız.

Eger jırıqlıqlardıń qatnası $k_j = b'_\lambda/b_\lambda$ belgili bolsa, onda deneniń jırıqlıq temperaturası bolǵan T_j shamasınan haqıyqıy temperatura T ǵa ótiwge boladı. Absolyut qara deneniń jırıqlıǵı onıń jarqınlıǵınan tek $1/\pi$ kóbeytiwshisine ǵana ayırıladı. Sonlıqtan, nurlanıwdıń maksimumına sáykes keletuǵın λ_{max} tolqın uzınlıǵınan kishi tolqın uzınlıqları ushın mınalardı jazıwğa boladı [311-paragraftaǵı (5)-formula]:

$$b_{\lambda,T_j} = \frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} \cdot e^{-\frac{C_2}{\lambda T_j}}, \quad b'_{\lambda,T} = k_j \frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} \cdot e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}. \quad (2)$$

$b'_{\lambda,T} = b_{\lambda,T_j}$ teńligi orınlanǵan jaǵdayda

$$k_j \frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} \cdot e^{-\frac{C_2}{\lambda T}} = \frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} \cdot e^{-\frac{C_2}{\lambda T_j}}$$

teńligine iye bolamız hám bunnan

$$k_j = e^{\frac{C_2}{\lambda} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_j} \right)} \quad (3)$$

formulasına iye bolamız. Bul formulanı logarifmlese, onda T temperatura ushın

$$T = \frac{C_2 T_j}{\lambda T_j \ln k_j + C_2} \quad (4)$$

ańlatpasına iye bolamız.

XIII keste.

Zat	$T = 1500 \text{ K}$ temperaturadaǵı k
Molibden.	0,32
Tantal.	0,44
Temir.	0,36
Kómir.	0,89
Nikeldiń okisi.	0,85
Temirdiń okisi.	0,92

(4)-formuladan, eger berilgen dene ushın k_j belgili bolsa, onda jırıqlıq boyınsha temperatura T_j niń mánisi boyınsha haqıyqıy temperatura T anıqlawğa bolatuǵınlıǵı kórinip tur. XIII kestede $\lambda = 0,66 \text{ mkm}$ tolqın uzınlıǵına sáykes keletuǵın hám $T = 1500 \text{ K}$ temperaturadaǵı bazı bir deneler ushın k_j koefficientiniń mánisleri keltirilgen. Bul k_j koefficientiniń mánisleri XI kestede keltirilgen denelerdiń integrallıq jarqınlıqlarınıń yamasa jırıqlıqlarınıń absolyut qara deneniń integrallıq jarqınlıqlarınıń (yamasa jırıqlıǵınıń) qatnasına teń bolǵan k koefficientiniń mánisinen azmaz ózgeshe ekenligi kórinip tur. k_j koefficientleriniń shaması úlken bolmaǵan dárejede temperaturadan ǵárezli boladı.

3. Radiaciyalıq usıl. Bul usıl deneniń integrallıq energiyalıq jariqlıǵın ólshewge tiykarlanǵan. Integrallıq jariqlıq $B_e = \frac{1}{\pi} R_e$ teńliginiń járdeminde anıqlanadı. Bul teńlikte R_e - 310-paragraftaǵı (1) - Stefan-Bolcman nızamına baǵınatuǵın integrallıq energiyalıq jariqlıq:

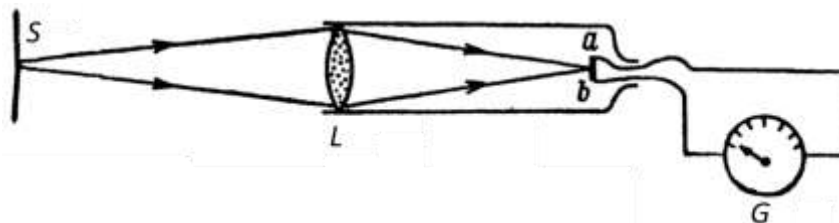
$$B_e = \frac{\sigma}{\pi} T^4. \quad (5)$$

(5)-formuladan deneniń temperaturası T nı integrallıq jariqlıq B_e nı ólshew arqalı tabıwǵa bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı.

Jariqlıq B_e ni anıqlaw ushın *radiaciyalıq pirometrler* dep atalatuǵın ásbaplar paydalanıladı.

236-súwrette radiaciyalıq pirometrdiń sxeması berilgen: L - linza, ab - termopara, G - termoparada payda bolatuǵın toqtıń kúshin ólsheytuǵın galvanometr. Pirometr qızdırılǵan deneniń S betine usı bettiń L linza beretuǵın súwreti ab termoparası turǵan orında payda bolatuǵınday etip jaylastırıladı. Biziń kórsetip ótkenimizdey, linza tárepinen beriletuǵın súwrettiń jariqlıǵı B_e niń shaması derektiń jariqlıǵına proporcional. Óz gezeginde, termoparaniń qızıwı súwrettiń jariqlıǵı B'_e shamasına proporcional (súwrettiń ólshemleri termoparaniń ólshemlerinen úlken bolatuǵın jaǵdayda). Aqırǵı esapta, galvanometrdiń kórsetiwi baqlanatuǵın absolyut qara deneniń jariqlıǵı bolǵan B_e shamasına proporcional hám, demek, (5)-añlatpa boyınsha onıń absolyut temperaturasınıń tórtinshi dárejesine proporcional. Belgili bolǵan temperaturalar boyınsha pirometrdi graduırovkalap, onı bunnan keyin qálegen temperaturanı ólshew ushın qollanıwǵa boladı.

Eger temperaturası ólshenetuǵın dene absolyut qara bolmasa, onda radiaciyalıq pirometr onıń haqıyqıy T temperaturasını bermeydi. Bunday jaǵdayda ólshengen temperaturanı *radiaciyalıq temperatura* T_p dep ataydı. Onıń shaması integrallıq jariqlıǵı baqlanatuǵın deneniń integrallıq jariqlıǵınday bolǵan absolyut qara deneniń temperaturasına teń.



236-súwret. Radiaciyalıq pirometr.

312-paragrafta ayılǵanıday, qara emes deneler ushın

$$B_e = \frac{k\sigma}{\pi} T^4 \quad (5a)$$

teńligi orınlı boladı. Bul teńlikte k arqalı hár qıylı deneler ushın mánisleri XI keste de keltirilgen koefficient belgilengen. Radiaciyalıq temperaturanıń shaması

$$B_e = \frac{k\sigma}{\pi} T_p^4 \quad (6)$$

qatnasınıń járdeminde anıqlanatuǵın bolǵanlıqtan, (5a) hám (6)-formulalardı salıstırıw jolı menen deneniń temperaturası menen onıń radiaciyalıq temperaturasınıń arasındaǵı baylanıstı tabamız:

$$T = \frac{1}{\sqrt[4]{k}} T_p.$$

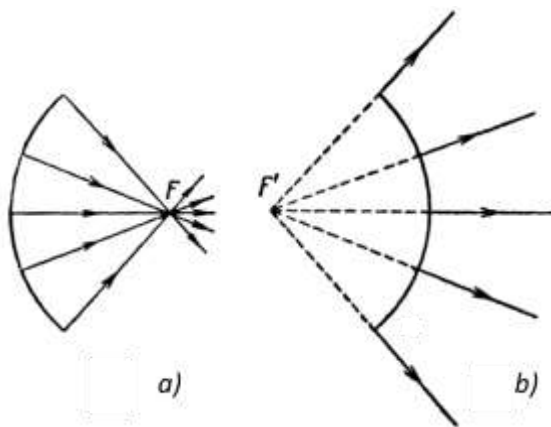
XI kesteniń maǵlıwmatları boyınsha, barlıq deneler ushın $k < 1$ bolǵanlıqtan, barlıq qara emes denelerdiń haqıyqıy temperaturaları olardıń radiaciyalıq temperaturalarınan joqarı boladı. Mısalı, temir ushın $k = 0,11$, bunnan $\frac{1}{\sqrt[4]{k}} = 1,74$ hám, usıǵan sáykes, $T = 1,74T_p$, yaǵnıy haqıyqıy temperatura radiaciyalıq temperaturadan bir yarım ese joqarı. Radiaciyalıq temperatura boyınsha haqıyqıy temperaturanı anıqlawdıń qıyınshılıǵı k koefficientleriniń turaqlı emes, al olardıń ózleriniń temperaturadan gárezli ekenligi menen baylanıslı.

XXVIII BAP

ÁMELİY NURLIQ OPTIKA

§ 314. Kirişiw. Kóp sanlı optikalıq ásbaplardıń dúzilisi bir tekli ortalıqlarda tuwrı sızıqlı qozǵalatuǵın hám bólip turatuǵın shegarada shaǵılısatuǵın hám sınatuǵın jaqtılıq nurları kóz-qaraslarına tiykarlangan. Usınday ásbaplardıń teoriyasın qaraytuǵın optikanıń bólimin nurlıq yamasa geometriyalıq optika atamasına iye. Nurlıq optika eki nızamdı paydalanadı: jaqtılıqtıń shaǵılısıwı hám sınıwı nızamı (251-paragraf). Biz keyinirek, optikalıq ásbaplardıń barlıq qásiyetlerin anıqlaw ushın bul eki nızamnıń jetkiliksiz ekenligin kóremiz. Birinshiden, súwrettiń jarıqlıǵı menen jaqtılandırılǵanlıǵın anıqlaw ushın fotometrlik qatnaslardıń esapqa alınıwı kerek. Ekinshiden, jaqtılıqtıń tuwrı sızıqlı tarqalatuǵınlıǵı haqqındaǵı kóz-qaraslardıń paydalanılıw sheklerin beretuǵın jaqtılıqtıń interferenciyası menen difrakciyası qubılıslarınıń iyelegen ornın esapqa alıw talap etiledi. Biraq, bul qubılıslardıń úlken áhmiyetke iye ekenligine qaramastan, optikalıq ásbaplardıń birinshi teoriyasınıń tek nurlıq optikanıń nızamlarına tiykarlangan bolıwı múmkin.

Nurlıq optikanıń principinde isleytuǵın ásbaplar hár qıylı maqsetler ushın xızmet ete aladı: obektlerge qaraǵanda kózdi tolıqtırıw, obektlerdiń haqıyqıy súwretlerin beriw, jaqtılandırılǵanlıqtı ózgertiw h.t.b. Bul jaǵdaylardıń barlıǵında ásbaplardıń iyelegen ornı obektlerden shıǵatuǵın nurlardıń tarqalıwın shekleytuǵın denelik múyeshlerdi ózgertiwge alıp kelinedi. Usı jaǵdayǵa sáykes, nurlar dástesiniń ulıwmalıq qásiyetlerin qaraw áhmiyetli máselelerdiń birine aylanadı.



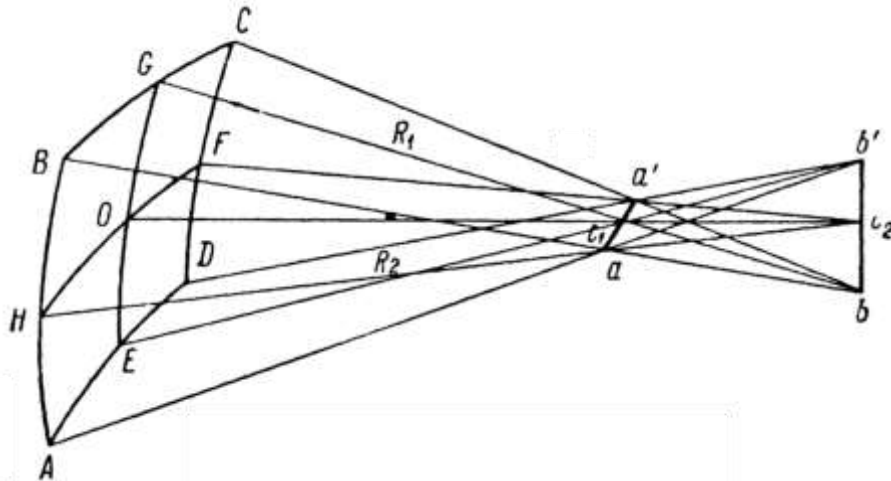
237-súwret.
Gomooraylıq dásteler:
a) jıynalatuǵın,
b) tarqalatuǵın.

Sferalıq bettiń uchastkasına normal bolǵan tuwrı sızıqlar tárepinen payda etilgen nurlardıń dástesin kóz aldımızǵa keltiremiz. Dásteniń jıynalıwshı bolıwı múmkin (237a súwret), onda onıń barlıq nurları bir F noqatında kesilisedi. Sonıń menen birge dásteniń tarqalıwshı bolıwı da múmkin (237b súwret). Bunday jaǵdayda bir F' noqatında olardıń dawamı kesilisedi (237b súwrette punktir sızıqlar menen kórsetilgen). F noqatı (yamasa, sáykes F' noqatı) dásteniń fokusu dep ataladı. *Noqatlıq fokusqa iye dásteni gomooraylıq dásti dep ataydı.* Tolqınlıq bet nurlarǵa ortogonal bolǵanlıqtan, *gomooraylıq nurǵa sferalıq tolqınlıq bet sáykes keledi.* Gomooraylıq dásteniń dara jaǵdayı parallel nurlardıń dástesi bolıp tabıladı; oǵan sheksizlikte jatırǵan fokus hám tegis tolqınlıq bet sáykes keledi.

Bunnan bılay ABCD betiniń qálegen iymekligin qaraymız (238-súwret).

Onıń hár qıylı kesimleri hár qıylı iyreklikke iye. Geometriyadan minimallıq hám maksimallıq iyreklikke iye bolǵan qálegen iymeklik ushın kesimniń betleriniń bir birine perpendikulyar ekenligi belgili (I bap, 81-paragrafqa qarańız). Bettiń biz saylap alǵan elementinde O noqatın belgileybiz

hám usı noqat arqalı bir birine perpendikulyar bolǵan EOG hám HOF kesimlerin ótkeremiz. Meyli olardıń birinshisine iyrekliktiń minimallıq radiusı, al ekinshisine iyrekliktiń maksimallıq radiusı sáykes keletuǵın bolsın. E , O hám G noqatlarına túsirilgen normallar betten R_1 qashıqlıǵında jaylasqan iyrekliktiń ortası C_1 noqatında kesilisedi; H , O hám F túsirilgen normallar betten R_2 qashıqlıǵında jaylasqan iyrekliktiń ortası C_2 noqatında kesilisedi. Endi EOG kesimine parallel hám jaqın bolǵan AHB hám CFD kesimlerin ayırıp alamız. Olarǵa R_1 shamasına teń iyreklik radiusı sáykes keledi hám olarǵa túsirilgen normallar C_1 noqatı menen bir tuwrıda jaylasqan a hám a' noqatlarında kesilisedi. aa' hám bb' tuwrıları bir birine perpendikulyar. $ABCD$ betine perpendikulyar júrgizilgen nurlardıń barlıǵı da aa' hám bb' tuwrılarınıń biriniń boyında jatırǵan noqatta kesilisedi. Nátiyjede biz mınalardı iye bolamız: *qálegen iymek bettiń elementine sáykes keletuǵın nurlar bir birine perpendikulyar bolǵan, eki tuwrı aa' hám bb' kesindilerinde kesilisedi.* Usınday nurlardıń dástesi astigmatikalıq dáste dep ataladı. aa' hám bb' kesindileri *fokallıq sızıqlar*, al olardıń arasındaqı qashıqlıqtı *astigmatikalıq ayırma* dep ataydı. Astigmatikalıq nurlardıń dástesi hesh bir orında noqatlıq fokustı bermeydi. Astigmatikalıq ayırma qanshama kishi bolsa, fokallıq sızıqlar bir birine sonshama jaqın jaylasadı hám olardıń hár biri sonshama qısqa boladı. SHekte olardıń bir noqatta qosılıwı múmkin hám bunday jaǵdayda astigmatikalıq dáste gomooraylıq dástege ótedi.



238-súwret. Astigmatikalıq dáste.

Álbette, hár bir noqatlıq derekten gomooraylıq dáste shıǵadı. Optikalıq sistemalıń usınday obektin noqatlıq súwretin beriw ushın, obektten shıqqan nurlardıń bir noqatta kesilisiwi kerek. Bul optikalıq sistemalıń gomooraylıq dástelerdi gomooraylıq etip saqlawı hám usı dásteniń sheklep turatuǵın denelik múyeshlerdiń shamaları ǵana ózgeriske ushırasadı. Difrakciya qubılısınıń orın alatuǵınlıǵına baylanıslı qatań túrdegi gomoorıylıq dásteler bolmaydı, Biraq, eger nurlıq optikanıń nızamların paydalanıw menen sheklenetuǵın bolsaq, onda shaǵılısqannan hám sınıǵannan keyin gomooraylıq dáslerediń gomooraylıq dásteler bolıp qalatuǵın jaǵdaylardıń múmkin ekenligin kóriwge boladı. Biraq, biz tómende bunday jaǵdaylardıń júdá siyrek ushırasatuǵınlıǵın kóremiz.

Sonlıqtan, optikalıq ásbaplardı soqqanda ádetde astigmatizmnen qutılıwdıń sátiniń túspeytuǵınlıǵı hám tek onıń shamasın minimumǵa alıp keliw máselesi ǵana qoyıladı.

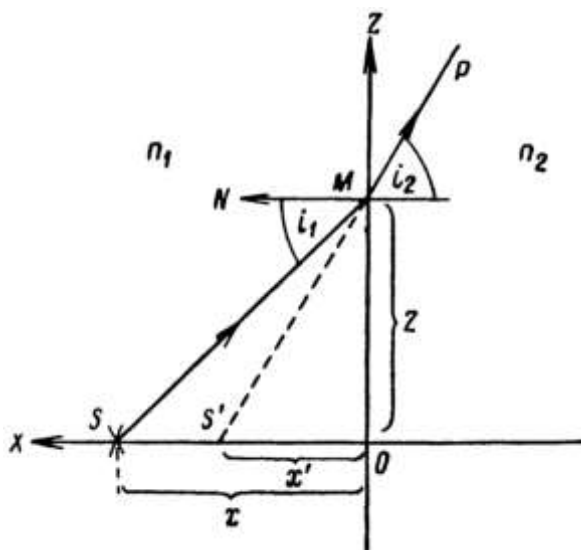
Optikalıq ásbaplarda dásteler tarqalatuǵın múyeshlerdiń sheklerin ózgeritiw hár qıylı opikalıq qásiyetlerge iye bolǵan zatlardı ayırıp turatuǵın tegis yamasa iymek betlerdegi shıǵılısıwlar menen sınıwlardıń járdeminde ámelge asırıladı. Principinde múyeshlerdiń ózgeriwin jaqtılıq nurlarınıń optikalıq jaqtan bir tekli emes ortalıqlardaǵı tarqalıwınıń nátiyjesinde júzege keltiriwge boladı (283-paragraf), Biraq bir tekli bolmaǵan oblastlardıń tarqalıwı berilgen zatlardı soǵıw texnikalıq jaqtan júdá qıyın hám, sonlıqtan, bunday usıl usı waqıtlarǵa shekem paydalanılmaıdı. Sındırıwshı

betler sıpatında derlik tegis yamasa sferalıq betler qollanıladı, sebebi basqa formalarǵa iye bolǵan betlerdi soǵıw júdá qıyın. Optikalıq ásbapları soǵıw ushın móldir material sıpatında shıyshe xızmet etedi, Biraq bunday shıyshe ózleriniń qásiyetleri boyınsha júdá bir tekli bolıwı kerek. Eń aqırında, optikalıq detallardıń betleri berilgen geometriyalıq betlerden jaqtılıqtıń tolqın uzınlıǵınıń bir neshe bóliminen úlken, yaǵnıy 10^{-5} sm den ádewir kishi ayırmaǵa iye bolmawı kerek. Bulardıń barlıǵı optotexnikanı soǵıwdı óndiristiń eń quramalı hám úlken dállikti talap etetuǵın tarawına aylandıradı. Usınıń menen birge, házirgi waqıtları optikalıq ásbaplardıń ámeliy jaqtan áhmiyeti júdá ullı: laboratoriyalıq texnika, derlik barlıq dál ólsheytuǵın texnika, ónimlerdiń sapasın qadaǵalawdıń kóp sanlı usılları, fotografiya, qorǵanıw texnikasınıń bir qatar bólimleri optikalıq sistemalardı qollanıwǵa tiykarlanǵan.

Rossiyada ámeliy optikanıń rawajlanıwınıń birinshi dáwirleri XVIII ásirdiń ortaları bolıp tabıladı. M.V.Lomonosov ózi dúzgen proektler boyınsha hár qıylı ásbapları (teleskoplar, mikroskoplar hám teńizde júziwshiler paydalanatuǵın optikalıq ásbaplar) soǵatuǵın optikalıq ustaxanadı shólkemlestirdi. Ol kishi jaqtılandırıwlarda baqlawları ótkeriwge mólsherlengen originallıq úlken jaqtılıq kúshine iye bolǵan kóriw trubasını konstrukciyaladı. Bul trubanı M.V.Lomonosov "túnde kóretuǵın" truba dep atadı. Ataqlı rus oylap tabıwshısı I.P.Kulibin Ilimler Akademiyasınıń bir qatar ekspediciyaları ushın ólshew ásbapların soqtı: geodeziyalıq trubalar, astrolyabiyalar h.t.b. 1779-jılı ol birinshi shaǵılıstırıwshı projektordı soqtı. Onıń ushın ol oyıs bette jaylastırılǵan kóp sanlı mayda aynalardan turatuǵın úlken oyıs aynanı soqtı. Onıń zamanlaslarınıń aytıwı boyınsha bul ayna "onıń aldına tek bir shamdı qoysa, jaqtılıqtı sol bir shamnıń jaqtılıǵına salıstırǵanda bes júz hám onnan da kóbirek ese kóbeytedi...".

Ámeliy optika Ullı Oktyabr revolyuciyasınan keyin keń túrde rawajlandı. Oǵada hár qıylı bolǵan sorttaǵı hám joqarı sapalı optikalıq shıyshe úlken masshtablardaǵı soǵıw iske asırıldı. Sovet optotexnikası óz aldına jol menen rawajlandı, eldiń optikalıq apparaturaǵa bolǵan tolıq qanaatlardıratuǵın oǵada kóp sandaǵı jańa originallıq konstrukciyalardı berdi.

§ 315. Tegis bettiń qasındaǵı shaǵılısw hám sınıw. Tegis bettegi shaǵılıswdı biz 251-paragrafta talladıq. Biz tegis aynanıń noqatlıq obektin jormal súwretin beretuǵınlıǵın kórdik. Bul tegis aynadan shaǵılısqanda gomooraylıq dásteniń gomooraylıq bolıp qalatuǵınlıǵın ańǵartadı. Bunday jaǵdayda dástedegi nurlardıń tarqalıwınıń denelik múyeshiniń shaǵılısqannan keyin de ózgerissiz qalatuǵınlıǵın hám tek ǵana nurlardıń tarqalıw baǵıtlarınıń ózgeretuǵınlıǵın ańǵartadı. Al, eger shaǵılısw sındırıw koefficientleriniń mánisleri hár qıylı bolǵan eki móldir zattıń shegarasındaǵı sınıwda jaǵday ózgeshe boladı: bunday jaǵdayda gomooraylıq nur astigmatlıq nurg aylanadı.



239-súwret.
Eki ortalıqtıń arasındaǵı tegis shegaradaǵı
jaqtılıqtıń sınıwı.

Meyli, eki móldir bir tekli zattı ayırıp turǵan tegis bet YOZ tegisligine sáykes keletuǵın bolsın (239-súwret; OY kósheri sızılma tegisligine perpendikulyar). Zatlardıń sındırıw koefficientleri n_1 hám n_2 arqalı belgileybiz hám $n_2 < n_1$ teńsizligi orınlanadı dep esaplaymız. Noqatlıq S jaqtılıq deregi OX kósheriniń boyında jatadı hám onnan shıqqan nur ayırıp turǵan shegaraǵa M noqatında túsedi dep boljaymız. Túsiw noqatında MN normalın túsiremiz hám túsiw jáne sınıw múyeshlerin i_1 hám i_2 arqalı belgileybiz. Sınıw nızamı boyınsha

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 \quad (1)$$

teńligin jaza alamız. Sınǵan MP nurınıń dawamı OX kósherin S' noqatında kesip ótedi. S hám S' noqatlarınıń koordinataları sáykes x hám x' arqalı, al M noqatınıń koordinatasın z arqalı belgileybiz. Bunday jaǵdayda SMO úsh múyeshliklerinen

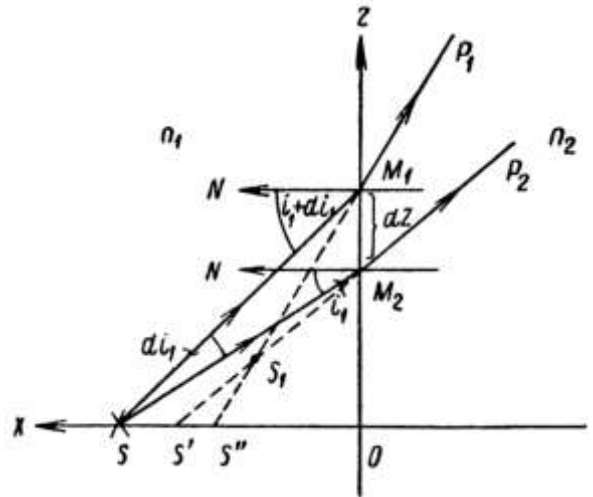
$$\sin i_1 = \frac{z}{\sqrt{x^2 + z^2}}, \quad \sin i_2 = \frac{z}{\sqrt{x'^2 + z^2}},$$

teńliklerine iye bolamız. $\sin i_1$ menen $\sin i_2$ shamalarınıń bul mánislerin (1)-teńlikke qoyıp hám alıńǵan teńlikti x' shamasına qarata sheship,

$$x' = \frac{n_2}{n_1} \sqrt{x^2 + \left(1 - \frac{n_1^2}{n_2^2}\right) z^2} \quad (2)$$

formulasına iye bolamız. (2)-formuladan S dereginiń berilgen ornında (x shaması berilgen) S' noqatınıń iyelegen ornınıń sınıw noqatı M niń qaysı orında turǵanlıǵınan ǵárezli, yaǵnıy SM nurınıń baǵıtınan ǵárezli ekenligi kelip shıǵadı. Bir zattan ekinshi zatqa ótkende hár qıylı nurlar hár qıylı bolıp sınadı hám olardıń dawamları OX kósherin hár qıylı orınlarda kesedi. Túsiw múyeshleri sheksiz kishi di_1 múyeshke ayırılauǵın eki SM_1 hám SM_2 nurların qaraymız (240-súwret). Sınǵannan keyin olar M_1P_1 hám M_2P_2 nurların payda etedi, olardıń dawamları OX kósherin sáykes S'' hám S' noqatlarında kesip ótedi; bul eki nur bir biri menen S_1 noqatında kesilisedi. S noqatlıq dereginen shıǵatuǵın jáne SM_1 hám SM_2 nurlarınıń arasındaǵı barlıq nurlar dawamları S_1 noqatında kesilisetuǵın hám OX kósherin S'' hám S' noqatlarınıń arasında kesip ótetuǵın nurlardı beredi. Álbette, S noqatlıq dereginen shıǵatuǵın hám SM_1 hám SM_2 nurlarınıń arasında jatatuǵın barlıq basqa nurlar sınǵannan keyin dawamları S_1 noqatında kesilisetuǵın hám OX kósherin S'' hám S' noqatlarınıń arasında kesip ótetuǵın nurlardı beredi. S noqatlıq dereginen sheksiz kishi bolǵan $d\omega_1$ denelik múyeshiniń sheklerinde shıǵatuǵın nurlardıń keńisliklik dástesin ayırıp alıw ushın 240-súwretti OX kósheriniń dógeresinde $d\varphi$ múyeshine buramız. Bunday jaǵdayda biz $d\omega_1$ shamasına teń nurlardıń tar bolǵan gomooraylıq dástesin alamız. Sınǵannan keyin bul dáste basqa $d\omega_2$ dástesine aylanadı hám onıń XOZ tegisligi menen kesimi M_1P_1 hám M_2P_2 sızıqları menen anıqlanadı. $d\omega_2$ dástesiniń barlıq nurlarınıń dawamları OX kósherin $S'S''$ kesindisiniń sheklerinde kesip ótedi. Bunnan sınǵan $d\omega_2$ dástesiniń astigmatikalıq dáste bolıp tabılauǵınlıǵın hám $S'S''$ sızıǵınıń onıń fokallıq sızıqlarınıń biri ekenligi kelip shıǵadı. Ekinshi fokallıq sızıqtı tabıw ushın XOZ tegisliginde jatatuǵın sınǵan nurlardıń dawamınıń S_1 noqatında kesilisetuǵınlıǵın ańǵaramız. Súwretti OX kósheriniń dógeresinde $d\varphi$ múyeshine burǵanda noqat úlken bolmaǵan doǵanı sızadı. $d\varphi$ múyeshi júdá kishi bolǵanda bul doǵanı súwret tegisligine perpendikulyar bolǵan tuwrınıń kesindisi dep esaplawǵa boladı. $d\omega_2$ dástesine tiyisli bolǵan barlıq nurlardıń dawamı bul kesindini kesip ótedi. Solay etip, XOZ tegisligine perpendikulyar bolǵan biz qarap atırǵan kesindi sınǵan dásteniń ekinshi fokallıq sızıǵı bolıp tabıladı. Súwret tegisliginde jatatuǵın fokallıq sızıq sagittallıq, al súwret tegisligine perpendikulyar bolǵan fokallıq sızıq meridianlıq dep ataladı.

240-súwret.
Ayırıp turatúǵın tegis shegaradaǵı sıǵandaǵı
dásteniń astigmatizmi.



Túsiw múyeshiniń ózgeriwi menen fokallıq sıızılardıń ekewiniń de orınları ózgeredi. 241-súwrette noqatlardıń geometriyalıq ornı S_1 punktir sıızıq penen kórsetilgen. Bul sıızıqtı *kaustikalıq* dep ataydı. Sagittallıq fokallıq sıızılqar OX kósheriniń boyında S' noqatınan baslanadı hám O noqatında tamam boladı. Jaqtılıq shıǵarıp turǵan S noqatınan shıǵatuǵın hám ayırıp turǵan shegaraǵa normal baǵıtta kelip túsetuǵın sheksiz tar dáste ($i_1 = 0$) ushın fokallıq sıızılardıń ekewi de bir S' noqatında qosıladı; bunday jaǵdayda sıǵan nur gomooraylıq bolıp qala beredi. S' noqatınıń koordinatası x' tı (2)-formulada $z = 0$ dep esaplaw jolı menen anıqlaymız:

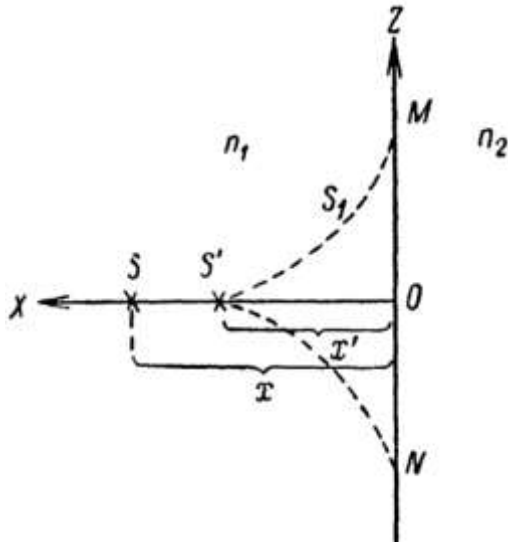
$$x' = \frac{n_2}{n_1} x. \quad (2)$$

Túsiw múyeshiniń mánisiniń ózgeriwi menen sheksiz tar dástelerdiń meridionallıq fokallıq sıızıǵı i_1 múyeshiniń belgisine baylanıslı kaustikanıń $S'M$ yamasa $S'N$ shaqalarınıń biriniń boyın menen jılısadı. Bunday jaǵdayda sagittallıq fokallıq sıızıq O noqatınan OX kósheriniń baǵıtında qozǵaladı. M hám O (yamasa N hám O) noqatlarına sáykes keletuǵın fokallıq sıızılardıń sheklik orınları túsiw múyeshiniń mánisi usı sheklik mánisten baslap tolıq ishki shaǵılısıw júzege keletuǵın shártke sáykes keledi.

Joqarıda ayılǵanlardan, ayırıp turǵan shegaraǵa dáste qanshama qıya túsetuǵın bolsa, onda sıǵan nurdıń astigmatizmi sonshama úlken bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı.

Eger, mısalı, suwdıń astında turǵan predmetlerdi suwdıń betine túsirilgen normalǵa jaqın baǵıtta qaraytuǵın bolsaq, onda súwret óziniń anıqlıǵın saqlaydı, sebebi bul jaǵdayda astigmatizm kishi boladı; qıya múyeshler menen qaraǵanda astigmatizmiń sebebinen súwrettiń anıqlıǵı buzıladı.

§ 316. Bir sferalıq bettegi sınıw. Meyli, sıındırıw koefficientleri n hám n' bolǵan eki bir tekli móldir zat iymeklik radiusı r bolǵan sferalıq bet penen ayırılǵan bolsın.



241-súwret.
Kaustika.

Biz jaqtılıqtıń noqatlıq deregi P hám bettiń iymeklik orayı C arqalı ótetuǵın *bas optikalıq kósher* dep atalatuǵın kósherdi júrgizemiz (242-súwret). Belgilerdiń tómendegidey qaǵıydasınan paydalanamız: uzınlıqlardı sındırıwshı O betinen baslap belgileymiz hám eger jaqtılıqtıń tarqalıw baǵıtı menen baǵıtlas bolsa, onı oń dep esaplaymız; múyeshlerdi bas optikalıq kósherdiń baǵıtınan baslap esaplaymız (yamasa sferalıq betke túsirilgen normaldan baslap) hám eger saat strelkasınıń qozǵalıw baǵıtında anıqlanǵan bolsa onı oń belgige iye dep esaplaymız. Sızılmalarda barlıq waqıtta uzınlıqlar menen múyeshlerdiń oń mánislerin belgileymiz. Mısalı, eger s háribi menen belgilengen bazı bir uzınlıq teris bolsa, onda sızılma daǵı sáykes kesindiniń qasına $-s$ belgisin qoyamız h.t.b. P noqatlıq derekten shıǵatuǵın nurlardıń baǵıtın bas optikalıq kósher PC menen jasaytuǵın múyesh penen anıqlaymız. Optikalıq kósher menen tek kishi múyeshlerdi jasaytuǵın nurlardı ǵana qaraymız, olar ushın sinuslar menen tangensler múyeshlerdiń mánisine teń, al kosinuslar bolsa birge teń bolıwı kerek. Bunday nurlardı *paraksiallıq nurlar* dep ataydı.

P obektinen shıǵatuǵın, zatlardıń arasındaǵı shegaraǵa M noqatında túsetuǵın hám singannan keyin bas optikalıq kósherdi P' noqatında kesip ótetuǵın nurdı qaraymız. Joqarıda keltirilgen belgiler qaǵıydasın esapqa alǵanda múyesh hám 242-súwrette strelka menen kórsetilgen baǵıt teris. $-u$ shaması oń boladı. Túsiw hám sınıw múyeshleri i menen i' ler de teris. $-i$ menen $-i'$ shamaları oń. Sınıw nızamı boyınsha

$$n \sin(-i) = n' \sin(-i').$$

Biz qarap atırǵan nurdı paraksiallıq dep esaplap, sinuslardı múyeshlerdiń ózleri menen almatıramız hám bunday jaǵdayda

$$n(-i) = n'(-i') \quad (1)$$

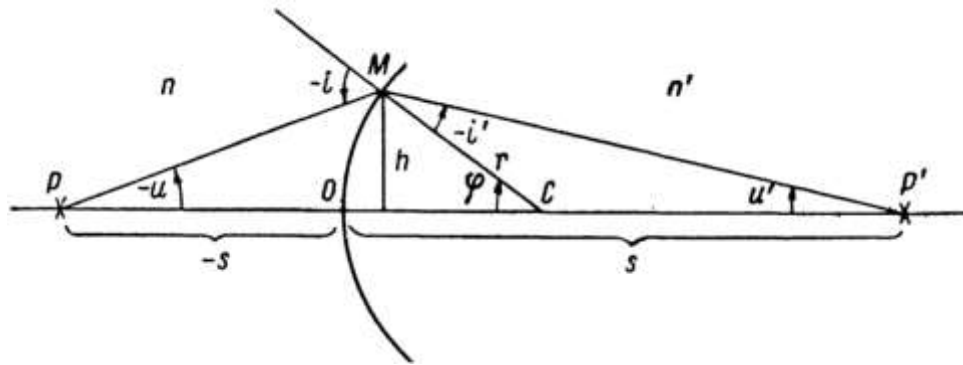
teńligine iye bolamız.

PMC úsh múyeshliginen $-i = \varphi - u$ teńligine hám CMP' úsh múyeshliginen $-i' = \varphi - u'$ teńliklerine iye bolamız. Bul teńliklerde $-u$ menen u' arqalı PM hám MP' nurları menen bas optikalıq kósherdiń arasındaǵı oń múyeshler, al φ bolsa sol kósher menen CM radiusınıń arasındaǵı oń múyesh bolıp tabıladı.

$-i$ múyeshi menen $-i'$ múyeshiniń bul mánisleri (1)-teńlikke qoyıp

$$n(\varphi - u) = n'(\varphi - u') \quad (2)$$

teńligine iye bolamız.



242-сúwret. Jaqtılıqtıń bir sferalıq bettegi sınırı.

$-s$ hám s' arqalı sáykes sindırıwshı bettiń tóbesinen P hám P' noqatlarına shekemgi qashılıqtı hám h arqalı M noqatınan PC kósherine túsirilgen perpendikulyardıń uzınlıgın belgilep, biz qarap atırǵan juwıqlaw ushın

$$-u = \frac{h}{-s}, \quad u' = \frac{h}{s'}$$

teńliklerine iye bolamız. Tap sol sıyaqlı φ múyeshi ushın

$$\varphi = \frac{h}{r}$$

qatnasın alamız.

Bul $-u$, u' hám φ shamaların (2)-teńlikke qoyıp,

$$n \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{s} \right) = n' \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{s'} \right) \quad (3)$$

yamasa

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' - n}{r} \quad (4)$$

teńliklerine iye bolamız.

(4)-teńliktiń oń tárepinde turǵan shama tek biz qarap atırǵan zatlardıń sindırıw coefficientlerinen hám olardı bólip turǵan shegaranıń iymeklik radiusınan ǵárezli. Demek, berilgen zatlar hám berilgen bet ushın bul shama turaqlı; onı sindırıwshı bettiń optikalıq kúshi dep ataydı hám Φ háripiniń járdeminde belgilenedi:

$$\Phi = \frac{n' - n}{r}. \quad (5)$$

(4)-ańlatpaǵa optikalıq kúshti kirgizip,

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \Phi \quad (5a)$$

ańlatpasına iye bolamız.

P obektiniń belgili bolǵan ornında (s kesindisi berilgen bolsa) (4a) formuladan u múyeshiniń mánisinen ǵárezsiz s' kesindisiniń belgili bolǵan mánisi alınadı. Bul noqatlıq P obektinen kishi u múyeshlerde shıǵatuǵın barlıq nurlardıń sınıwdan keyin bir P' noqatında kesilisetuǵınlıǵın ańǵartadı. Biz qabil etken juwıqlawlarda paraksiallıq nurlar ushın gomooraylıq dáste sferalıq bette sınıǵannan keyin gomooraylıq bolıp qala beredi; P' noqatlıq obekttiń noqatlıq súwreti bolıp tabıladı.

Joqarıda keltirilgen tallawlardan jaqtılıqtıń deregin P' noqatına jaylastırısaq, onda P noqatınıń onıń súwretine aylanatuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Eger eki P hám P' noqatlarınıń biri obekt bolatuǵın, al ekinshisi onıń súwreti bolatuǵın bolsa, onda olardı túyinles noqatlar dep ataydı.

Bas optikalıq kósher menen úlken u múyeshlerin jasaytuǵın nurlar sferalıq bette sınıǵannan keyin bir P noqatında kesilispeydi, sınıǵannan keyin dáste gomooraylıq bolıwdan qaladı hám noqatlıq obekt noqatlıq súwretti bermeydi.

Házirshe paraksiallıq nurlardı qaraw menen sheklenip, sferalıq bette singannan keyin parallel nurlar dástesiniń qaysı orında jıynalatuǵınlıǵın tabamız. Onıń ushın $-s = \infty$ teńligi orınlanadı dep boljaymız. Bunday jaǵdayda (4)-formula boyınsha:

$$s' = \frac{n'}{n' - n} r \quad (6)$$

ańlatpasına iye bolamız.

Sferalıq betke parallel dáste túrinde túsetuǵın nurlardıń singannan keyin kesilisetuǵın ornı *sındırıwshı bettiń ekinshi bas fokusu F'* dep ataladı. Al, *sındırıwshı bettiń tóbesi O* menen ekinshi bas fokusqa shekemgi qashıqlıqtı *ekinshi bas fokuslıq qashıqlıq f'* dep ataydı. (6) boyınsha f' boyınsha mınaday mánisti alamız:

$$f' = \frac{n'}{n' - n} r. \quad (7)$$

Sındırıwshı bettiń *birinshi sındırıwshı fokusu F* dep mınaday shártti qanaatlandıratuǵın noqatqa aytamız: bul noqatqa jaqtılıqtıń P noqatlıq deregin jaylastırǵanda singannan keyin parallel nurlardıń dástesiniń alınıwı kerek. Sındırıwshı bettiń tóbesi O noqatınan birinshi bas fokusqa shekemgi qashıqlıq *birinshi bas fokuslıq qashıqlıq f* dep ataladı. f ti anıqlıw ushın (4)-formudaǵı $s' = \infty$ mánisin qoysaq, onda

$$f = -\frac{n}{n' - n} r \quad (8)$$

formulasına iye bolamız.

(7)- hám (8)-formulalardı salıstırıw jolı menen birinshi hám ekinshi bas fokuslıq qashıqlıqlardıń arasındaǵı qatnastı tabamız:

$$\frac{f'}{f} = -\frac{n'}{n}. \quad (9)$$

(9)-formuladan bas fokuslıq qashıqlıqlardıń fokuslar jatqan zatlardıń sındırıw koefficientlerine proporcional ekenligin kórsetedi. (9)-teńliktiń oń tárepindegi minus belgisi bas fokuslıq qashıqlıqlardıń hár qıylı belgilerge iye bolatuǵınlıǵın kórsetedi, yaǵnıy birinshi hám ekinshi bas fokuslar sındırıwshı bettiń hár qıylı táreplerinde jaylasqan.

(4a) formulaǵa bas fokuslıq qashıqlıqlardı kirgizemiz. Onıń ushın bul formulanıń oń hám shep bólimlerin $\frac{n'-n}{n}$ shamasına bólemiz

$$\frac{1}{s'} \cdot \frac{n'}{n' - n} r - \frac{1}{s} \cdot \frac{n}{n' - n} r = 1$$

yamasa (7)- hám (8)-qatnaslardıń tiykarında

$$\frac{f'}{s'} + \frac{f}{s} = 1 \quad (4b)$$

ańlatpasın alamız.

(4b) formulaǵı basqa da túr beriwge boladı. Onıń ushın P hám P' nokatlarınıń ornın anıqlaw ushın kesindilerdi sındırıwshı bettiń O tóbesinen emes, al sáykes birinshi hám ekinshi bas fokuslar F hám F' lerden ótkeriwimiz kerek. Bul kesindilerdi x hám x' arqalı belgileybiz (243-súwret). Bunday jaǵdayda

$$-s = -f - x; \quad s' = f' + x'$$

teńliklerine iye bolamız. s penen s' tıń mánislerin (4b) ǵa qoyıp,

$$\frac{f'}{f' + x'} + \frac{f}{f + x} = 1$$

yamasa

$$f'(f + x) + f(f' + x') = (f' + x')(f + x)$$

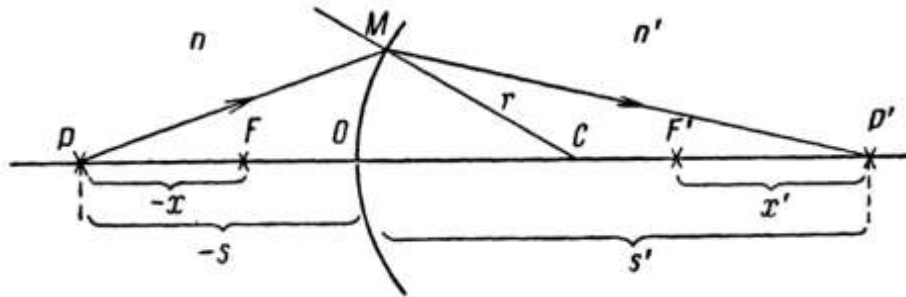
teńliklerin alamız.

Qawsırmalardı ashıp hám uqsas aǵzalardı qısqartıp, biz mınaday ańlatpaǵa kelemiz:

$$xx' = ff'. \quad (4c)$$

Usınday simmetriyalı túrdegi bul formulanı Nyuton formulası dep ataydı.

(4)-, (4a)-, (4b) hám (4c) formulaları bir birine tolıq ekvivalent: olardıń hár biri noqatlıq obektin turgan ornı boyınsha onıń súwretin tabıwǵa múmkinshilik beredi.



243-súwret. Bas fokuslardan baslap túsilgen x hám x' kesindileriniń járdeminde obektin ornı P menen onıń súwretiniń ornı P' tı tabıw.

Eń aqırında bas fokuslıq qashılıqlar f hám f' penen sındırıwshı bettin optikalıq kúshi Φ tiń arasındaǵı qatnastı tabamız.

(5)-, (7)- hám (8)-formulalardı salıstırıp,

$$\Phi = \frac{n'}{f'} = -\frac{n}{f} \quad (10)$$

formulasına iye bolamız.

Bir sferalıq sındırıwshı bet ushın alınǵan nátiyjelerdi sferalıq ayna ushın ulıwmalastırıwǵa boladı. Meyli, i - túsiw múyeshi, al i' - shaǵılısw múyeshi bolsın. Biz kirgizgen belgiler qaǵıydasın esapqa alǵanda shaǵılısw nızamı mınaday túrge enedi:

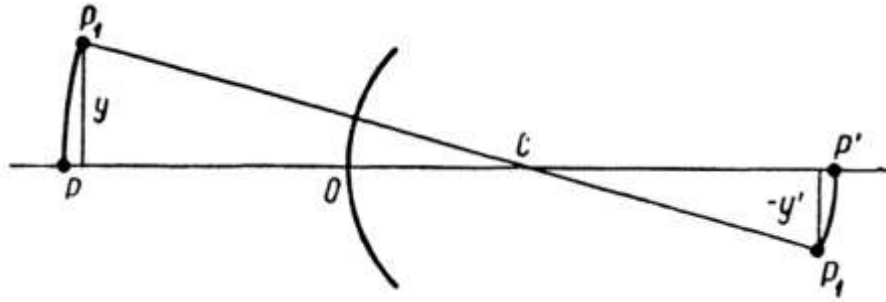
$$i = -i'.$$

Eger sındırıw koefficienti n' tı $-n$ ge teń etip alsa, onda bul nızam (1)-sınıw nızamınan formallıq túrde alınadı. Bunnan bir sındırıwshı bet ushın alınǵan formulalar da, eger olarda $n' = -n$ teńligi orınlanadı dep boljasa, onda sferalıq aynalar ushın jazılǵan formulalarǵa ótetuǵınlıǵın kóriwge boladı. Mısalı, (4)-formuladan mınanı alamız:

$$\frac{1}{s'} + \frac{1}{s} = \frac{2}{r}.$$

Bul teńlik obektin turgan ornı boyınsha sferalıq ayna tárepinen beriletuǵın súwretin ornın ańılawǵa múmkinshilik beredi.

§ 317. Bir sındırıwshı bet tárepinen beriletuǵın úlkeytiw. Usı waqıtqa shekem biz noqatlıq obektin hám usı noqatlıq obektin sferalıq sındırıwshı bet tárepinen beriletuǵın noqatlıq súwretin qaradıq. Endi optikalıq kósherge perpendikulyar bolǵan tuwrınan kesindisiniń súwretiniń qanday bolatuǵınlıǵın qaraymız. Onıń ushın 214-súwretke itibar beremiz. Bul súwrette P - noqatlıq obekt hám P' onıń súwreti. PC kósherin sındırıwshı bettin iymeklik orayı C nıń dógerinde kishi múyeshke buramız. Bunday jaǵdayda P noqatı P_1 awhalına, al onıń súwreti P'_1 awhalına ótedi. PP_1 doǵasınıń barlıq noqatları $P'_1P'_1$ doǵasınıń sáykes noqatları menen súwretlenedi. Eger PP_1 hám $P'_1P'_1$ doǵaları kishi bolsa, onda biz olardı POP' kósherine perpendikulyar bolǵan tuwrı sızıqlı y kesindileri menen almasıra alamız. Nátiyjede biz optikalıq kósherge perpendikulyar bolǵan kishi y kesindisiniń súwretiniń optikalıq kósherge perpendikulyar bolǵan y' kesindisi bolıp tabılatuǵınlıǵın kóremiz. Bunnan, optikalıq kósherge perpendikulyar bolǵan tegis ΔS betiniń súwretiniń de optikalıq kósherge perpendikulyar $\Delta S'$ tegis beti bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Bul juwmaq kishi bolǵan ΔS maydanları ushın durıs. Eger ΔS maydanınıń ólshemleri úlken bolsa, onda onıń súwretin tegis dep esaplawǵa bolmaydı: súwret belgili formaǵa iye mayıstırılǵan bettin bir bólimi bolıp tabıladı.



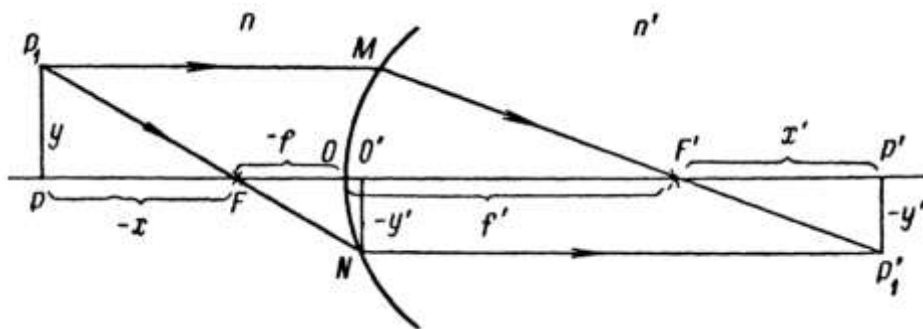
244-сúwret. PP_1 dóғasında jatatuǵın noqatlar $P'P_1'$ dóғasında jatatuǵın noqatlar menen súwretlenedi.

Súwrettiń hár bir noqatı obekttiń túyinles noqatınan shıǵatuǵın barlıq nurlardıń kesilisiw ornı bolıp tabıladı. Bul orındı tabıw ushın qálegen eki nurdıń kesilisiwin tabıw jetkilikli. Mısal retinde optikalıq kósherge perpendikulyar bolǵan PP_1 kesindisi túrindegi obektı qaraymız (245-сúwret). P_1 noqatınıń súwretin tabıw ushın sferalıq bette sınıǵannan keyingi baǵıtları bizge belgili bolǵan tómendegidey eki nurdan paydalanamız: 1) optikalıq kósherge parallel bolǵan P_1M nurdı; sınıǵannan keyin ol ekinshi bas fokus F' arqalı ótedi; birinshi bas fokus arqalı ótetuǵın P_1FN nurın; bul nur sınıǵannan keyin optikalıq kósherge parallel ótedi. Bul eki nurdıń kesilisiw noqatın P_1' arqalı belgilesek, onda ol P_1 noqatınıń súwretin beredi. PP_1 kesindisiniń súwreti optikalıq kósherge perpendikulyar bolǵan $P_1'P'$ kesindisi bolıp tabıladı.

Obekttiń uzınlıǵın y , al onıń súwretiniń uzınlıǵın y' arqalı belgileyik. Súwrettiń sızıqlı ólshemleriniń obekttiń sızıqlı ólshemleriniń qatnasın sızıqlı úlkeytiw β dep ataydı:

$$\beta = \frac{y'}{y}. \quad (1)$$

Eger optikalıq kósherge perpendikulyar bolǵan kesindi joqarıǵa qaray baǵıtlanǵan bolsa oń, al tómenge qaray baǵıtlanǵan bolsa teris den esaplawǵa kelisemiz. 245-сúwrette keltirilgen jaǵday ushın obekttiń uzınlıǵı oń, al súwrettiń uzınlıǵı teris. N noqatınan optikalıq kósherge perpendikulyar túsiremiz; bul perpendikulyardıń uzınlıǵı bolǵan NO' shaması $-y'$ shamasına teń.



245-сúwret. Súwretti qurıw.

PP_1F hám $NO'F$ úsh múyeshliklerinen mınaǵan iye bolamız:

$$\frac{-y'}{y} = \frac{-f}{-x}.$$

Bunnan sızıqlı úlkeytiw ushın

$$\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{f}{x} \quad (2)$$

ańlatpasına iye bolamız. 316-paragraftaǵı (4c) $xx' = ff'$ túrindegi Nyuton formulasın paydalanıp $\frac{f}{x} = \frac{x'}{f'}$ teńligine iye bolamız. Bunnan keyin (2)-ańlatpaǵa mınaday túr beriwge boladı:

$$\beta = -\frac{x'}{f'}. \quad (2a)$$

Sızıqlı úlkeytiw β ushın jazılğan ańlatpanı jáne de bir neshe túrge keltiriwge boladı. P_1O hám OP'_1 nurların júrgizemiz, bul belgilewlerde O arqalı sindırıwshı bettiń tóbesi belgilengen. Optikalıq kósher sindırıwshı betke normal bolǵanlıqtan, $\angle P_1OP$ túsiw múyeshi i , al $\angle P'OP'_1$ sınıw múyeshi i' bolıp tabıladı. 246-súwretten mınaǵan iye bolamız

$$y = -s \cdot i, \quad -y' = s' \cdot i'.$$

Bunnan

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{s'}{s} \cdot \frac{i'}{i}$$

ańlatpasın alamız. Biz qarap atırǵan jaqınlasıwda sınıw nızamınan $ni = n'i'$ yamasa

$$\frac{i'}{i} = \frac{n}{n'}$$

teńligine iye bolamız.

$\frac{i'}{i}$ qatnasınıń bul mánisin β ushın jazılğan ańlatpaǵa qoyıp,

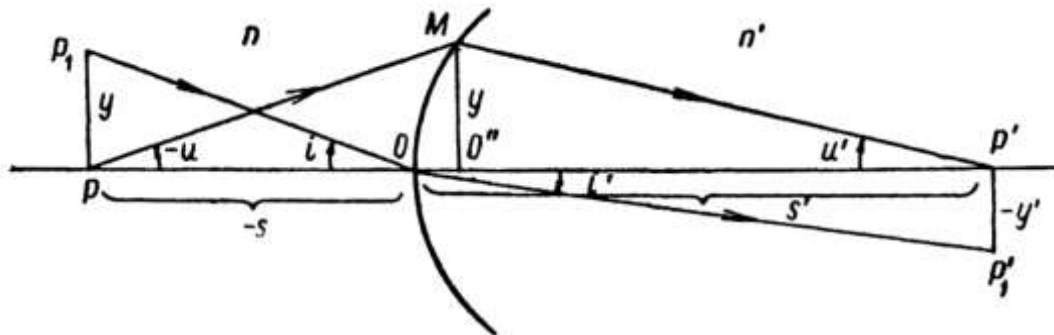
$$\beta = \frac{n}{n'} \cdot \frac{s'}{s} \quad (3)$$

ańlatpasınıń orınlı ekenligine kóz jetkeremiz.

Bunnan keyin PM hám MP' nurların júrgizemiz hám M noqatınan optikalıq kósherge MO'' perpendikulyarın júrgizemiz. Bunday jaǵdayda $MO'' = y$ hám PMO'' hám $P'MO''$ úsh múyeshliklerinen

$$\frac{-u}{u'} = \frac{O''P'}{O''P}$$

teńligine iye bolamız.



246-súwret. Súwretti qurıw.

Biraq, juwıq túrde $O''P = -s$ hám $O''P' = s'$. Bunnan

$$\frac{s'}{s} = \frac{u}{u'}$$

teńliginiń orınlı ekenligi kelip shıǵadı.

s'/s tiń bul mánisin (3) ke qoyıp, sızıqlı úlkeytiw ushın jáne bir ańlatpaǵa iye bolamız:

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{n}{n'} \cdot \frac{u}{u'}. \quad (3a)$$

(Za) qatnastan

$$y'n'u' = ynu \quad (4)$$

teńligine iye bolamız. ynu kóbeymesi *Lagranj-Gelmgolc invariantı* dep ataladı.

$-u$ múyeshi y obekti $-s$ qashıqlıǵınan kórinetuǵın múyesh, al u' múyeshi bolsa sol obekt s' qashıqlıqtan kórinetuǵın múyesh bolıp tabıladı. *Múyeshlik úlkeytiw γ* dep

$$\gamma = \frac{tg u'}{tg u} \quad (5)$$

shamasına aytamız. Biz qabıl etken juwıqlawda tangenslerdi múyeshler menen almasırwǵa boladı hám bunday jaǵdayda

$$\gamma = \frac{u'}{u} \quad (5a)$$

teńligine iye bolamız.

Sızıqlı hám múyeshlik úlkeytiwlerdiń arasındaǵı baylanıstı tabamız. (Za) hám (5a) formulalarınan mınaǵan iye bolamız:

$$\beta = \frac{n}{n'} \cdot \frac{1}{\gamma}. \quad (6)$$

Zatlardıń berilgen jubı ushın n/n' qatnası turaqlı bolǵanlıqtan, sızıqlı úlkeytiw múyeshlik úlkeytiwge kerı proporcional.

Boylıq úlkeytiw dep atalatuǵın úlkeytiwdi de qaraymız. Meyli, obekt optikalıq kósherdi boylap dx kesindisine jılıytuǵın bolsın. Bunday jaǵdayda súwret bazı bir dx' kesindisine jılıydı. Boylıq úlkeytiw α dep mınaday shamaǵa aytadı:

$$\alpha = \frac{dx'}{dx}. \quad (7)$$

316-paragraftaǵı (4c) Nyuton formulası boyınsha

$$xx' = ff'.$$

Bul formulanı differenciallaw mınanı beredi:

$$x dx' + x' dx = 0.$$

Usınıń nátiyjesinde boylıq úlkeytiw ushın mınaday ańlatpanı alamız:

$$\alpha = \frac{dx'}{dx} = -\frac{x'}{x}. \quad (8)$$

Úsh úlkeytiwdiń arasındaǵı baylanıstı tabamız: sızıqlı β , múyeshlik γ hám boylıq α . Onıń ushın

$$\beta^2 = \frac{x'}{x} \cdot \frac{f}{f'}$$

teńligi orınlı bolatuǵın (2)- hám (2a) qatnaslarınan paydalanamız. Biraq 316-paragraftaǵı (9)-formula boyınsha $\frac{f}{f'} = -\frac{n}{n'}$. Bunnan

$$\beta^2 = -\frac{x'}{x} \cdot \frac{n}{n'} \quad (9)$$

teńligi alınadı.

(8)- hám (9)-ańlatpalardan

$$\alpha = \frac{n'}{n} \beta^2$$

ańlatpası kelip shıǵadı. Eń aqırında, (6)-teńlik boyınsha $\frac{n'}{n} \beta = \frac{1}{\gamma}$ teńliginiń orınlı ekenligin ańǵaramız. Bul biz izlep atırǵan α , β hám γ arasındaǵı baylanıstı beredi:

$$\alpha = \frac{\beta}{\gamma}.$$

§ 318. Juqa linzalar. Optikalıq linza dep bir tekli móldir zattan soǵılǵan hám keminde beriwi nolge teń bolmaǵan iymeklik radiusına iye betler menen sheklengen denegge aytadı. Ádette linzanı sheklep turatuǵın betler sferalıq bolıp tabıladı hám tek usınday linzalardı biz qaraymız. Kózge kórinetuǵın jaqtılıqta paydalanılatuǵın linzalar ushın material sıpatında shiyshe, al ultrafiolette paydalanılatuǵın linzalar ushın tiykarınan kvarc paydalanıladı. Infraqızıl nurlar ushın kvarctan, tas duzınan, KCl h.t.b. soǵılǵan linzalar qullanıladı.

316- hám 317-paragraflarda biz bir sferalıq bettegi jaqtılıqtıń sınıwın qaradıq. Linzadaǵı jaqtılıqtıń sınıwın eki sferalıq bettegi izbe-iz eki sınıw dep qarawǵa boladı. Meyli, O_1 menen O_2

ler radiusları r_1 menen r_2 bolğan hám bir birinen d qashıqlıqta jaylasqan eki sferalıq bet bolsın (247-súwret). Sistemanıń bas optikalıq kósheri dep olardıń orayları C_1 hám C_2 arqalı ótetuǵın tuwrıǵa aytamız. Meyli, betlerdiń aralıǵında sındırıw koefficienti n bolğan zat, al betlerdiń sırtında hawa bolsın. Hawanıń sındırıw koefficientin 1 ge teń dep esaplaymız. Birinshi betke tiyisli bolğan shamalardı 1 indeksi menen, al ekinshi betke tiyisli bolğan shamalardı 2 indeksi menen belgileymiz. Sonıń menen birge 316- hám 317-paragraflarda qabıl etilgen basqa da belgilewlerdi paydalanıp, mınaday teńliklerge iye bolamız:

$$n_1 = n'_2 = 1, \quad n'_1 = n_2 = n. \quad (1)$$

Meyli, P_1 - sistemanıń bas optikalıq kósheriniń boyında birinshi sındırıwshı betten $-s_1$ qashıqlıǵında jaylasqan noqatlıq obekt bolsın. Eger tek bir sındırıwshı bet bar bolğan jaǵdayda, onda súwret O_1 den s'_1 qashıqlıǵında jaylasqan P'_1 nıqatında alınǵan bolar edi. Bul súwretti ekinshi sındırıwshı bet ushın obekt sıpatında qaraw kerek. Bul obekt ekinshi sındırıwshı bettiń tóbesi O_2 den s_2 qashıqlıǵında jaylasqan; onıń súwreti O_2 den s'_2 qashıqlıǵında jaylasqan P'_2 nıqatında alınadı. Usınıń menen birge P'_2 sındırıwshı betlerdiń ekewiniń jınaǵı beretuǵın P_1 obektiniń súwreti bolıp tabıladı.

P'_2 nıqatınıń ornın tabıw ushın 316-paragraftaǵı hár bir sındırıwshı bet ushın jazılǵan (4)-formulanı qollanamız. (1)-qatnas orınlanǵan jaǵdayda

$$\frac{n}{s'_1} - \frac{1}{s_1} = \frac{n-1}{r_1}, \quad (2)$$

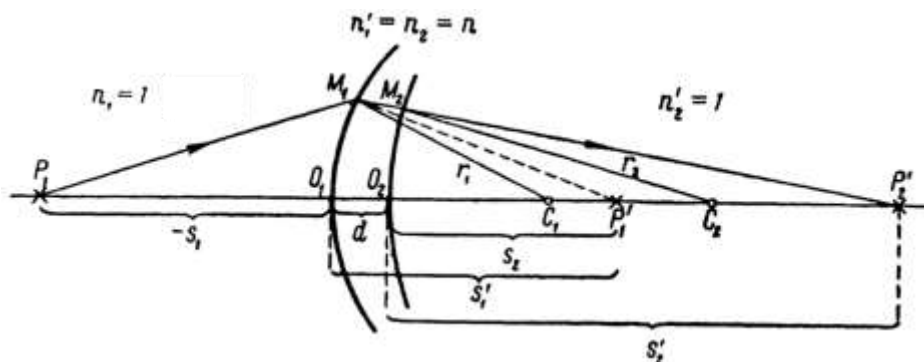
$$\frac{1}{s'_2} - \frac{n}{s_2} = \frac{1-n}{r_2} \quad (3)$$

teńlikleri orınlı boladı.

247-súwretten s_2 menen s'_1 shamalarınıń arasında

$$s_2 = s'_1 - d$$

qatnasınıń bar ekenligi kórinip tur.



247-súwret. Juqa linzadaǵı nurlardıń sınıwı.

Juqa linzanı, yaǵnıy onıń sındırıwshı betleriniń arasındaǵı qashıqlıq d obektten súwretke shekemgi qashıqlıqtan kishi bolatuǵın linzanı qaraymız. Bunday jaǵdayda $s_2 = s'_1$ teńligi juwıq túrde orınlanadı hám (2) den

$$\frac{n}{s_2} = \frac{n}{s'_1} = \frac{1}{s_1} + \frac{1-n}{r_2}$$

teńligi alınadı. Usınday jollar menen tabılǵan $\frac{n}{s_2}$ niń mánisin (3) ke qoyıp, mınanı alamız:

$$\frac{1}{s'_2} - \frac{1}{s_1} - \frac{1-n}{r_1} = \frac{1-n}{r_2}. \quad (4)$$

Juqa linzanı qaraǵanda obekt penen súwretke shekemgi qashıqlıqlardı s hám s' arqalı ańlatamız hám bunday jaǵdayda (4)-ańlatpa boyınsha juqa linza ushın:

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s_1} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (5)$$

ańlatpasına iye bolamız.

Berilgen linza ushın onıń betleriniń iymeklikleriniń radiusları r_1 menen r_2 , linza soǵılǵan zattıń sındırıw kórsetkishi n berilgen boladı. Sonlıqtan (5)-ańlatpanıń oń tárepinde turaqlı bolǵan hám *linzanıń optikalıq kúshi* dep atalatuǵın

$$\Phi = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (6)$$

shaması tur. Juqa linzanıń optikalıq kúshiniń onıń eki sındırıwshı betleriniń optikalıq kúshleriniń qosındısına teń ekenligin ańsat kóriwge boladı: $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$.

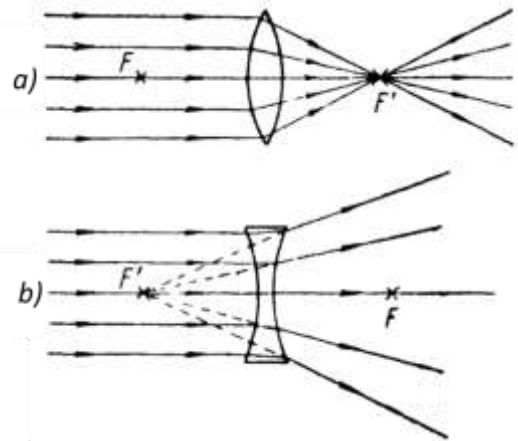
(5)-formula juqa linza beretuǵın súwret penen obekttiń turǵan orınların baylanıstıradı.

316-paragrafta bir sındırıwshı bet ushın keltirilgen tallawlardı qaytalap, juqa linzanıń fokuslıq qashıqlıǵı ushın mınaday ańlatpaǵa iye bolamız:

$$f' = -f = \frac{1}{\Phi} = \frac{1}{(n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)}. \quad (7)$$

n koefficientiniń mánisi barlıq waqıtta 1 den úlken ($n > 1$). Demek, optikalıq kúsh Φ tiń belgisi $\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$ shamasınıń belgisinen ǵárezli boladı. Eger Φ tiń mánisi oń bolsa, onda biz *jiynawshı (oń) linzaǵa* iye bolamız. Bunday linzada jaqtılıqtıń parallel dástesi linzada sıǵannan keyin onıń ekinshi bas fokusında jiynaladı (248a súwret). Eger Φ tiń mánisi teris bolsa, onda biz *shashıratiwshı (teris) linzaǵa* iye bolamız. Bunday linzada jaqtılıqtıń parallel dástesi sıǵannan keyin nurlardıń tarqalıwshı dástesin payda etedi hám olardıń dawamı ekinshi bas fokusta kesilisedi (248b súwret).

Juqa linza tárepinen payda etiletuǵın súwretti bir sındırıwshı bet bolǵan jaǵdaydaǵıday mınaday nurlardıń júrisin biliw arqalı qurıwǵa boladı (249-súwret): 1) optikalıq kósherge parallel bolǵan PM nurınıń, bunday nur linzada sıǵannan keyin onıń ekinshi bas fokusu F' arqalı ótedi; 2) birinshi bas fokus F arqalı ótetuǵın PN nurınıń, bunday nur linzada sıǵannan keyin optikalıq kósherge parallel baǵıtta tarqaladı.

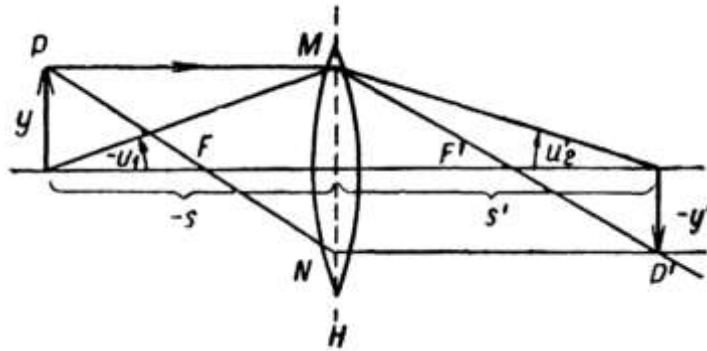


248-súwret.
Linzalar: a) jiynawshı,
b) shashıratiwshı.

Obekttiń ornı y penen súwrettiń ornı y' linzanıń ortasınan baslap ólshengen (yamasa onıń bir tóbesinen baslap ólshengen) s hám s' kesindileri boyınsha anıqlanadı. Bul kesindiler bir biri menen

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \Phi$$

qatnasınıń járdeminde baylanısqan. Bul teńlikte Φ arqalı linzanıń optikalıq kúshi belgilengen.



249-súwret. Juqa linza beretuǵın súwretti qurıw.

319-paragrafta Lagranj-Gelmgolc teńlemesiniń linza ushın da orınlı bolatuǵınlıǵın kórsetiledi. Bul linza beretuǵın sıızıqlı úlkeytiwdi s hám s' kesindileriniń ólshemleri menen baylanıstırıwǵa múmkinshilik beredi. Lagranj-Gelmgolc invariantınan mınaǵan iye bolamız:

$$y'n'_2u'_2 = yn_1u_1.$$

Eger linza hawada jaylasqan bolsa, onda $n'_2 = n_1 = 1$ hám Lagranj-Gelmgolc invariantınan mınaday teńlik kelip shıǵadı:

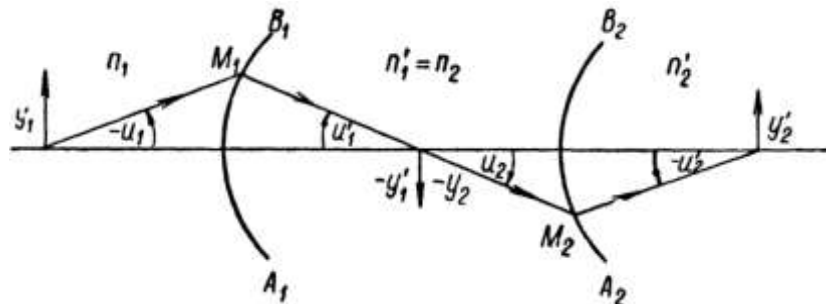
$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{u_1}{u'_1}.$$

249-súwretten $\frac{u_1}{u'_1} = \frac{s'}{s}$ teńliginiń orınlı ekenligi kórinip tur. Bunnan sıızıqlı úlkeytiw β ushın mınaday ańlatpanı alamız:

$$\beta = \frac{s'}{s}. \quad (8)$$

§ 319. Oraylastırılǵan betlerdiń sisteması. Bas tegislikler. Hár qıylı sındırıw koefficientlerine hám ıqtıyarlı radiuslarǵa iye bolǵan sferalıq betlerdiń sistemasın qaraymız. Eger barlıq betlerdiń iymeklik orayları bir tuwrınıń boyında jaylasqan bolsa, onda sisteması *oraylastırılǵan* dep ataydı.

Burıńıday, paraksiallıq nurlardı qaraw menen sheklenemiz. Sistemadaǵı jaqtılıq dástesiniń sınırıw biz hár bir sferalıq bettegi sınıwdı izbe-iz qaraw jolı menen anıqlawǵa boladı. Bunday jaǵdayda hár bir aldınǵı bet tárepinen alınatuǵın súwret bunnan keyingi bet ushın obekt xızmetin atqaradı. Biz qabıl etken juwıqlawda betlerdiń hár qaysısında sınıǵanda gomooraylıq dáste gomooraylıq dáste bolıp qala beredi. Sonlıqtan barlıq sistema arqalı ótkende dásteniń gomooraylıǵı buzılmaıdı. Bunnan noqatlıq obekt bolǵan jaǵdayda sistemasınıń paraksiallıq nurlarda noqatlıq súwrette beretuǵınlıǵı kelip shıǵadı.



250-súwret. Oraylastırılǵan sındırıwshı betlerdiń sisteması.

Sistema ushın Lagranj-Gelmgolc invariantın paydalanıwǵa bolatuǵınlıǵın kórsetiwge boladı [317-paragraftaǵı (4)-formula]. Haqıyatında da, biziń sistemamızda birinshi sındırıwǵın eki A_1B_1 hám A_2B_2 betlerin alamız (250-súwret). A_1B_1 tegisliginiń shep tárepindegi zattıń sındırıw koefficientin n_1 , al onıń oń tárepindegi zattıń sındırıw koefficientin n'_1 arqalı belgileybiz. Tap sol

siyaqlı A_2B_2 betine qatnası boyınsha onı sheklep turğan zatlardıń sındırıw koefficientlerin n_2 hám n'_2 arqalı belgileymiz. Eki bettiń ortasında bir zat jaylasqan bolǵanlıqtan

$$n'_1 = n_2 \quad (1)$$

teńligi orınlı boladı. A_1B_1 tegisliginde sınatuǵın hám A_2B_2 tegisligine kelip túsetuǵın M_1M_2 nurın qaraymız. Usı nurdıń optikalıq kósher menen jasaytuǵın múyeshlerin u'_1 hám u_2 arqalı belgileymiz. 250-súwrette kórinip turǵanıday,

$$u'_1 = u_2 \quad (2)$$

teńliginiń orınlanatuǵınlığına isenemiz.

Aqırında, A_1B_1 hám A_2B_2 tegisliklerine salıstırǵanda biz qarap atırǵan obektler menen súwretlerdiń uzınlıqların y_1 , y_2 , y'_1 hám y'_2 arqalı belgileymiz. A_1B_1 beti tárepinen beriletuǵın súwret A_2B_2 beti ushın obekt bolıp tabılatuǵın bolǵanlıqtan

$$y'_1 = y_2 \quad (3)$$

teńligi orınlı boladı. A_1B_1 hám A_2B_2 tegisliklerine qatnası boyınsha biz Lagranj-Gelmgolc invariantın jaza alamız:

$$\begin{aligned} n_1 y_1 u_1 &= n'_1 y'_1 u'_1, \\ n_2 y_2 u_2 &= n'_2 y'_2 u'_2. \end{aligned}$$

(1)-(3) qatnaslarınan paydalanıp joqarıdaǵı teńliklerden

$$n_1 y_1 u_1 = n'_1 y'_1 u'_1 = n_2 y_2 u_2 = n'_2 y'_2 u'_2$$

teńliklerine iye bolamız. Teńliklerdiń tap usınday sistemasın qońsılas betlerdiń jubı ushın da jaza alamız. Olardıń eń sońǵısınıń qatar sanın k arqalı belgilesek, onda nátiyjede mınaday teńliklerdi alamız:

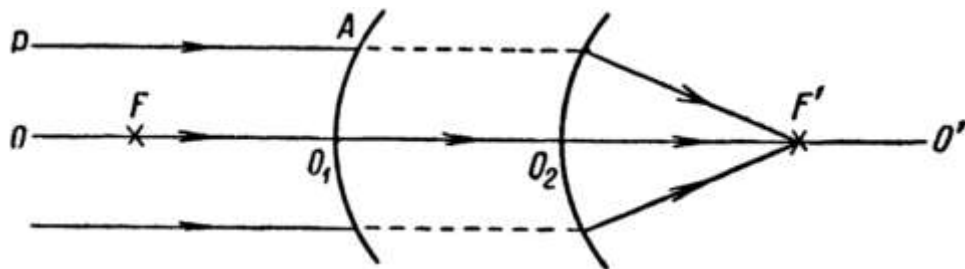
$$n_1 y_1 u_1 = n'_1 y'_1 u'_1 = n_2 y_2 u_2 = \dots = n'_k y'_k u'_k. \quad (4)$$

Barlıq aralıqlıq aǵzaldı jazbaǵan jaǵdayda

$$n_1 y_1 u_1 = n'_k y'_k u'_k \quad (4a)$$

teńligine iye bolamız. Bul teńlikte y_1 arqalı sistemaniń aldında jaylasqan obekttiń ólshemi, al y'_k arqalı jaqtılıq barlıq sistema arqalı ótkennen keyin alınatuǵın súwrettiń ólshemi belgilengen. Solay etip, (4a) teńligi pútini menen alıńǵan sistema ushın jazılǵan Lagranj-Gelmgolc invariantı bolıp tabıladı.

Sistema ushın durıs bolǵan barlıq basqa qatnaslardı ayırım betlerdegi izbe-iz sınıwlardı qaraw arqalı tap usınday jollar menen tabıwǵa boladı. Biraq, sistemaniń bazı bir ulıwmalıq qásiyetlerin usınday mayda-shúydesine shekem qaramay-aq tabıwǵa boladı.

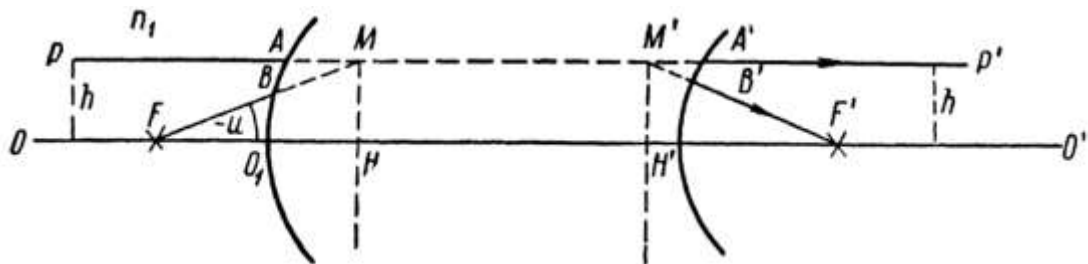


251-súwret. Oraylastırılǵan sistemaniń bas fokusları.

Meyli, oraylastırılǵan sferalıq betlerden turatuǵın sistema berilgen bolsın (251-súwret). Barlıq betlerdiń imeklik orayları arqalı ótetuǵın OO' tuwrısı sistemaniń optikalıq kósheri bolıp tabıladı. Sistemaǵa OO' optikalıq kósherine parallel baǵıtta túsetuǵın PA nurın qaraymız. Sistema arqalı ótkende bul nur (yamasa onıń dawamı) optikalıq kósherdi bazı bir F' noqatında kesip ótedi. Optikalıq kósherdiń baǵıtında júretuǵın nur sistema arqalı sınıwsız ótedi, sebebi ol sındırıwshı betlerdiń hár qaysısına normal baǵıtta túsedı. Demek, eki PA hám OO' nurları sistema arqalı ótkennen keyin sol F' noqatında kesilisedi. Paraksiallıq nurlar ushın sistema gomooraylıq dásteni gomooraylıq dáste etip saqlaytuǵın bolǵanlıqtan, optikalıq kósherge parallel bolǵan barlıq nurlar

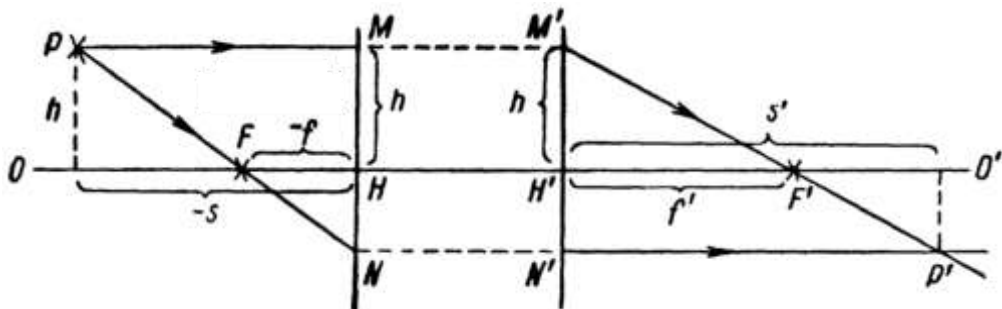
sıngannan keyin F' noqatında kesilisedi dep juwmaq shıǵaramız. Tap usınday tallawlardan keyin qanday da bir F noqatınıń bolatuǵınlıǵın hám usı noqattan shıǵatuǵın nurlardıń sistemada sıngannan keyin optikalıq kósherge parallel nurlardıń dástesin payda etetuǵınlıǵın anıqlawǵa boladı. F hám F' noqatları sistemanıń bas fokusları bolıp tabıladı. Solay etip, oraylastırılǵan sındırıwshı betlerdiń sistemasınıń bir bet sıyaqlı eki bas fokusqa iye bolatuǵınlıǵın kóremiz.

OO' optikalıq kósherine parallel bolǵan PA nurın qaytadan qaraymız (252-súwret); meyli, optikalıq kósherden bazı bir iqtıyarlı h qashıqlıǵınan ótetuǵın bolsın. Sıngannan keyin ol sistemanıń ekinshi bas fokusu F' arqalı ótetuǵın $B'F'$ nurın payda etedi. Sistemanıń birinshi bas fokusu F arqalı ótetuǵın qálegen nur, sıngannan keyin optikalıq kósherge parallel bolǵan nurdı beredi. Bul nur menen OO' optikalıq kósheriniń arasındǵı qashıqlıq FB nurınıń qıyalıǵınan ǵárezli. FB nurınıń qıyalıǵın barlıq waqıtta oǵan sáykes keletuǵın $A'P'$ nurın kósherden h qashıqlıǵında ótetuǵınday etip saylap alıwǵa boladı. PA hám FB nurları (yamasa olardıń dawamları) bazı bir M noqatında, al $A'P'$ hám $B'F'$ nurları (yamasa olardıń dawamları) M' noqatında kesilisedi. M hám M' noqatlarınıń orınları nurlardıń biz qarap atırǵan sistemaǵa túsemen degenshe hám sistemadan shıqqannan keyingi júrisi menen anıqlanadı. Bul noqatlardı tabıw ushın sistemanıń ishindegi nurdıń júrisin biliwdiń zárúrliǵi joq hám sonlıqtan 252-súwrette sistemanıń ishindegi nurlar kórsetilmegen; punktir sızıqlar sistemadan tıstaǵı nurlardıń dawamın ǵana kórsetedi.



252-súwret. Sistemanıń bas MH hám $M'H'$ tegislikleri.

M hám M' noqatları sistemanıń optikalıq kósherinen birdey h qashıqlıqta jaylasadı. Usı M hám M' noqatları arqalı OO' optikalıq kósherine perpendikulyar tegisliklerdi júrgizemiz; bul tegislikler sistemanıń bas tegislikleri dep ataladı. Bas tegisliklerdiń optikalıq kósher menen H hám H' kesilisiw noqatların *sistemanıń bas noqatları* dep ataydı. M hám M' noqatları nurlardıń (yamasa olardıń dawamınıń) bir jubınıń kesilisiw orınları bolǵanlıqtan, olar sistemanıń túyinles noqatları bolıp tabıladı. Bunnan bas tegisliklerdiń mınaday anıqlaması kelip shıǵadı: *sistemanıń bas tegislikleri túyinles noqatları optikalıq kósherden birdey bolǵan h qashıqlıǵında jaylasatuǵın túyinles tegislikler bolıp tabıladı.*



253-súwret. MN hám $M'N'$ bas tegislikleri jáne F hám F' bas fokusları berilgen sistema beretuǵın súwretti qurıw.

Eger sistemanıń bas tegislikleri menen bas fokusları belgili bolsa, onda obektтіń berilgen ornı boyınsha sistema beretuǵın súwretтіń ornın tabıwǵa boladı. Haqıyqatında da, meyli, sistema óziniń MN hám $M'N'$ bas tegislikleri jáne F hám F' bas fokusları menen berilgen bolsın (253-súwret). Obektтіń, onıń súwretininiń orınların, sonıń menen birge bas fokuslardı birinshi hám ekinshi bas tegisliklerden baslap esaplaymız. 253-súwrette noqatlıq obektтіń jaylasqan ornı $MP = -s$ kesindisiniń járdeminde anıqlanadı. Optikalıq kósherge parallel bolǵan PM nurı sistemada sıǵannan keyin ekinshi bas fokus F' arqalı ótedi. Bas tegisliklerdiń kórsetilgen qásiyeti boyınsha bul nur (yamasa onıń dawamı) ekinshi bas tegislikti optikalıq kósherden M noqatı qanday qashıqlıqta jaylasqan bolsa, tap sonday bolǵan $h = H'M'$ qashıqlıqta jaylasqan M' noqatında kesip ótedi. Obektten shıǵatuǵın ekinshi nur sıpatında birinshi bas fokus F arqalı ótetuǵın nurdı qaraymız. Bul nur (yamasa onıń dawamı) birinshi bas tegislikti N noqatında hám ekinshi bas tegislikti optikalıq kósherden tap sonday qashıqlıqta jaylasqan N' noqatında kesip ótedi. Sistemada sıǵannan keyin PN nurı optikalıq kósherge parallel bolǵan $N'P'$ nurın payda etedi. PN hám $N'P'$ nurlarınıń kesilisiw noqatı súwretтіń ornı P' tı anıqlaydı.

NPM hám NFH úsh múyeshliginen mınaǵan iye bolamız:

$$\frac{HF}{MP} = \frac{NH}{NM}.$$

Biraq, $MP = -s$ hám $HF = -f$. f - sistemanıń birinshi bas fokuslıq qashıqlıǵı. Nátiyjede tómendegidey qatnasqa iye bolamız:

$$\frac{f}{s} = \frac{NH}{NM}. \quad (5)$$

Usınıń menen bir qatarda $M'P'N'$ hám $M'H'F'$ úsh múyeshliklerinen mınaday qatnasqa iye bolamız:

$$\frac{f'}{s'} = \frac{N'H'}{N'M'}. \quad (6)$$

(5)- hám (6)-teńliklerdi aǵzama-aǵza qosıp

$$\frac{f'}{s'} + \frac{f}{s} = \frac{N'H'}{N'M'} + \frac{NH}{NM} \quad (7)$$

teńligine iye bolamız. Bas tegisliklerdiń kórsetilgen qásiyetleri boyınsha

$$M'N' = NM$$

hám

$$NH = M'N' - M'H'$$

teńlikleri orınlı boladı. Usı qatnaslar boyınsha (3)-teńlik mınaday túrge enedi:

$$\frac{f'}{s'} + \frac{f}{s} = \frac{N'H' + NH}{M'N'}.$$

Eń aqırında

$$\frac{f'}{s'} + \frac{f}{s} = 1 \quad (8)$$

teńligine iye bolamız.

Eger sistemanıń bas fokuslıq qashıqlıǵı hám onıń eki bas tegislikleriniń qalayınsha jaylasqanlıǵı belgili bolsa, onda (8)-teńlik obektтіń berilgen ornı boyınsha (s berilgen) súwretтіń ornın tabıwǵa múmkinshilik beredi. (8)-teńlik 316-paragraftaǵı bir sındırıwshı tegislikke tiyisli bolǵan (4b) teńligine sáykes keledi. Tap usınday jollar menen, eger sistema ushın bir sındırıwshı bet bolǵan jaǵdayda qashıqlıqlar sındırıwshı bettiń tóbesinen baslap esaplanatuǵın jaǵdaydaǵı 316- hám 317-paragraflarda keltirilgen basqa da qatnaslardıń saqlanatuǵınlıǵın kórsetiwge boladı. Mısal retinde 317-paragraftaǵı (2a) ańlatpası menen sáykes keletuǵın sistemanıń sızıqlı úlkeytiwi β ushın ańlatpanı alamız. 317-paragraftaǵıday, birinshi hám ekinshi fokuslardan obekt penen súwretke shekemgi qashıqlıqlardı sáykes x hám x' arqalı belgileymiz. Meyli, y - obektтіń

uzınlığı (254-súwret), al, y' - onıń súwretiniń uzınlığı bolsın. Bunday jaǵdayda $P_1'P'F'$ hám $H'M'F'$ úsh múyeshliklerinen mınaǵan iye bolamız:

$$\frac{-y'}{M'H'} = \frac{x'}{f'}.$$

Bas tegisliklerdiń tiykarǵı qásiyeti boyınsha $M'H' = y$. Bunnan sızıqlı úlkeytiw β ushın mınanı alamız:

$$\beta = -\frac{y'}{y}. \quad (9)$$

Tap sol sıyaqlı PP_1F hám HNF úsh múyeshliginen β ushın ekinshi ańlatpanı alamız:

$$\beta = -\frac{f}{x}. \quad (9a)$$

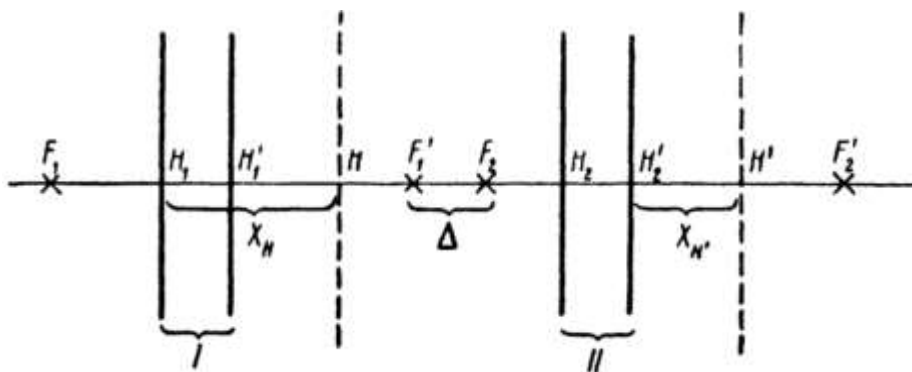
(9)- hám (9a) teńliklerin salıstırıwdan sistema ushın Nyuton formulasınıń durıs ekenligi kelip shıǵadı:

$$zz' = ff'.$$

Obekt birinshi bas tegislikte jatatuǵın jaǵdaydı qaraymız. Bunday jaǵdayda $x = -f$ hám Nyuton formulasınan $x' = -f'$ teńligin alamız. YAǵnıy súwret ekinshi bas tegislikte payda boladı eken. Bunday jaǵdayda (9)-formuladan $\beta = +1$ teńligine iye bolamız. Solay etip, biz bas tegisliklerdiń jáne bir anıqlamasına kelemiz: *bas tegislikler +1 ge teń sızıqlı úlkeytiw sáykes keletuǵın sistemaniń túyinles tegisliklerine sáykes keledi.*

Bir sındırıwshı tegislik ushın fokuslıq qashıqlıq onıń tóbesinen baslap esaplanadı. Bunnan, bas tegisliklerdi anıqlaytuǵın shártlerden ($x = -f$ hám $x' = -f'$) mınaday jaǵday kelip shıǵadı: *bir sındırıwshı bet ushın eki bas tegislik bir birine hám sındırıwshı betke onıń tóbesinde túsirilgen urınba tegislikke sáykes keledi.*

§ 320. Sistemaniń bas fokuslarınıń hám bas tegislikleriniń orınları. Eger sındırıwshı betlerdiń iymeklik radiusları, olardıń arasındaǵı qashıqlıq hám betler tárepinen sheklengen barlıq zatlardıń sındırıw koefficientleri belgili bolsa, onda oraylastırılǵan sistema berilgen dep esaplanadı. Bunnan aldınǵı paragrafta ayılǵan boyınsha hár bir sındırıwshı bettiń bas tegislikleri usı bettiń tóbesinen ótkerilgen urınba tegislikke sáykes keledi. Hár bir sındırıwshı bettiń bas fokuslıq qashıqlıǵın 316-paragraftaǵı (7)- hám (8)-formulalar boyınsha esaplawǵa boladı. Bul maǵlıwmatlar boyınsha barlıq sistemaniń bas tegislikleri menen bas fokuslarınıń orınların tabıwǵa boladı.



255-súwret. Oraylastırılǵan sistemaniń bas tegislikleri menen bas fokuslarınıń orınları.

Meyli, I hám II oraylastırılǵan sistemalarınń hár qaysısı (255-súwret) óziniń bas tegislikleri hám bas fokuslıq qashıqlıqları f_1 , f_1' hám f_2 , f_2' ler menen berilgen bolsın. Bul eki sistemaniń bir birine salıstırǵandaǵı jaylasıwın I sistemaniń ekinshi bas fokusu F' penen II sistemaniń birinshi bas fokusu F_2 tiń arasındaǵı qashıqlıq Δ nı bile otırıp bul eki sistemaniń bir birine salıstırǵandaǵı jaylasıwların anıqlawǵa boladı. Sistemalardıń ekewi arqalı jaqtılıqtıń ótiwın izbe-iz qarap, olar

payda etken sistemanıń bas fokuslıq qashıqlıǵı f ti hám onıń bas tegisliklerin tabıwǵa boladı (mayda shrift penen jazılǵan tekstke qarańız). Bas fokuslıq qashıqlıqlar ushın

$$f = \frac{f_1 f_2}{\Delta}, \quad f' = \frac{f'_1 f'_2}{\Delta}. \quad (1)$$

Barlıq sistemanıń birinshi bas tegisligi H tıń ornı I sistemanıń birinshi bas fokusınan baslap esaplangan X_H kesindisi boyınsha anıqlanadı (255-súwret):

$$X_H = f_1 \frac{\Delta + f'_1 - f_2}{\Delta}. \quad (2)$$

Tap sol sıyaqlı barlıq sistemanıń ekinshi bas tegisligi II sistemanıń ekinshi bas tegisliginen baslap esaplangan

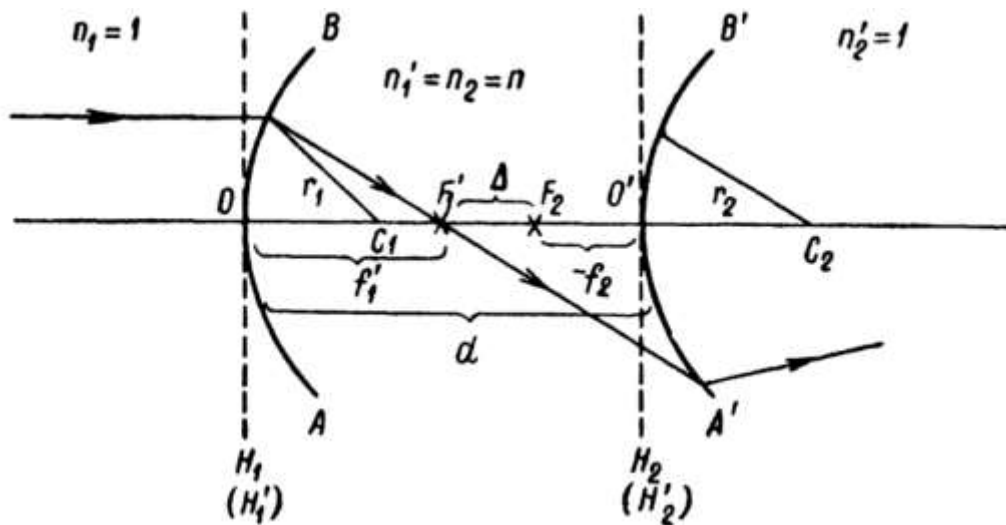
$$X_{H'} = f'_2 \frac{\Delta + f'_1 - f_2}{\Delta} \quad (3)$$

teńliginiń járdeminde anıqlanadı.

Ayırım sındırıwshı betlerdiń bas tegislikleri menen bas fokusları belgili bolǵanlıqtan, (1), (2)-hám (3)-formulalardı izbe-iz paydalanıw jolı menen qálegen quramalı oraylastırılǵan sistemanıń bas tegislikleri menen bas fokusların anıqlawǵa boladı.

Bir qatar dara jaǵdaylardı qaraymız.

1. Qalıń linza. Meyli, qalıń linza eki tárepten bir birinen qashıqlıǵı d ǵa teń iymeklik radiusları r_1 menen r_2 bolǵan eki sferalıq AB hám $A'B'$ betleri menen sheklengen bolsın (256-súwret). AB hám $A'B'$ betleriniń arasındadı zattıń sındırıw koefficientin n arqalı belgileyik. Meyli, linza sındırıw koefficientiniń mánisi 1 ge teń dep esaplanatuǵın hawada jaylasqan bolsın. Birinshi hám ekinshi sındıratuǵın betlerdiń bas tegislikleri sındırıwshı tegisliklerge O hám O' noqatlarında túsirilgen urınba tegisliklerge sáykes keledi (256-súwrette punktir menen kórsetilgen).



256-súwret. Qalıń linzanıń bas fokusları menen bas tegisliklerin tabıw.

Linzanıń birinshi hám ekinshi bas fokuslıq qashıqlıqların salıstıramız. 316-paragraftadı (9)-formulanı paydalanıp birinshi hám ekinshi sferalıq bet ushın mınanı alamız:

$$\frac{f'_1}{f_1} = -\frac{n'_1}{n_1} = -n, \quad \frac{f'_2}{f_2} = -\frac{n'_2}{n_2} = -\frac{1}{n}.$$

Bul teńliklerden

$$\frac{f'_1 f'_2}{f_1 f_2} = \frac{n'_1 n'_2}{n_1 n_2} = \frac{n'_2}{n_1} = 1$$

teńligine iye bolamız.

Bul teńliktiń hám (1)-formulanıń tiykarında (bir tekli ortalıq penen qorshalǵan) linzanıń birinshi hám ekinshi bas fokuslıq qashıqlıqlarınıń shaması boyınsha bir birine teń hám belgisi boyınsha ayrıladı dep juwmaq shıǵaramız²⁶:

$$f = -f'.$$

Sındırıwshı bettiń optikalıq kúshiniń anıqlamasına sáykes [316-paragraftaǵı (10)-formula] sındırıw kórsetkishi n_0 bolǵan bir tekli zatta jaylasqan linzanıń (yamasa linzalardıń oraylastırılǵan sistemasınıń) optikalıq kúshi degende

$$\Phi = \frac{n_0}{f'} = -\frac{n_0}{f}$$

shamasın túsinemiz.

Biz qarap atırǵan jaǵdayda $n_0 = n_1 = n'_1 = 1$ hám

$$\Phi = \frac{1}{f'} = -\frac{1}{f}.$$

Linzanıń optikalıq kúshin tabamız. (1)-formula boyınsha

$$f' = -\frac{f'_1 f'_2}{\Delta}.$$

256-súwretten mınaǵan iye bolamız

$$\Delta = d - f'_1 + f_2. \quad (4)$$

Bunnan linzanıń optikalıq kúshi ushın

$$\Phi = \frac{1}{f'} = -\frac{\Delta}{f'_1 f'_2} = -\frac{d - f'_1 + f_2}{f'_1 f'_2}$$

yamasa

$$\Phi = -\frac{f_2}{f'_1 f'_2} + \frac{1}{f'_2} - \frac{d}{f'_1 f'_2}$$

ańlatpasına iye bolamız.

Joqarıda ayılǵanlar boyınsha

$$\frac{f_2}{f'_2} = -\frac{n_2}{n'_2} = -n.$$

f_2/f'_2 shamasınıń bul mánisin Φ ushın jazılǵan ańlatpaǵa qoyıp

$$\Phi = \frac{n}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} - \frac{d}{f'_1 f'_2}$$

teńligine iye bolamız. Biraq, $\frac{n}{f'_1} = \Phi_1$ hám $\frac{n}{f'_2} = \Phi_2$. Bul ańlatpalarda Φ_1 menen Φ_2 arqalı linzanıń birinshi hám ekinshi sındırıwshı betleriniń optikalıq kúshleri belgilengen. Usı qatnaslardı paydalanıp, qalıń linzanıń optikalıq kúshi Φ ushın mınaday ańlatpanı alamız:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - \frac{d}{n} \Phi_1 \Phi_2. \quad (5)$$

Qalıń linzanıń birinshi bas tegisliginiń ornın anıqlaw ushın (2)-formuladan paydalanamız. Oǵan Δ shamasınıń (4)-ańlatpadaǵı mánisin qoyıp

$$X_H = f_1 \frac{d}{\Delta}$$

ańlatpasına iye bolamız. Onı

$$X_H = \frac{f_1 f_2}{\Delta} \cdot \frac{d}{f_2}$$

²⁶ $f = -f'$ teńligi (bul teńlikte f penen f' arqalı bas fokuslıq qashıqlıqlar belgilengen) tek linza ushın ǵana emes, al bir tekli ortalıqta jaylasqan qálegen oraylastırılǵan sistema ushın durıs. Bunıń durıslıǵına (6)-hám (6a) formulaların paydalanıw hám qálegen k nomerge iye linza ushın $f_k = -f'_k$ teńliginiń orınlı bolatuǵınlıǵınan iseniwge boladı.

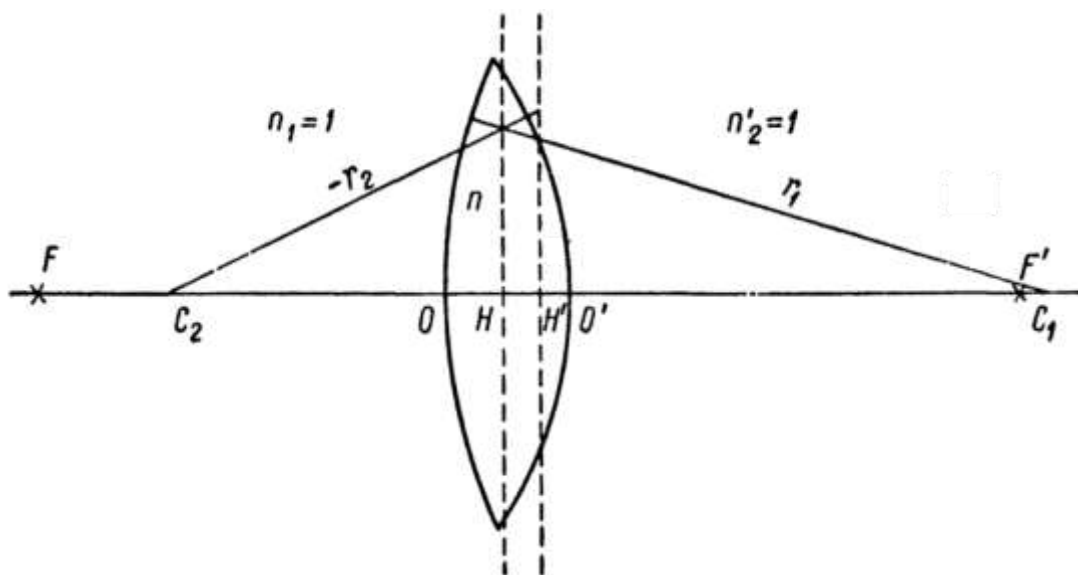
túrinde kóshirip jazıwǵa boladı. (1)-ańlatpa boyınsha $\frac{f_1 f_2}{\Delta}$ shaması linzanıń birinshi bas fokuslıq qashıqlıǵına teń, bunnan

$$X_H = f \cdot \frac{d}{f_2}$$

formulasına iye bolamız. Bunnan keyin $f = -1/\Phi$ hám $\frac{1}{f_2} = -\frac{\Phi_2}{n}$ teńlikleriniń orınlı ekenligin ańǵarıp X_H ushın tómendegidey eń aqırǵı ańlatpanı alamız:

$$X_H = \frac{d}{n} \cdot \frac{\Phi_2}{\Phi}. \quad (6)$$

X_H shaması linzanıń O tóbesinen baslap onıń birinshi tegisligine shekem esaplangan qashıqlıq bolıp tabıladı.



257-súwret. Eki tárepi de dóńes bolǵan qalıń linzanıń bas tegislikleriniń ornı.

Tap sonday jollar menen linzanıń ekinshi bas tegisliginiń ornın tabamız. (3)-teńlikten mınaǵan iye bolamız:

$$X_{H'} = f_2' \frac{d}{\Delta}$$

yamasa

$$X_{H'} = \frac{f_1' f_2'}{\Delta} \frac{d}{f_1'}$$

teńliklerine iye bolamız.

(1)-formulanı paydalanıp, bul ańlatpanı bılayınsha kóshirip jazamız:

$$X_{H'} = -f' \frac{d}{f_1'}$$

$f' = 1/\Phi$ hám $f_1' = n/\Phi_1$ teńlikleriniń orınlı ekenligin ańǵarıp, $X_{H'}$ shaması ushın eń aqırǵı ańlatpanı alamız:

$$X_{H'} = -\frac{d}{n} \cdot \frac{\Phi_1}{\Phi} \quad (6a)$$

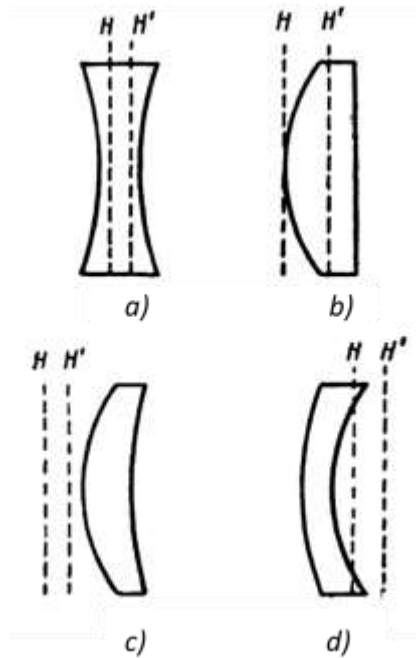
formulasına iye bolamız.

$X_{H'}$ shaması linzanıń O' tóbesinen baslap esaplangan ekinshi bas tegisligine shekemgi qashıqlıq bolıp tabıladı.

257-súwrette eki tárepi de dóńes bolǵan qalıń linzanıń (6)- hám (6a) formulalar boyınsha esaplangan H hám H' tegislikleriniń iyelegen orınları kórsetilgen. Kórinip turǵanıday, eki tegislik

te linzanıń ishinde jaylasadı hám iymeklik radiusları r_1 menen r_2 shamaları bir birine teń bolmaǵan jaǵdayda onıń betlerine qarata simmetriyalı jaylaspaǵan. f hám f' fokuslıq qashıqlıqlarınıń ekewi de san mánisi boyınsha bir birine teń, Biraq, olardı sáykes bas tegisliklerden baslap esaplaw kerek bolǵanlıqtan, birinshi hám ekinshi bas fokuslar linzanıń O hám O' tóbelerinen birdey emes qashıqlıqlarda jaylasadı.

Tap usınday jollar menen qálegen formaǵa iye bolǵan qalıń linzalardıń bas tegislikleri menen bas fokuslarınıń iyelegen orınların tabıwǵa boladı. 258-súwrette qos oyıs linza (a), tegis dóńes linza (b), oń (c) hám teris (d) meniskli linzalar kórsetilgen.



258-súwret.

Linzalardıń bas tegislikleriniń orınları: a) qos oyıs, b) tegis dóńes, c) oń meniskli hám d) teris meniskli.

Juqa linza ushın betlerdiń arasındaqı qashıqlıqtı juwıq túrde nolge teń dep esaplawǵa boladı. Bunday jaǵdayda (5)-formula mınanı beredi:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2.$$

Demek, biz bul jaǵdayda 318-paragrafta biz burın tapqan juqa linzanıń optikalıq kúshiniń onıń betleriniń optikalıq kúshleriniń qosındısına teń ekenligi haqqındaǵı nátiyjeni qaytadan tabamız.

Linzalardıń optikalıq kúshleri *dioptriylerde* ólshenedi. 1 dioptriyege teń optikalıq kúshke bas fokuslıq qashıqlıǵı 1 m bolǵan linza iye boladı.

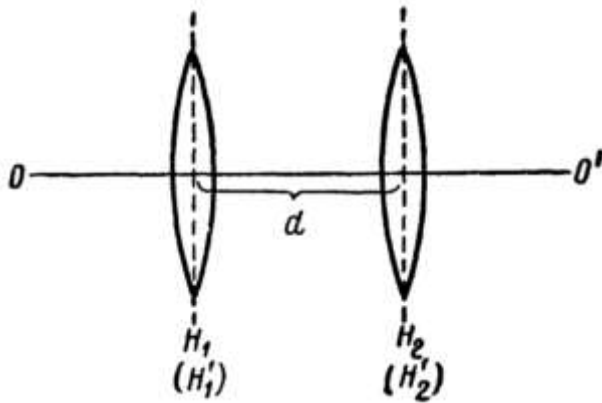
2. Bir birinen shekli qashıqlıqta jaylasqan eki juqa linza. Bir birinen d qashıqlıǵında jaylasqan optikalıq kúshleri Φ_1 menen Φ_2 ge teń eki juqa linzanı qaraymız (259-súwret). Joqarıda ayılǵanlardıń tiykarında biz linzalardıń hár birin usı linza qanday optikalıq kúshke iye bolsa, tap sonday optikalıq kúshke iye bolǵan bir sındırıwshı bet túrinde qarawǵa boladı. Linzalardı hawada jaylasqan (sındırıw koefficienti 1 ge teń) dep esaplap, biz (5)-formula boyınsha eki juqa linza tárepinen payda etilgen sistemanıń optikalıq kúshi Φ ushın mınaday ańlatpanı alamız:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - d\Phi_1\Phi_2 \quad (7)$$

ańlatpasına iye bolamız. Sonıń menen birge (6)- hám (6a) formulalar boyınsha sistemanıń bas tegisliklerdiń orınların anıqlaytuǵın X_H hám $X_{H'}$ shamaların alamız:

$$X_H = d \frac{\Phi_2}{\Phi}, \quad X_{H'} = -d \frac{\Phi_1}{\Phi}. \quad (8)$$

X_H shaması birinshi linzadan, al $X_{H'}$ shaması ekinshi linzadan baslap ólshenedi.



259-súwret.
Eki juqa linza.

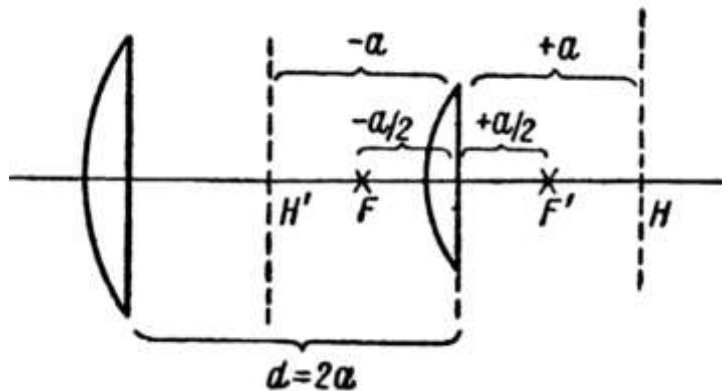
Mısal sıpatında Gyuygens okulyarı dep atalatuǵın dúzilisti qaraymız. Ol eki oń linzadan turadı, olardıń birewiniń fokuslıq qashıqlıǵı a ǵa, al ekinshisiniki onnan úsh ese úlken:

$$f_1' = a, \quad f_2' = 3a.$$

Linzalardıń arasındadıǵı qashıqlıq d nıń shaması $2a$ ǵa teń.

Bul sistemanıń bas tegislikleri menen bas fokusların anıqlaymız.

260-súwret.
Gyuygens okulyarı.



Eki linzanıń optikalıq kúshleri ushın mınaǵan iye bolamız:

$$\Phi_1 = \frac{1}{f_1'} = \frac{1}{3a}, \quad \Phi_2 = \frac{1}{f_2'} = \frac{1}{a}.$$

(7)-teńlik boyınsha barlıq sistemanıń optikalıq kúshi ushın

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - d\Phi_1\Phi_2 = \frac{1}{3a} + \frac{1}{a} - \frac{2a}{3a^2} = \frac{2}{3a}$$

shamasın alamız. Bunnan sistemanıń fokuslıq qashıqlıǵınıń

$$f' = -f = \frac{1}{\Phi} = \frac{3}{2}a$$

shamasına teń ekenligin kóremiz.

Sistemanıń bas tegislikleriniń ornın (8)-formulalar boyınsha tabamız:

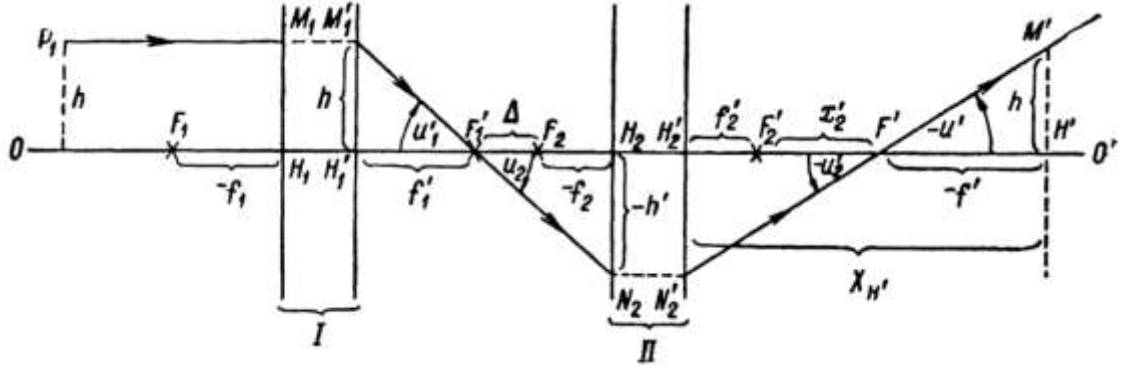
$$X_H = d \frac{\Phi_2}{\Phi} = 2a \cdot \frac{3a}{2a} = 3a,$$

$$X_{H'} = -d \frac{\Phi_1}{\Phi} = -2a \frac{3a}{2 \cdot 3a} = -a.$$

Bul ańlatpalardan birinshi bas tegislik H tıń sistemanıń sırtında onnan a qashıqlıǵında ornasqanlıǵı kórinip tur; ekinshi bas tegislik H' linzalardıń ortasında jaylasqan. Bas fokuslardıń ekinshi linzaǵa salıstırǵanda simmetriyalı birdey $+\frac{a}{2}$ hám $-\frac{a}{2}$ qashıqlıqlarında jaylasqanlıǵın ańsat kóriwge boladı.

Quramalı sistemanıń bas tegislikleri menen bas fokusların tabıw ushın OO' optikalıq kósherine parallel hám onnan h qashıqlıǵında tarqalatuǵın P_1M_1 nurın qaraymız (261-súwret). Bul nurdıń dawamı I sistemanıń ekinshi bas tegisligin OO' optikalıq kósherinen h qashıqlıǵında jaylasqan M_1' noqatında kesip

ótedi. *I* sistemada singannan keyin bul nur optikalıq kósherdi *I* sistemanıń ekinshi bas fokusu bolǵan F'_1 noqatında kesip ótedi hám *II* sistemanıń birinshi bas tegisligin bazı bir N_2 noqatında kesip ótedi. Meyli, N_2 noqatınıń OO' optikalıq kósherinen qashıqlıǵı h' shamasına teń bolsın. Bas tegisliklerdiń qásiyeti boyınsha bul nur (yamasa onıń dawamı) *II* sistemanıń ekinshi bas tegisligin OO' kósherinen h' qashıqlıǵında kesip ótedi. Bunnan keyin ol OO' optikalıq kósherin *II* sistemanıń bas fokusinan x'_2 qashıqlıǵında jaylasqan bazı bir F' noqatında kesedi. P' noqatı barlıq sistemanıń bas fokusu bolıp tabıladı. Sebebi bul noqatta sistemǵa túsemen degenshe bir birine parallel bolǵan eki nur kesilisedi: OO' kósheri boylap tarqalatuǵın P_1M_1 hám OH_1 nurları.



261-súwret. Eki oraylastırılǵan sistemanı qosıw.

Barlıq sistemanıń ekinshi bas fokusu F' menen ekinshi bas tegisligin biz mınaday tallawlardıń járdeminde taba alamız: P_1M_1 nırı barlıq sistemanıń birinshi bas tegisligin OO' optikalıq kósherinen h qashıqlıǵında kesip ótiwi kerek; demek, barlıq sistemada singannan keyin bul nur da barlıq sistemanıń ekinshi bas tegisligin OO' optikalıq kósherinen h qashıqlıǵında kesip ótiwi kerek. N'_2F' nurında OO' optikalıq kósherinen h qashıqlıǵında jatatuǵın M' noqatın tabamız. Bunday jaǵdayda OO' optikalıq kósherine perpendikulyar $M'N'$ barlıq sistemanıń ekinshi bas tegisligi bolıp tabıladı. H' noqatınan P noqatına shekemgi f' qashıqlıǵı barlıq sistemanıń ekinshi bas fokuslıq qashıqlıǵı bolıp tabıladı.

f' qashıqlıǵın tabıw ushın qarawǵa u'_1, u_2, u'_2 hám u' múyeshlerin kirgizemiz. OO' optikalıq kósherin usınday múyeshler menen $P_1M_1M'_1N_2N'_2F'M'$ nırı kesip ótedi.

261-súwretten

$$u'_1 = u_2, \quad u' = u'_2$$

teńlikleriniń orınlı ekenligi kórinip tur. Bunnan usı tórt u'_1, u_2, u'_2 hám u' múyeshleriniń arasındǵı mınaday qatnastı tabamız:

$$\frac{u'_1}{u'} = \frac{u_2}{u'_2}.$$

Bunnan keyin 261-súwretten

$$h = u'_1 f'_1 = u' f', \\ -h' = u_2 (\Delta - f_2) = (-u'_2) (x'_2 + f'_2)$$

teńligine iye bolamız.

Bul eki teńlikten mınalardı alamız:

$$\frac{u'_1}{u'} = \frac{f'}{f'_1}, \quad (10)$$

$$\frac{u_2}{-u'_2} = \frac{x'_2 + f'_2}{\Delta - f_2}. \quad (11)$$

(10)- hám (11)-teńlikler múyeshlerdiń arasındǵı qatnastı beretuǵın (9)-teńliktiń tiykarında sistemanıń ekinshi bas fokuslıq qashıqlıǵı f' ushın mınaday ańlatpanı beredi:

$$f' = -f'_1 \cdot \frac{x'_2 + f'_2}{\Delta - f_2}. \quad (12)$$

f' ushın eń aqırǵı ańlatpanı alıw ushın (12)-ańlatpadan x'_2 shamasın joq etiw kerek. Onıń ushın *II* sistemaǵa qatnası boyınsha F'_1 hám F' noqatları túyinles bolıp tabıladı. *II* sistemanıń birinshi hám ekinshi

bas fokuslarınan baslap esaplangan olardıń orınları Δ hám x'_2 kesindileri menen anıqlanadı. Sonlıqtan Nyuton formulası boyınsha

$$(-\Delta)(x'_2) = f_2 f'_2$$

teńligine iye bolamız. Bunnan

$$x'_2 = -\frac{f_2 f'_2}{\Delta} \quad (13)$$

formulasına iye bolamız.

x'_2 tıń bul mánisin (12)-formulaǵa qoyıp, sistemanıń ekinshi bas fokuslıq qashıqlıǵı f' ushın mınaday ańlatpaǵa iye bolamız:

$$f' = -\frac{f'_1 f'_2}{\Delta}. \quad (14)$$

Tap usınday bolǵan tallaw jolı menen sistemada sıngannan keyin optikalıq kósherge parallel bolatuǵın nurdı qarap, bir sistemanıń birinshi bas fokuslıq qashıqlıǵı ushın

$$f = -\frac{f_1 f_2}{\Delta} \quad (14a)$$

ańlatpasına iye bolamız.

Barlıq sistemanıń ekinshi bas tegisligi $H'M'$ tıń iyelegen ornın II sistemanıń ekinshi bas tegisligine qatnası boyınsha anıqlaymız. Bunday jaǵdayda sistemanıń ekinshi bas tegisligi $H'M'$ tıń ornı $H'_2 H'$ kesindisi boyınsha anıqlanadı. Onı biz $X_{H'}$ arqalı belgileyміз.

261-súwretten mınaǵan iye bolamız:

$$X_{H'} = f'_2 + x'_2 - f'.$$

Bul teńlikke (13)- hám (14)-ańlatpalar boyınsha x'_2 penen f' tıń mánislerin qoyıp

$$X_{H'} = f'_2 \frac{\Delta + f'_1 - f_2}{\Delta} \quad (15)$$

teńligine iye bolamız.

Tap usınday jol menen I sistemanıń birinshi bas tegisligine salıstırǵandaǵı barlıq sistemanıń birinshi bas tegisliginiń ornınıń

$$X_H = f_1 \frac{\Delta + f'_1 - f_2}{\Delta} \quad (15a)$$

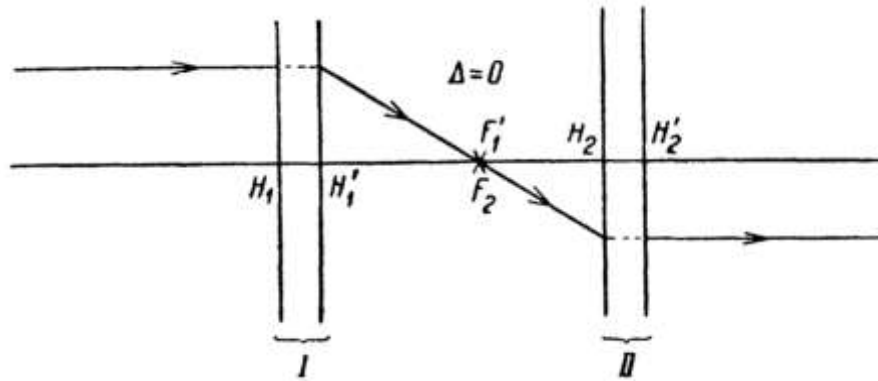
kesindisi boyınsha anıqlanatuǵınlıǵın tabamız.

(6)-, (6a) hám (7)-, (7a) formulaları tiykarǵı tekstte keltirilgen (1)-, (2)- hám (3)-formulalarǵa sáykes keledi.

§ 321. Teleskoplıq sistema. Teleskoplıq sistema dep I sistemanıń F'_1 arqalı belgilengen ekinshi bas fokusı II sistemanıń birinshi bas fokusına sáykes etip qoyılǵan oraylastırılǵan I hám II sistemalar tárepinen payda etilgen sistemaǵa aytadı (262-súwret). Bunday jaǵdayda $\Delta = 0$ hám 320-paragrafta keltirip shıǵarılǵan formulalar boyınsha teleskoplıq sistemanıń bas fokusları menen bas tegislikleriniń sheksizlikte jaylasqanlıǵı kelip shıǵadı; onıń optikalıq kúshi Φ nolge teń. Teleskoplıq sistemaǵa kelip túsken nurlardıń parallel dástesi onnan parallel dáste túrinde shıǵadı.

Teleskoplıq sistema tárepinen beriletuǵın súwretti qurıw ushın biz 319-paragrafta paydalanǵan usıldan paydalanamız. Teleskoplıq sistema beretuǵın súwretti tabıw ushın tómendegidey qurıwdan paydalanamız. Meyli, teleskoplıq sistema (263-súwret) ózin payda etetuǵın I hám II sistemalardıń bas tegislikleri H_1, H'_1 hám H_2, H'_2 , bas fokusları F_1, F'_1 hám F_2, F'_2 lerdiń orınları menen berilgen bolsın.

Obekt I sistema menen onıń birinshi bas fokusı F_1 diń arasında jaylasqan jaǵdaydı qaraymız.

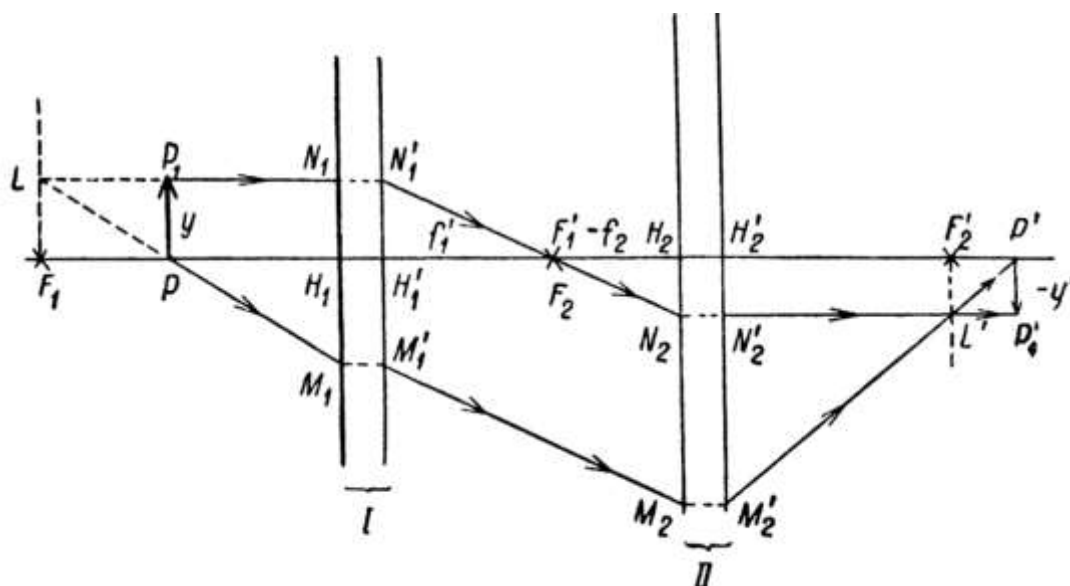


262-súwret. Teleskopliq sistema.

I sistemanıń bas fokuslıq qashıqlıǵı F_1 arqalı optikalıq kósherge perpendikulyar tegislik ótkeremiz. Bul tegislikte I sistemanıń bas fokallıq tegisligi dep ataymız (263-súwrette ol punktir menen belgilengen). Bas fokallıq tegisliktegi qálegen noqatlıq derek I sistemada optikalıq kósher menen belgili múyeshti jasaytuǵın nurlardıń dástesin beredi.

y obektinen shıǵatuǵın eki nurdı qaraymız. Olardı teleskoplıq sistemada sıǵannan keyin tabıwǵa múmkin bolatuǵınday etip jaylastıramız. Bunday nurlardıń biri sıpatında optikalıq kósherge parallel nurdı saylap alamız. I sistemada sıǵannan keyin ol onıń ekinshi bas fokus F_1' arqalı ótedi hám II sistemanıń birinshi bas tegisligi H_2 ge bazı bir N_2 noqatında kelip túsedi. I sistemanıń ekinshi bas fokusu F_1' bir waqıtta II sistemanıń birinshi bas fokusu bolıp tabılatuǵın bolǵanlıqtan, $N_1'F_1'N_2$ nurı II sistemada sıǵannan keyin optikalıq kósherge parallel baǵıtta tarqaladı.

Ekinshi nur sıpatında PM_1 nurın alamız. Onıń dawamı P_1N_1 nurınıń dawamı menen bas fokallıq tegislik F_1 de jatatuǵın L noqatında kesilisetuǵınday etip alamız. Bunday jaǵdayda LPM_1 nurı I sistemada sıǵannan keyin $N_1'N_2$ nurına parallel bolǵan $M_1'M_2$ nurın beredi. Bul jaǵday bizge II sistemada sıǵannan keyin payda bolǵan nurdıń baǵıtın tabıwǵa múmkinshilik beredi. Haqıyqatında da, $M_1'M_2$ nurı menen $N_1'N_2$ nurı bir birine parallel bolǵanlıqtan, II sistemada sıǵannan keyin olar bas fokallıq tegislik F_2' te jatqan L' noqatında kesilisiwi kerek. Solay etip, biz PM_1 nurınan barlıq teleskoplıq sistemada sıǵannan keyin payda bolǵan $M_2'L'$ nurınıń baǵıtın tabamız. Bul $M_2'L'$ nurı optikalıq kósherdi P noqatınıń súwreti bolǵan P' noqatında kesedi. Biz qarap atırǵan obektтіń ekinshi noqatınıń, atap aytqanda P_1 noqatınıń súwretin minaday pikirdiń tiykarında arısat alamız: bul súwret $N_2'L'$ nurı menen P noqatı arqalı optikalıq kósherge perpendikulyar etip ótkerilgen tuwrınıń kesilisiw noqatında jaylasadı. Bul tuwrılardıń kesilisiw noqatı bolǵan P_1' noqatı P_1 noqatınıń súwreti bolıp tabıladı. y' kesindisi barlıq obektтіń súwreti bolıp tabıladı.



263-сúwret. Teleskoplıq sistema beretuǵın súwretti qurıw.

263-сúwretten teleskoplıq sistema tárepinen beriletuǵın sızıqlı úlkeytiw β nı ańsat anıqlawǵa boladı. Sızılma boyınsha $y = H_1'N_1'$ hám $-y' = H_2N_2$ teńlikleriniń orınlı ekenligin ańǵarıp,

$$\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{H_2N_2}{H_1'N_1'}$$

teńliklerine iye bolamız. Bunnan keyin $H_1'N_1'F_1'$ hám $H_2N_2F_1'$ úsh múyeshliklerinen mınaday qatnasqa iye bolamız:

$$\frac{H_2N_2}{H_1'N_1'} = \frac{-f_2}{f_1'}.$$

Bul ańlatpada f_1' penen f_2 shamaları sáykes I sistemanıń ekinshi bas fokuslıq qashıqlıǵı hám II sistemanıń birinshi bas fokuslıq qashıqlıǵı belgilengen. Nátiyjede, teleskoplıq sistemanıń sızıqlı úlkeytiwi ushın

$$\beta = \frac{f_2}{f_1'}$$

shamasın alamız. Eger sistema hawada jaylasqan bolsa, onda $f_2 = f_2'$ hám

$$\beta = \frac{f_2'}{f_1'} \quad (1)$$

formulasına iye bolamız. Bul formulada f_2' arqalı II sistemanıń ekinshi bas fokuslıq qashıqlıǵı belgilengen. (1)-formuladan teleskoplıq sistemanıń sızıqlı úlkeytiwiniń onı quraytuǵın sistemalardıń tek bas fokuslıq qashıqlıqlarınıń qatnası boyınsha anıqlanatuǵınlıǵı hám obekttiń turǵan ornına ǵárezsiz ekenligi kórinip tur. Obekttiń hám onıń súwretiniń qayda jaylasqanlıǵınan ǵárezsiz berilgen teleskoptıq sistemanıń sızıqlı úlkeytiwi birdey mániske iye boladı.

Teleskoplıq sistemanıń múyeshlik úlkeytiwin 317-paragraftaǵı (6)-formulanıń tiykarında anıqlaymız. Bul formula boyınsha

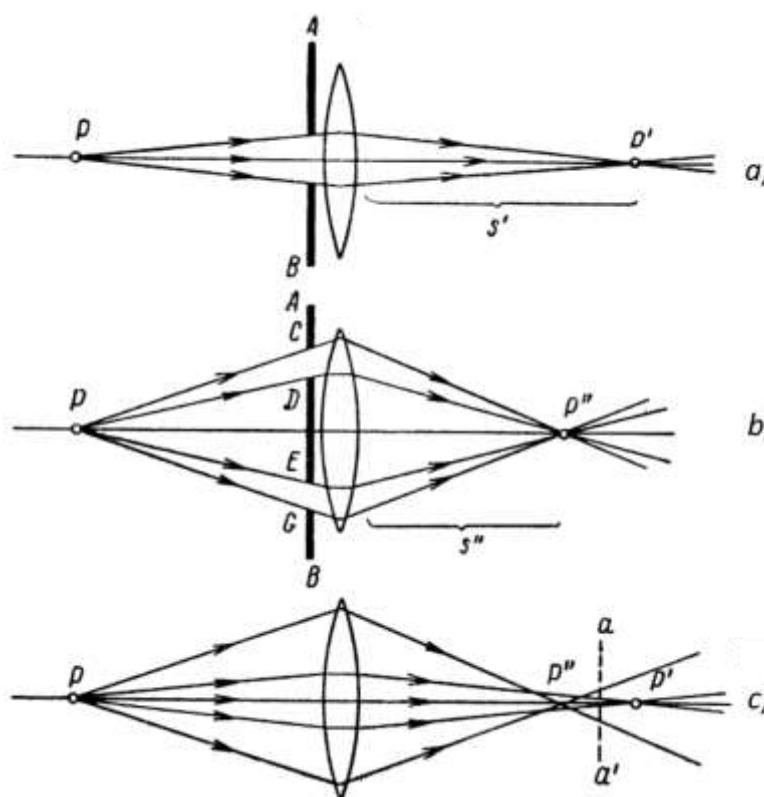
$$\gamma = \frac{n}{n'} \cdot \frac{1}{\beta}. \quad (2)$$

Eger biziń teleskoplıq sistemamız hawada jaylasqan bolsa, onda $n = n' \cong 1$. Sonlıqtan (2)-hám (1)-ańlatpalar boyınsha

$$\gamma = -\frac{f_1'}{f_2'} \quad (3)$$

teńligine iye bolamız. Demek, teleskoplıq sistemanıń múyeshlik úlkeytiwi san mánisi boyınsha birinshi sistemanıń bas fokuslıq qashıqlıǵı qansha úlken bolsa hám ekinshi sistemanıń bas fokuslıq qashıqlıǵı qanshama kishi bolsa sonshama úlken boladı.

§ 322. Optikalıq sistemalardıń qátelikleri hám olardı saplastırıw jolları. Usı waqıtlarǵa shekem biz paraksiallıq nurlardı, yaǵnıy optikalıq kósher menen kishi múyesh jasaytuǵın nurlardı qaradıq. Bunday jaǵdaylarda noqatlıq obekt jetkilikli dárejedeǵi jaqsı jaqınlasıwda noqatlıq súwretti beredi. Biraq, múyeshlerdiń kishi mánisleri tar denelik múyeshlerdiń sheklerindeǵi jaqtılıq dásteleri menen shekleńiwge májbúrleydi. 325-paragrafta kórgenimizdey, jaqtılıq dásteleriniń jıńışke bolıwı súwrettiń sheklerindeǵi jaqtılandırıwdıń kishi bolıwına alıp keledi. Sonlıqtan ámeliy kóz-qaraslardan salıstırmalı úlken bolǵan denelik múyeshlerge ótiwge qızıǵıwshılıq payda boladı, yaǵnıy dástelerdiń paraksiallıq shártinen bas tartıwǵa tuwrı keledi. Biraq, usınday bas tartıwdıń nátiyjesinde gomooraylıq nur sistemada sınıǵanda gomooraylıq bolıwdan qaladı hám shekli ólshemlerge iye bolǵan obekttiń súwreti bir qatar kemshiliklerge iye boladı. Bul kemshiliklerdi hám olardı saplastırıw jolların qısqaşa qarap ótemiz.



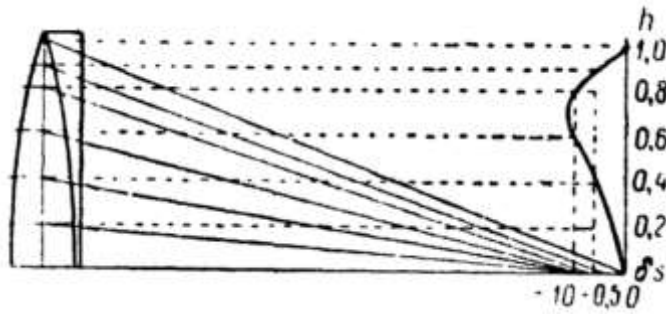
264-súwret. Sferalıq aberraciyanıń payda bolıwı: paraksiallıq nurlardıń fokusu (a) shettegi nurlardıń fokusına salıstırǵanda alısta jaylasadı (b).

Oń optikalıq kúshke iye bir linzanı alamız. Móldir bolmaǵan hám dóńgelek tesigi bar (dóńgelek diafragma) AB ekranınıń járdeminde (264a súwret) P noqatlıq dereginen shıqqan paraksiallıq nurlardıń dástesin ajratıp alamız. Meyli, ol linzadan s' qashıqlıǵında jaylasqan P' noqatında jıynalatuǵın bolsın. Endi dóńgelek diafragmanı saqıyna tárizli tesigi bar CD hám EG diafragmaları menen alıstıramız (264b súwret). Bul diafragma P noqatlıq dereginen shıqqan DPC hám CPE konuslarınıń arasındaǵı shettegi nurlardıń dástesin kesip aladı. Linzada shettegi nurlar kúshlirek sınadı derek P nıń burınǵı ornı ushın onıń súwreti P'' linzadan s' qashıqlıǵına salıstırǵanda kishirek bolǵan s'' qashıqlıǵında jaylasadı. $\delta s = s'' - s'$ qashıqlıǵı *boylyq sferalıq aberraciya* dep ataladı. Boylyq sferalıq aberraciyanıń orın alıwı súwrettiń jaylıwına alıp keledi. Haqıyqatında da, eger P dereginen (264c súwret) linzaǵa nurlardıń keń dástesi kelip túsetuǵın bolsa, onda optikalıq kósher menen hár qıylı múyesh jasaytuǵın nurlar sınıǵannan keyin onı hár

qıylı noqatlarda kesip ótedi. Sınğan nurdıń qálegen aa' tegisligi menen kesilisiwi shekli ólshemlerge iye bolğan dóńgelektiń túrine enedi. Bul dóńgelektiń ólshemleri shetki hám paraksiallıq nurlardıń P' hám P fokuslarınıń arasındaǵı bazı bir noqatta eń kishi boladı.

Oń linza ushın boylıq sferalıq abberaciya $\delta s = s'' - s'$ teris.

Teris optikalıq kúshke iye linza ushın shetki nurlar paraksiallıq nurlarǵa salıstırǵanda salıstırmalı kishi sınadı, shetki nurlardıń fokusu linzadan paraksiallıq nurlardıń fokusına salıstırǵanda alısıraq jaylasadı hám boylıq sferalıq aberraciya $\delta s = s'' - s'$ tiń mánisi oń. Bul jaǵday optikalıq sistemalardıń sferalıq aberraciyasın boylıq aberracıyları hár qıylı belgige iye bolğan oń hám teris linzalardı kombinacıyalaw jolı menen saplastırıladı.



265-súwret.
Sferalıq aberraciyası dúzetilgen
quramalı linza.

265-súwrette birinshisi oń hám ekinshisi teris bolğan eki linzadan turatuǵın sistema kórsetilgen (súwrette bul linzalardıń tek jartısı kórsetilgen). Bul linzalardıń optikalıq kúshi quramalı linza oń optikalıq kúshke iye bolatuǵınday etip saylap alınğan. 265-súwrettiń oń tárepinde linza arqalı onıń optikalıq kósherinen hár qıylı bolğan h qashıqlıǵında ótetuǵın nurlar ushın boylıq sferalıq aberraciyasınıń grafigi berilgen. SHetki nurlar ushın boylıq aberraciya tolıq kompensacıyalanğan, al ortadaǵı nurlar ushın úlken bolmağan qaldıq aberraciya orın aladı.

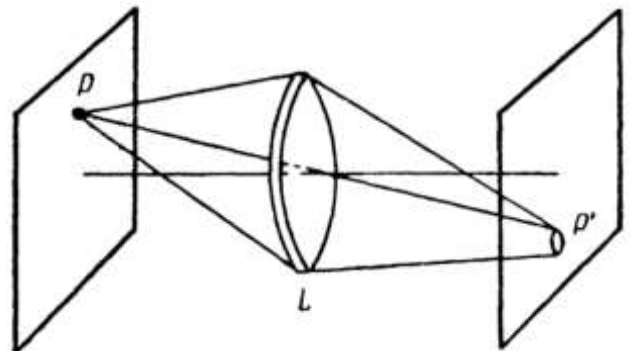
Eger sistemanıń optikalıq kósheriniń boyında jaylasqan noqatlıq obekt ushın boylıq aberraciya tolıq durıslanğan bolsa, onda bunday aberraciyalıq sistemanıń kósherinen sırtta jaylasqan obektler ushın saqlanıwı múmkin. Kósherden sırttaǵı dásteniń optikalıq kósherge perpendikulyar tegislik penen kesimi (266-súwret) quyırǵı bar kometaǵa usaǵan sozılǵan daq túrine iye. Sonlıqtan kósherden sırttaǵı aberraciya *koma* atamasına iye (grek tilinde shashtır talın yamasa kometanı biliredi, "shashlı juldız").

Sferalıq aberraciyası durıslanğan sistemada sinuslar shárti dep atalatuǵın shárt orınlanğan jaǵdayda koma bolmaydı. Al sinuslar shárti mınaǵan alıp kelinedi:

$$ny \sin u = n'y' \sin u'. \quad (1)$$

(paragraftıń aqırındaǵı mayda shrift penen jazılǵan tekstke qarańız).

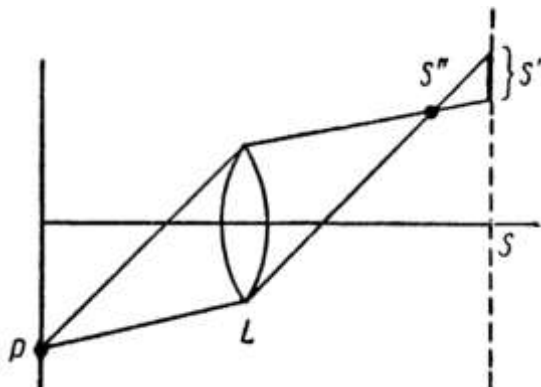
266-súwret.
Koma.



Optikalıq sistema tárepinen sındırılǵan dásteler joqarıda kórsetilgen aberracıylar menen birge ádette *astigmatizmge* de iye boladı (314-paragraf). Eger kósherden tısta bolsa, onda

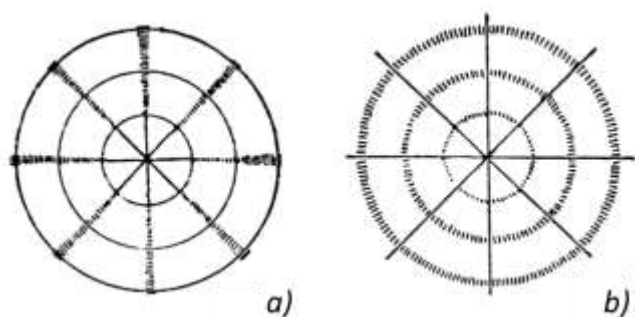
jińishke dásteler ushın da astigmatizm saqlanadı. Usınday astigmat dásteler eki fokallıq sızıqtı beredi (267-súwret): sızılma tegisliginde jatqan S' sızıgın (sagittallıq kesimlerdiń fokallıq sızıgı) menen sızılma tegisligine perpendikulyar bolǵan S'' sızıgı (meridionallıq kesimlerdiń fokallıq sızıgı). Sol eki fokallıq sızıqlardıń arasındaǵı qashıqlıq $S'S''$ astigmatlıq ayırmanı beredi. Astigmatizm bar bolǵan jaǵdayda noqatlıq obekttiń súwreti qısqa atanaq yamasa jayılǵan dóńgelekti beredi (sol eki fokallıq sızıqlardıń arasındaǵı).

267-súwret.
Kósherden sırttaǵı dástelerdiń astigmatizmi.



Astigmatizmnıń bolıwı radiallıq sızıqlardıń hám sistemanıń optikalıq kósherine perpendikulyar tegislikte jatatuǵın bir qatar koncentrlık sızıqlardıń súwretlerinde ayrıqsha ayqın túrde kórinedi. Dóńgeleklerdiń orayları sistemanıń optikalıq kósherine sáykes keledi. Súwret te optikalıq kósherge perpendikulyar ekranda alınadı. Eger ekrandı meridionallıq kesimlerdiń fokusları tegisligine jaylastırsa (S'' fokallıq sızıqlarınıń), onda 268a súwrette kórsetilgendey kartına alınadı. Dóńgelekler keskin túrde súwretlenedi, sebebi fokallıq sızıqlar bir biriniń ústine túsip, olardıń túrin ózǵertpeydi, radiuslardıń súwretleri bolsa oraydan radiuslardıń noqatlarınan alısta jaylasadı. Eger ekrandı sagittallıq kesimlerdiń fokusları tegisliginde jaylastırsa (S' fokallıq sızıqlardıń), onda 268b súwrette kórsetilgendey kartına alınadı. Bul jaǵdayda radiuslardıń súwretleri keskin, sheńberlerdiń súwretleri jayılǵan; sheńberler oraydan qanshama alısta jaylassa, onda olar sonshama kóbirek jayılǵan boladı.

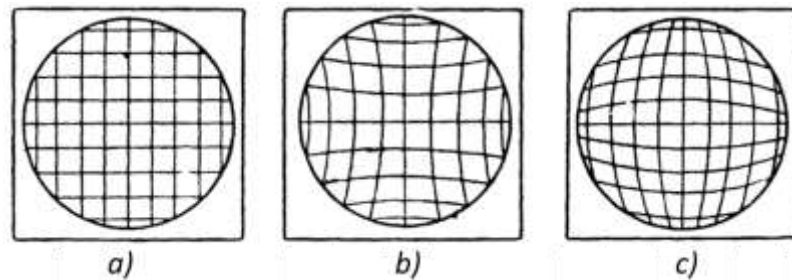
Sistemanıń astigmatizmin sındırıwshı betlerdiń iymeklik radiusların hám olardıń optikalıq kúshlerin sáykes túrde saylap alıw jolı menen dúzetiwge boladı. Astigmatizmi dúzetilgen sistemalardı *antistigmatlar* dep ataydı.



268-súwret.
Astigmatizmnıń saldarınan súwrettiń mayısıwı.
a) meridionallıq kesimlerdiń fokusındaǵı,
b) sagittallıq kesimlerdiń fokusındaǵı.

Joqarıda keltirilgen optikalıq sistemalardıń úsh kemshiliklerden (aberraciýalar, komalar hám astigmatizm) basqa kemshilikler bar. Olardıń qatarına súwrettiń maydanınıń mayısıwı hám distorsiya kiredi. Maydannıń mayısıwı mınadan ibarat: sistemanıń kósherine perpendikulyar bolǵan tegislik túrindegi obektke mayısqañ bet túrindegi súwret sáykes keledi. Distorsiya bolsa súwrettiń barlıq maydanınıń sheklerindegi sızıqlı úlkeyiwdiń birdey bolmawınıń sebebinen payda bolatuǵın mayısıwı bolıp tabıladı. Distorsiyanıń nátiyjesinde obekt penen onıń súwretiniń

arasındaǵı geometriyalıq uqsaslıq buzıladı. Eger obekt optikalıq kósherge perpendikulyar bolǵan tegisliktegi kvadrat yacheykalarǵa iye tor túrine iye bolsa (289a súwret), onda súwret mayısqañ sızıqlardan payda bolǵan tor túrine iye boladı. Eger úlkeytiw optikalıq kósherden uzaqlasqañ sayın ósetuǵın bolsa, onda súwret 269b súwrette kórsetilgendeı, al eger úlkeytiw kósherden alıslaǵan sayın kemeyetuǵın bolsa, onda súwret 269c súwrette keltirilgendeı túrge iye boladı. Vizualıq baqlawlar ushın arnalǵan ásbaplardıń kópshiliginde distorsiya úlken áhmiyetke iye bolmaydı, Biraq, súwret dál ólshewlerdi orınlaw ushın paydalanılatuǵın bolsa (geodeziyalıq ólshewler, aerofotosemka h.t.b.), onda distorsiyası dúzetilgen sistemalardı paydalanıw zárúr.



269-súwret. Distorsiya.

Ferma principi boyınsha (253-súwret) eki noqattıń arasında tarqalatuǵın nurdıń optikalıq jolınıń uzınlıǵınıń ekstremallıq bolıwı shártin qanaatlandırıwı kerek. Bir neshe nur eki noqattıń arasındaǵı ótiwi olardıń optikalıq jollarınıń uzınlıǵı birdeı jaǵdayda ǵana júzege keledi. Sonlıqtan, eger linza noqatlıq P obektiniń P' súwretin beretuǵın bolsa (270-súwret), onda P obektinen shıǵıp P' noqatında jıynalatuǵın barlıq nurlardıń optikalıq uzınlıqları birdeı bolatuǵınıń ańǵaramız. Optikalıq uzınlıqtıń geometriyalıq uzınlıqtıń nur tarqalatuǵın ortalıqtıń sıdırıw kórsetkishine kóbeymesine aytatuǵınıń eske salamız. Meyli, linzaniń materialınıń sıdırıw kórsetkishi n_1 ge teń hám linzaniń oń jáne shep táreplerinde sáykes sıdırıw koefficientleri n hám n' bolǵan ortalıqlar jaylasqañ bolsın. Bunday jaǵdayda $POO'P'$ nurınıń uzınlıǵı mınaǵan teń boladı:

$$L_1 = n \cdot PO + n_1 \cdot OO' + n' \cdot O'P'.$$

Tap sol sıyaqlı, $PMM'P'$ nurınıń optikalıq uzınlıǵı ushın

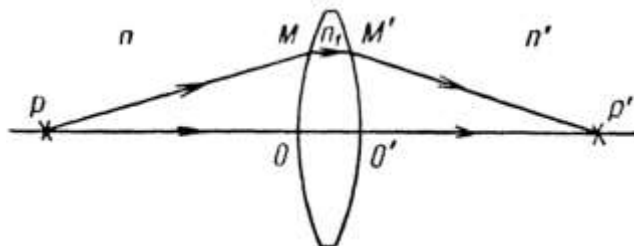
$$L_2 = n \cdot PM + n_1 \cdot MM' + n' \cdot M'P'$$

shamasın alamız. Eki nurdıń optikalıq uzınlıqlarınıń birdeı bolıwı mınaıday túrge iye boladı:

$$n \cdot PO + n_1 \cdot OO' + n' \cdot O'P' = n \cdot PM + n_1 \cdot MM' + n' \cdot M'P'.$$

Úsh sıdırıw koefficientiniń (n , n_1 hám n') bir birine teń bolmaǵanlıǵı sebepli joqarıdaǵı teńlemenin qanaatlandırılıwı múmkin. Solay etip, hár qıylı nurlardıń geometriyalıq uzınlıqlarınıń hár qıylı bolıwına qaramastan, olardıń optikalıq uzınlıqlarınıń shamaların birdeı bolıwı múmkin.

Nurlardıń optikalıq uzınlıqlarınıń birdeı bolıwı *barlıq nurlardıń boyı boyınsha tarqalatuǵın terbelislerdiń barlıǵınıń P' súwretinde birdeı fazada qosılatuǵınıń ańǵartadı.*



270-súwret.

Noqatlıq obektten shıǵatuǵın hám noqatlıq súwrette qosılatuǵın nurlardıń optikalıq uzınlıqlarınıń teń bolatuǵını.

Haqıyqatında da, P noqatlıq obektinen barlıq terbelisler birdeı fazada shıǵadı. Olardıń fazalarınıń P noqatınan P' noqatına shekem tarqalǵanda olardıń fazasınıń qanshaǵa ózgeretuǵınıń qaraw qaladı. Bir tekli ortalıqtaǵı geometriyalıq uzınlıǵı l_i bolǵan uchastkada terbelislerdiń fazası $\Delta_i = 2\pi \frac{l_i}{\lambda_i}$ shamasına ózgeredi. Sonlıqtan nurdıń $POO'P'$ jolında faza

$$\Delta_1 = 2\pi \left(\frac{PO}{\lambda} + \frac{OO'}{\lambda_1} + \frac{O'P'}{\lambda'} \right)$$

shamasına ózgeredi. Bul teńlikte λ , λ_1 hám λ' arqalı sheklerinde PO , OO' hám $O'P'$ kesindileri jaylasqan zatlarǵa tolqın uzınlıqları belgilengen. Eger boslıqtaǵı tolqın uzınlıǵın λ_0 arqalı belgilesek, onda

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}, \quad \lambda_1 = \frac{\lambda_0}{n_1}, \quad \lambda' = \frac{\lambda_0}{n'}$$

teńlikleri orınlı boladı.

λ , λ_1 hám λ' shamaların mánislerin (3)-ańlatpaǵa qoyıp,

$$\Delta_1 = 2\pi(n \cdot PO + n_1 \cdot OO' + n' \cdot O'P')$$

ańlatpasın alamız.

Tap sol sıyaqlı, nurdıń $PMM'P'$ jolında fazanıń Δ_2 shamasına ózgeretuǵınlıǵın tabamız:

$$\Delta_2 = \frac{2\pi}{\lambda_0} (n \cdot PM + n_1 \cdot MM' + n' \cdot M'P').$$

Δ_1 menen Δ_2 shamaları ushın ańlatpalardı (2)-teńlik penen salıstırıp

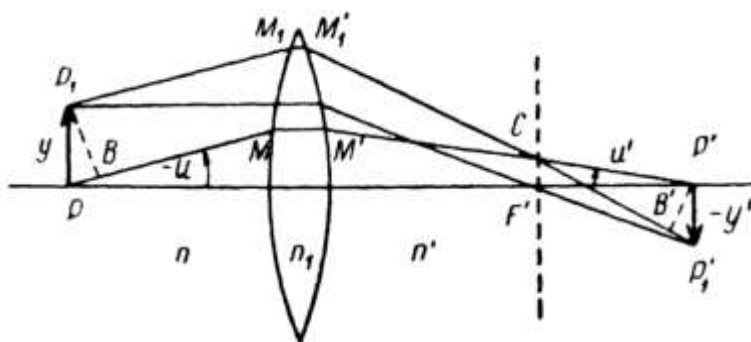
$$\Delta_1 = \Delta_2$$

teńliginiń orınlanatuǵınlıǵın tabamız. Bul teńlik P noqatınan P' noqatına jetip keletuǵın qálegen nurdıń joldaǵı fazasınıń ózgerisiniń birdey ekenligin kórsetedi. Demek, noqatlıq súwrettegi barlıq nurlar birdey fazada qosıladı eken.

Obektiń ólshemleri shekli bolǵan jaǵdayda obektiń hám onıń súwretiniń túyinles noqatlarınıń hár bir jubınıń arasındaǵı nurlardıń optikalıq uzınlıqları birdey bolǵanda súwret anıq boladı. Jáne de, sıdırıw koefficienti n_1 diń mánisi n hám n' shamaların arasında bolatuǵın materialdan soǵılǵan linzanı qaraymız (271-súwret). Obektte eki dana P hám P_1 noqatların alamız. Meyli, sol noqatlardıń súwretleri P' hám P'_1 noqatları bolsın. P hám P_1 noqatları, sonıń menen birge P' hám P'_1 noqatları da bir birine jaqın jaylasqan dep esaplaymız. $PMM'P'$ hám $P_1M_1M'_1P'_1$ nurların qaraymız. Olardıń PM hám P_1M_1 kesindileri bir birine parallel. Eki nur da F' bas fokallıq tegisliginde jatqan C noqatında kesilisedi. P_1 hám P' noqatlarınan PM hám $M'_1P'_1$ kesindilerine perpendikulyar bolǵan sáykes P_1B hám $P'B'$ perpendikulyarların ótkeremiz. Eger P_1 hám B noqatları arqalı barlıq noqatları birdey fazada terbeletuǵın tegis tolqın ótetuǵın bolsa, onda usı betke normal bolǵan barlıq nurlar da C fokusında birdey fazada qosılǵan bolar edi. Bunnan $P_1M_1M'_1C$ hám $BMM'C$ kesindileriniń optikalıq uzınlıqlarınıń birdey bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Nátiyjede, eger PB hám $B'P'_1$ kesindileriniń optikalıq uzınlıqları birdey bolatuǵın bolsa, onda $PMM'P'$ hám $P_1M_1M'_1P'_1$ nurlarınıń da optikalıq uzınlıqları bir birine teń boladı. Demek, mınaday teńlik orın aladı eken:

$$n \cdot PB = n' \cdot B'P'_1. \quad (4)$$

271-súwretten $PB = y \sin(-u) = -y \sin u$ teńliginiń orınlı ekenligi kórinip tur. Bul teńlikte y arqalı P menen P_1 noqatlarınıń arasındaǵı qashıqlıq, al u arqalı PM nurı menen optikalıq kósher arasındaǵı múyesh belgilengen.



271-súwret.
Sinuslar shártin keltirip shıǵarıwǵa.

Bunnan keyin P' penen P'_1 noqatlarınıń arasındaǵı qashıqlıq y' kishi bolǵanda juwıq túrde $B'P'_1 = -y' \sin u'$ teńligi orınlı boladı. Bul teńlikte u' arqalı $M'P'$ nurı menen optikalıq kósher arasındaǵı múyesh belgilengen. PB hám $B'P'_1$ shamaların bul mánisin (4)-ańlatpaǵa qoyıp

$$ny \sin u = n'y' \sin u' \quad (5)$$

teńligin tabamız. Bul teńlik usı paragraftıń tiykarǵı tekstindegi kórsetilgen sinuslar shártı bolıp tabıladı. Paraksiallıq nurlar ushın u menen u' múyeshleriniń mánisleri kishi hám juwıq túrdegi $\sin u \cong u$ hám $\sin u' \cong u'$ teńliklerine iye bolamız. Bunday jaǵdayda sinuslar shártı Lagranj-Gelmgolc invariantına ótedi:

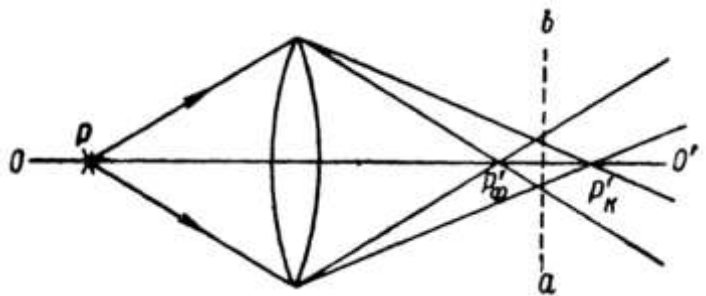
$$nyu = n'y'u'.$$

Ulıwma aytqanda, sinuslar shártı sistemanıń túyinles tegislikleriniń tek bir jubı ushın ǵana orınlanadı. Túyinles tegisliklerdiń usınday jubın aplanatlıq dep ataydı.

§ 323. Xromatlıq aberraciya. Usı waqıtqa shekem biz optikalıq sistemalardıń quramına kiretuǵın móldir zatlardıń sındırıw koefficientlerin turaqlı dep esapladıq. Bul jaǵday sistemanı monoxromat nur menen jaqtılandırǵanda orınlanadı. Jaqtılıqtıń quramı quramalı bolǵanda sındırıw koefficientleriniń mánisleriniń tolqın uzınlıǵınan ǵárezli ekenligin esapqa alıw zárúr. 279-paragrafta kórsetip ótkenimizdey, móldir zatlar ushın tolqın uzınlıǵınıń kishireyiwi menen sındırıw koefficientleriniń monotonlı túrde úlkeyiwi orın aladı. Sonlıqtan, mısalı, ádettegidey linzaniń optikalıq kúshi qızıl nurgá salıstırǵanda kók nur ushın úlken. Nátiyjede, eger derek aq jaqtılıqtı shıǵaratuǵın bolsa, onda onıń súwreti jayılǵan hám onıń shetleri boyalǵan boladı. Bul qubılıstı *xromatlıq aberraciya* dep ataydı.

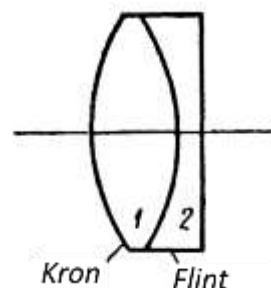
Meyli, aq jaqtılıqtıń P noqatlıq dereginen (272-súwret) bir oń linzaniń járdeminde súwreti alınatuǵın bolsın. Bunday jaǵdayda noqattıń fiolet nurlardaǵı súwreti P'_f linzaǵa basqa súwretlerge salıstırǵanda jaqın, al qızıl nurlardıń jaqtılıǵında súwret P'_q barlıǵınan alısta payda boladı. Olardıń arasında basqa reńli nurlar tárepinen payda etilgen súwretler jaylasadı. P'_f menen P'_q noqatlarınń arasındaǵı qanday da bir orında OO' optikalıq kósherine perpendikulyar bolǵan ab tegisligin júrgizemiz. Bul tegislikte jayılǵan reńli dóńgelekti kóremiz. Eger fiolet nurlardıń fokusu P'_f arqalı tóbeleri oǵan salıstırǵanda oń tárepte jaylasqan noqatta kesilisetuǵın barlıq basqa nurlardıń konusların alatuǵın bolsaq, onda dóńgelek alınadı hám bul dóńgelektiń sırtqı bólimi qızıl jiyekten, al orayı qızǵılt kók jiyekten ibarat. Eger tegislikti P'_f noqatınıń qasında júrgizsek, onda dóńgelek fiolet reńge iye jiyekke iye bolıp, orayı bolsa qızıl reńge iye boladı.

272-súwret.
Xromatlıq aberraciyanıń payda bolıwı.



Xromatlıq aberraciyanı hár qıylı salıstırmalı dispersiyaǵa iye bolǵan hár qıylı sortqa iye shiyshelelerden soǵılǵan oń hám teris linzalardı kombinaciyalaw jolı menen saplastırıwǵa boladı (usı paragrafta tómende keltirip shıǵarıladı). Kron dep atalatuǵın shiyshe kishi salıstırmalı dispersiyaǵa, al flint dep atalatuǵın shiyshe úlken salıstırmalı dispersiyaǵa iye boladı. Kronnan soǵılǵan oń linzadan (273-súwret) hám flintten soǵılǵan teris linzadan turatuǵın sistemada xromatlıq aberraciyanıń kompensaciyalangan bolıwı múmkin. Biraq birgelikte alıńǵan eki linzaniń optikalıq kúshi oń bolıp qaladı. Bunday linza *axromatlıq linza* dep ataladı.

273-súwret.
Xromatizmi dúzetilgen quramalı linza.



Axromatlıq linzanı soǵıwdıń múmkinshiligin kórsetiw jáne ápiwayılıq ushın eki linzanı da sheksiz juqa dep esaplaymız. Meyli, birinshi linza ushın (kronnan soǵılǵan) qızıl hám fiolet nurlar ushın sındırıw koefficientlerin sáykes n_{q_1} hám n_{f_1} arqalı belgileymiz. Spekrtdiń bazı bir orta oblastı (mısalı sarı-jasıl) ushın sındırıw koefficientin $\bar{n}_1$, bunnan keyin sındırıwshı betlerdiń iymeklik radiusların r_1 hám r_2 arqalı belgileymiz. Bunday jaǵdayda, 320-paragrafta ayılǵanlar boyınsha birinshi linzanıń qızıl hám fiolet nurlar ushın optikalıq kúshleri Φ_{q_1} , Φ_{f_1} hám onıń spekrtdiń orta bólimi ushın optikalıq kúshi Φ_1 sáykes mınalardıǵa teń boladı:

$$\Phi_{q_1} = (n_{q_1} - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right), \quad \Phi_{f_1} = (n_{f_1} - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right),$$

$$\Phi_1 = (n_1 - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

Bul teńliklerden

$$\Phi_{q_1} = \frac{n_{q_1} - 1}{\bar{n}_1 - 1} \Phi_1, \quad \Phi_{f_1} = \frac{n_{f_1} - 1}{\bar{n}_1 - 1} \Phi_1 \quad (1)$$

formularına iye bolamız.

Tap usınday jollar menen ekinshi linzanıń (flintten islengen) qızıl hám fiolet nurlar ushın optikalıq kúshleri ushın

$$\Phi_{q_2} = \frac{n_{q_2} - 1}{\bar{n}_2 - 1} \Phi_2, \quad \Phi_{f_2} = \frac{n_{f_2} - 1}{\bar{n}_2 - 1} \Phi_2$$

ańlatpaların alamız. Bul ańlatpalarda Φ_2 arqalı sol linzanıń spekrtdiń orta oblastı ushın optikalıq kúshi belgilengen.

Birinshi hám ekinshi linzalar menen birgelikte payda etilgen quramalı linzanıń qızıl hám fiolet nurlar ushın optikalıq kúshi sáykes mınalardıǵa teń:

$$\Phi_q = \Phi_{q_1} + \Phi_{q_2}, \quad \Phi_f = \Phi_{f_1} + \Phi_{f_2}.$$

Eger qızıl hám fiolet nurlar ushın xromatizmi birdey bolatuǵın bolsa, yaǵnıy $\Phi_q = \Phi_f$ teńligi orınlı bolatuǵın bolsa, onda quramalı linza xromatizmge iye bolmaydı. Nátiyjede, axromatizm shárti mınaday teńlik penen ańlatıladı:

$$\Phi_{q_1} + \Phi_{q_2} = \Phi_{f_1} + \Phi_{f_2}.$$

Bul teńlikke optikalıq kúshlerdiń ornına olardıń (1)- hám (2)-teńlikler boyınsha alıńǵan shamaların qoyıp, mınanı alamız:

$$\frac{n_{f_1} - n_{q_1}}{\bar{n}_1 - 1} \Phi_1 = \frac{n_{f_2} - n_{q_2}}{\bar{n}_2 - 1} \Phi_2.$$

$\frac{n_{f_1} - n_{q_1}}{\bar{n}_1 - 1}$ hám $\frac{n_{f_2} - n_{q_2}}{\bar{n}_2 - 1}$ shamaları salıstırmalı dispersiyalar dep ataladı. Olardı sáykes ν_1 hám ν_2 arqalı belgileymiz. Bunday jaǵdayda sistemanıń axromatizmi shárti tómendegidey túrge iye boladı:

$$\nu_1 \Phi_1 + \nu_2 \Phi_2 = 0. \quad (3)$$

Spekrtdiń orta oblastı ushın sistemanıń optikalıq kúshi Φ

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 \quad (4)$$

ańlatpasınıń járdeminde anıqlanadı. (3)- hám (4)-ańlatpalardan birinshi hám ekinshi linzalar ushın tómendegidey mánislerdi alamız:

$$\Phi_1 = \frac{\nu_2}{\nu_2 - \nu_1} \Phi, \quad \Phi_2 = \frac{\nu_1}{\nu_2 - \nu_1} \Phi. \quad (5)$$

Flint ushın salıstırmalı dispersiya ν_2 kron ushın salıstırmalı dispersiyadan úlken Sonlıqtan $\nu_2 - \nu_1$ ayırması oń hám (5)-teńlikten biz, birinshiden, birinshi hám ekinshi linzalardıń optikalıq kúshleriniń

belgileri hár qıylı; ekinshiden, absolyut mánisi boyınsha $|\Phi_1|$ optikalıq kúshi $|\Phi_2|$ optikalıq kúshiniń absolyut mánisinin úlken. Bunnan (4)-teńlikten, eger birinshi linzanı oń ($\Phi_1 > 0$) etip alsaq quramalı linzanıń optikalıq kúshiniń de oń bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Bunday jaǵdayda qızıl hám kók nurlar ushın fokuslar bir birine sáykes keledi, yaǵnıy quramalı linza xromatizmi boyınsha dúzetilgen boladı.

Qızıl hám kók nurlar ushın fokuslar sáykes kelgende basqa reńler, mısalı, jasıl hám qızıl nurlar ushın fokuslardıń sáykes kelmewi múmkin. Bul úlken bolmaǵan qaldıq xromatizmnıń orın alıwına alıp keledi. Joqarıda qarap ótilgen sistemaǵa salıstırǵanda quramalıraq bolǵan sistemalardı soǵıw jolı menen xromatizmnıń tolıq kompensaciyasın júzege keltiriwge boladı.

§ 324. Optikalıq sistema arqalı ótetuǵın jaqtılıq aǵısı. Ámeliy kóz-qarastan optikalıq sistema tárepinen beriletuǵın súwrettiń jarıqlıǵınıń áhmiyeti júdá úlken. Bul máseleni ayqınlastırıw ushın bir tekli zatta, mısalı hawada jaylasqan linzanı qaraymız (274-súwret). Meyli, obekt xızmetin linzanıń optikalıq kósherine perpendikulyar jaylasqan tuwrı múyeshli ΔS maydanı atqarsın. Súwret optikalıq kósherge perpendikulyar jaylasqan tuwrı múyeshli $\Delta S'$ maydanı bolıp tabıladı. Súwrettiń hár bir tárepi β ese úlkeydi (β arqalı sızıqlı úlkeyiw belgilengen). Sonlıqtan súwrettiń maydanı menen obekttiń maydanınıń qatnası sızıqlı úlkeyiwdiń kvadratına teń boladı:

$$\frac{\Delta S'}{\Delta S} = \beta^2. \quad (1)$$

Meyli, obekttiń jarıqlıǵı B ǵa teń bolsın. Linzaǵa ΔS maydanı tárepinen $\Delta\omega$ denelik múyeshiniń sheklerindegi (ΔS turǵan orında AB linza usınday múyesh penen kórinedi) ΔF jaqtılıq dástesi kelip túsedı. Paraksiallıq nurlar menen sheklensek, onda biz $\Delta\omega$ denelik múyeshin kishi dep esaplawımız kerek hám bunday jaǵdayda 304-paragraftaǵı (1)-formulaǵa sáykes ΔF jaqtılıq dástesin mına túrde kórsetiwimiz kerek:

$$\Delta F = B \cos i \Delta\omega \Delta S.$$

Bul teńlikte i arqalı dásteniń kósheri menen ΔS maydanına túsirilgen normaldıń arasındadı múyesh belgilengen. Qoyılǵan shárt boyınsha ΔS maydanı linzanıń optikalıq kósheri AB ǵa perpendikulyar. Sonlıqtan $\cos i = 1$ hám

$$\Delta F = B \Delta\omega \Delta S \quad (2)$$

formulasına iye bolamız.

Linza arqalı ótkende ΔF aǵısı nurlardıń bir bóliminiń shaǵılısınıń hám linzanıń materialındaǵı jutılıwdıń nátiyjesinde kishireyedi. Linza arqalı

$$\Delta F' = k \Delta F$$

shamasına teń $\Delta F'$ aǵısı ótedi. Bul teńlikte $k < 1$. Bul teńliktegi ΔF shamasınıń (2)-ańlatpa boyınsha mánisin qoyıp, linza arqalı ótken $\Delta F'$ aǵısı ushın mınaday ańlatpa alamız:

$$\Delta F' = k B \Delta\omega \Delta S. \quad (3)$$

$\Delta F'$ aǵısı tolıǵı menen súwrettiń ólshemleri menen sheklengen $\Delta S'$ maydanı arqalı ótedi. Bul aǵıs súwret jaylasqan $\Delta S'$ orınnan AB linzası kórinetuǵın $\Delta\omega'$ denelik múyeshiniń shekleriniń ishinde boladı. Solay etip, súwretten ońǵa qaray $\Delta S'$ maydanınan shıǵatuǵın hám $\Delta\omega'$ denelik múyeshiniń shekleriniń ishinde $\Delta F'$ jaqtılıq aǵısı tarqaladı. Sonlıqtan 304-paragrafta ayılǵan jaǵdaylarǵa baylanıslı $\Delta S'$ maydanınıń jarıqlıǵı B'

$$B' = \frac{\Delta F'}{\cos i' \Delta\omega' \Delta S'} \quad (4)$$

shamasına teń boladı.

$\Delta S'$ maydanı dásteniń kósherine perpendikulyar bolǵanlıqtan $\cos i' = 1$ hám (4)-teńlikten

$$\Delta F' = B' \Delta\omega' \Delta S'$$

ańlatpasına iye bolamız. $\Delta F'$ tıń bul mánisin (3)-ańlatpaǵa qoyıp,

$$B' \Delta\omega' \Delta S' = k B \Delta\omega \Delta S$$

teńligin alamız. Bunnan súwrettiń jarıqlıǵı ushın

$$B' = k B \frac{\Delta\omega}{\Delta\omega'} \cdot \frac{\Delta S}{\Delta S'} \quad (5)$$

añlatpasınıń orınlı ekenligin tabamız. $\Delta\omega$ hám $\Delta\omega'$ denelik múyeshleri kishi bolǵanlıqtan, olar ushın juwıq túrde

$$\Delta\omega = \frac{\pi h^2}{s^2}, \quad \Delta\omega' = \frac{\pi h^2}{s'^2}$$

añlatpalarına iye bolamız. Bul añlatpalarda h - linzanı shekleytuǵın sheńberdiń radiusı hám s penen s' - lizadan sáykes obektke hám súwretke shekemgi qashıqlıqlar. Bunnan

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta\omega'} = \frac{s'^2}{s^2}$$

qatnasına iye bolamız. Biraq, 320-paragraftaǵı (11)-formula boyınsha s'/s shaması linza beretuǵın sızıqlı úlkeytiw β nı beredi. Nátiyjede minanı tabamız:

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta\omega'} = \beta^2.$$

Bul qatnas (1)-qatnas penen birgelikte minanı beredi:

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta\omega'} \cdot \frac{\Delta S}{\Delta S'} = \beta^2 \cdot \frac{1}{\beta^2} = 1.$$

Bunnan keyin (5)-formula mınaday túrge enedi:

$$B' = kB. \quad (6)$$

k koefficienti tek lizadaǵı jaqtılıqtıń joǵalıwınan ǵárezli bolǵanlıqtan eń aqırında mınaǵan iye bolamız: eger linzanıń eki tárepi birdey sındırıw koefficientine iye ortalıqta jaylasqan bolsa, onda *súwrettiń jarıqlıǵı B' tek obekttiń jarıqlıǵı B hám jaqtılıqtıń linza arqalı ótiwiniń barısındaǵı joǵaltıwlar boyınsha anıqlanadı eken*. Súwrettiń jarıqlıǵı linzanıń ólshemlerinen, onıń optikalıq kúshinen, linza beretuǵın úlkeytiwden ǵárezli emes. k koefficientiniń shaması barlıq waqıtta 1 den kishi bolǵanlıqtan, súwrettiń jarıqlıǵı obekttiń jarıqlıǵınan barlıq waqıtta kishi boladı. Linzaǵı jaqtılıqtıń joǵalıwın kishireytiw arqalı súwrettiń jarıqlıǵın obekttiń jarıqlıǵına jaqınlastırıwǵa boladı. Ádette, paydalanılatuǵın materiallar (shiyshe) kózge kórinetuǵın oblastta sonshama móldir bolǵanlıqtan, jaqtılıqtıń joǵalıwı tiykarınan linzanıń eki betindegi jaqtılıqtıń shaǵılısıwınıń esabınan júzege keledi. Meyli, r - shaǵılastırıw koefficienti bolsın. Sonlıqtan, linzanıń birinshi beti arqalı oǵan túsetuǵın aǵıstıń $(1 - r)$ bólimi, al eki bet arqalı aǵıstıń $(1 - r)^2$ bólimi ótedi. Nátiyjede, linzanıń materialındaǵı jaqtılıqtıń jutılıwın esapqa almaytuǵın bolsaq, onda $k = (1 - r)^2$ teńligine iye bolamız.

Súwrettiń jarıqlıǵın linzanıń eki tárepinde jaylasqan zatlardıń sındırıw koefficientleriniń ayırmasınıń esabınan joqarılatıwǵa boladı. Eger keńisliktiń obekt jaylasqan bólimindegi sındırıw koefficienti n ge, al keńisliktiń súwret jaylasqan bóliminiń sındırıw koefficienti n' shamasına teń bolatuǵın bolsa, onda (6)-teńlik

$$B' = \left(\frac{n'}{n}\right)^2 kB \quad (6a)$$

teńligine aylanadı.

Qálegen optikalıq sistemanı ayırım linzalardan turatuǵın sistema dep qarawǵa boladı. Sonlıqtan alıńan juwmaqlar ózleriniń kúshin qálegen optikalıq sistema ushın saqlaydı. Eger obekt penen sistema tárepinen beriletuǵın súwret birdey sındırıw koefficientine iye zatlarda jaylasqan bolsa, onda súwrettiń jarıqlıǵı obekttiń jarıqlıǵınan kishi boladı. p dana sındırıwshı betlerden turatuǵın sistema ushın jaqtılıqtıń jutılıwın esapqa almaǵanda k koefficientiniń shaması $(1 - p)^k$ shamasına teń. p nıń úlken mánislerinde jaqtılıqtıń joǵalıwı ádewir úlken boladı²⁷.

Quramalı sistemada ΔF jaqtılıq aǵısınıń linzalardıń qasnaqları menen diafragmalardıń bar bolıwınıń saldarınan da hásirewi múmkin (325-paragraf).

Kóp sanlı optikalıq ásbaplardıń islewiniń bahalaw ushın súwrettiń jarıqlıǵın emes, al súwrettiń sheklerindegi jaqtılandırılǵanlıq A' tı bilıwdiń áhmiyetli ekenligin atap ótemiz. Eger $\Delta F'$ lizadan

²⁷ Shaǵılısıwlarǵı joǵaltıwlarǵı kemeytiw usılların 277-paragrafta qarańız.

shıǵatuǵın hám súwretti payda etetuǵın aǵıs bolıp tabılatuǵın bolsa, onda jaqtılandırılǵanlıq A' mınaǵan teń:

$$A' = \frac{\Delta F'}{\Delta S'}.$$

Bul qatnasta $\Delta F'$ tiń ornına onıń (3)-ańlatpadaǵı mánisin qoysaq, onda

$$A' = kB\Delta\omega \frac{\Delta S}{\Delta S'}$$

ańlatpasına iye bolamız. (1) boyınsha $\frac{\Delta S}{\Delta S'} = \frac{1}{\beta^2}$ teńliginiń orınlı ekenligin esapqa alsaq, onda

$$A' = kB \frac{\Delta\omega}{\beta^2} \quad (7)$$

(7)-formuladan *súwrettiń sheklerindegi jaqtılandırılǵanlıqtıń obekttiń jarıqlıǵı B boyınsha anıqlanatuǵınlıǵın hám obekt jaylasqan orınnan linza kórinetuǵın $\Delta\omega$ denelik múyeshinen hám sıızqlı úlkeytiw B dan ǵárezli ekenligi kórinip tur.*

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta\omega'} = \frac{s'^2}{s^2}$$

formulasın paydalanıp A' jaqtılandırılǵanlıqqa jáne bir túr beriwge boladı hám onnan

$$\Delta\omega = \Delta\omega' \cdot \frac{s'^2}{s^2} = \Delta\omega' \cdot \beta^2$$

teńligin alamız. $\Delta\omega$ ushın jazılǵan bul ańlatpanı (7)-ańlatpaǵa qoysaq, mınanı alamız:

$$A' = kB\Delta\omega'. \quad (8)$$

Bunnan *súwrettiń sheklerindegi jaqtılandırılǵanlıqtıń linzadan shıǵatuǵın hám súwrette qosılatuǵın nurlarǵa sáykes keletuǵın denelik múyesh penen anıqlanatuǵınlıǵı kelip shıǵadı.*

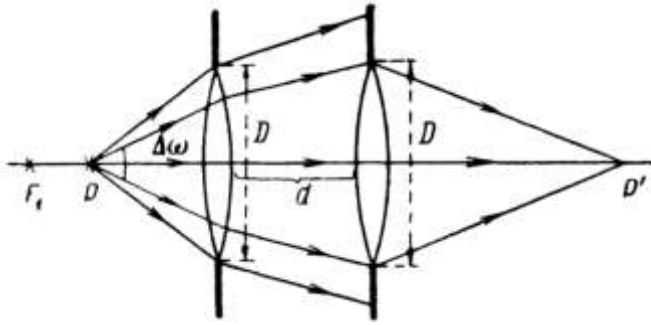
Eger obekt penen súwret sıdırıw koefficientleri n menen n' shamalarına teń hár qıylı ortalıqlarda jaylasqan bolsa, onda (8)-formula

$$A' = kB \left(\frac{n'}{n} \right)^2 \Delta\omega' \quad (8a)$$

ańlatpasına aylanadı.

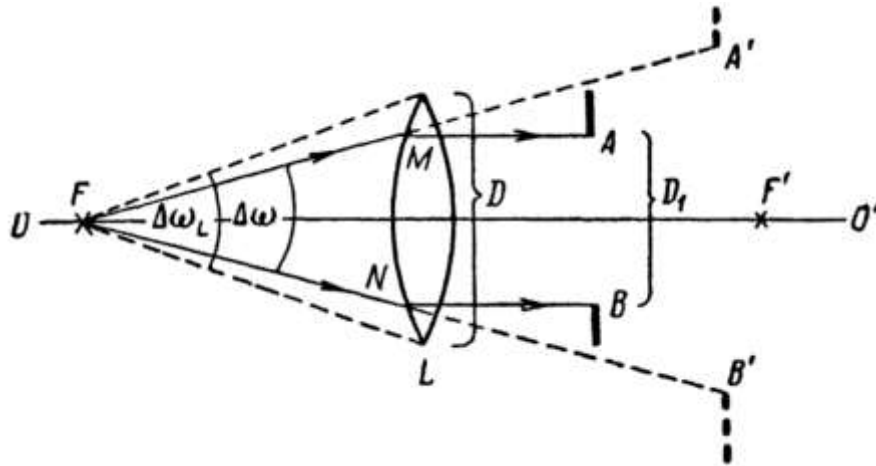
§ 325. Kiriw hám shıǵıw qarashıqları. Quramalı sistema bolǵan jaǵdayda birinshi linzanıń sańlaǵı arqalı sistemaǵa kiretuǵın jaqtılıq aǵısı basqa linzalardıń qasnaqları yamasa qanday da bir diafragmalar menen shekleniwi múmkin. Misal retinde sheksiz juqa hám ekewiniń de diametri D bolǵan hám bir birinen d qashıqlıǵında jaylasqan eki linzanı alayıq (275-súwret). Eger jaqtılıqtıń P noqatlıq deregi birinshi linza menen onıń birinshi bas fokusu F_1 diń arasında jaylasqan bolsa, onda birinshi linza tárepinen ótkerilgen nurlardıń tek bir bólegi ǵana ekinshi linza arqalı ótedi. Usınıń nátiyjesinde sistema arqalı derek tárepinen $\Delta\omega$ denelik múyeshiniń sheklerindegi aǵıs ǵana ótedi. Bul $\Delta\omega$ denelik múyeshiniń shaması P obekti jaylasqan orınnan birinshi linza kórinetuǵın denelik múyeshten kishi boladı. Eger P deregi birinshi bas fokus F_1 diń sırtında jaylasqan bolsa, onda birinshi linzadan jynalıwshı nur shıqqan hám ekinshi linza jaqtılıq penen tolıq toltırılmaǵan bolar edi. Bul jaǵdayda nurlar shıǵatuǵın $\Delta\omega'$ denelik múyeshiniń shaması súwret jaylasqan orınnan ekinshi linza kórinetuǵın denelik múyeshten kishi boladı.

Diafragmalar sistemaǵı aberraciyalardı kishireytiw hám sistemadan hár qıylı qashıqlıqlarda jaylasqan predmetlerdiń bir tegisliktegi súwretiniń anıqlıǵın (keskinligin) úlkeytiw ushın kirgiziledi. Diafragmalar bolǵan jaǵdayda dástelerdi qasnaqlar emes, al sol diafragmalar shekleydi.



275-súwret.
Eki linza arqalı ótetuǵın jaqtılıq dástesi.

Sistema arqalı ótetuǵın nurlardıń dástesin shekleytuǵın qasnaqtı yamasa diafragma *hárekettegi* yamasa *aperturalıq diafragma* dep ataydı. Hárekettegi diafragma tabıwdıń usılın beriw ushın dáslep bir sheksiz juqa L linzadan hám AB diafragmadan turatuǵın eń ápiwayı bolǵan sistemanı qaraymız (276-súwret). Meyli, diafragma linzadan onıń bas fokuslıq qashıqlıǵınan kishi qashıqlıqta jaylasqan bolsın. Diafragmańıń diametri D_1 di linzalıń diametri D dan kishi dep esaplaymız. Meyli, jaqtılıqtıń noqatlıq deregi linzalıń birinshi bas fokusu bolǵan F noqatında jaylasqan bolsın. Súwrette kórinip turǵanıday, FM hám FN nurları F noqatınan shıǵatuǵın hám diafragma arqalı ótetuǵın nurlardıń dástesin shekleydi. FM hám FN nurların dawam etken jaǵdayda AB diafragmasıń L linzası beretuǵın $A'B'$ jormal súwreti bolıp tabıladı. Solay etip, F noqatınan shıǵatuǵın hám sistema arqalı ótetuǵın nurlardıń sheklengenligin kórsetetuǵın $\Delta\omega$ denelik múyeshiniń shaması derek turǵan orınnan difragmanıń súwreti $A'B'$ kórinetuǵın denelik múyeshke teń. Biz qarap atırǵan jaǵdayda $\Delta\omega$ múyeshi derek turǵan orınnan linzalıń qasnaǵı kórinetuǵın $\Delta\omega_L$ denelik múyeshinen kishi. Nátiyjede AB diafragması *hárekettegi diafragma* bolıp tabıladı. Eger diafragmańıń diametri D_1 linzalıń diametri D dan úlken bolsa, onda $\Delta\omega_L$ denelik múyeshi $\Delta\omega$ múyeshinen kishi hám sonlıqtan L linzalıń qastaǵı *hárekettegi diafragma* bolıp tabıladı.



276-súwret. Hárekettegi diafragma.

Joqarıda ayılǵanlardan qálegen sistemalıń *hárekettegi diafragması*n tabıwdıń usılı da kelip shıǵadı. Hárekettegi diafragma tabıw ushın sistemalıń berilgen diafragma yamasa qasnaqtıń aldındaǵı barlıq diafragmalar menen qasnaqlardıń súwretin alıw kerek (derekten shıqqan nurlardıń júrisi boyınsha esaplangan). Usınday súwretlerdiń qatarına sistemalıń birinshi linzasınıń qasnaǵın da kirgiziw kerek. Súwreti obekt jaylasqan orınnan eń kishi $\Delta\omega$ denelik múyeshi menen kórinetuǵın diafragma *hárekettegi diafragma* bolıp tabıladı. Sistemalıń bólimleriniń aldında jaylasqan *hárekettegi diafragma*ń súwreti *kiriw qarashıǵı* dep ataladı.

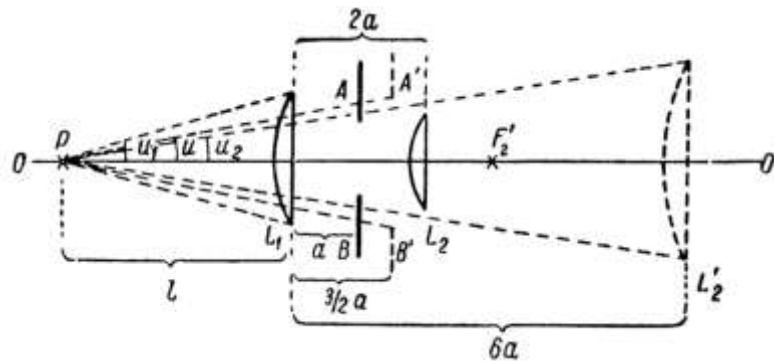
Tap usınday jollar menen *shıǵıw qarashıǵı* túsiniǵin de kirgiziwge boladı. Onıń ushın *hárekettegi diafragma*ń sistemalıń onnan keyingi bólimi beretuǵın súwretin qurıw kerek.

Obekt jaylasqan orınnan kiriw qarashıgınıń diametriniń ushlarına ótkerilgen nurlardıń arasındaǵı múyesh (sistemanıń kósherinde jatatuǵın) *kiriwdiń aperturalıq múyeshi* dep ataladı. Obektıń súwreti jaylasqan orınnan shıǵıw qarashıgınıń diametriniń ushlarına júrgizilgen nurlardıń arasındaǵı múyesh *shıǵıwdıń aperturalıq múyeshi* dep ataladı.

Obekt jaylasqan orınnan kiriw qarashıǵı kórinetuǵın denelik múyesh derek tárepinen shıǵarılǵan hám sistema arqalı ótetuǵın jaqtılıq dástesin óziniń ishine alatuǵın $\Delta\omega$ denelik múyeshi bolıp tabıladı. Tap sol sıyaqlı, súwret jaylasqan orınnan shıǵıw qarashıǵı kórinetuǵın denelik múyesh $\Delta\omega'$ sistemadan shıǵatuǵın hám súwrette kesilisetuǵın $\Delta\omega'$ denelik múyeshi bolıp tabıladı. Atap aytqanda, $\Delta\omega$ hám $\Delta\omega'$ denelik múyeshleri súwrettiń sheklerindegi jaqtılandırıwdı anıqlaytuǵın 324-paragraftaǵı (7)- hám (8)-formulalarǵa kiriwi kerek.

Bir sheksiz juqa linza ushın kiriw hám shıǵıw qarashıqları linzanıń óziniń qasnaǵına sáykes keledi.

Misal sıpatında sxeması 320-paragrafta keltirilgen Gyuygens okulyarın qaraymız. Meyli, okulyardı payda etetuǵın L_1 hám L_2 linzalarınń ortasına dóńgelek AB diafragması jaylastırılǵan bolsın (277-súwret). Okulyardıń ekinshi linzasınıń ekinshi bas fokusu ushın kiriw hám shıǵıw qarashıqların hám shıǵıwdıń aperturalıq múyeshin tabamız.



277-súwret. Gyuygens okulyarınıń kiriw qarashıǵı.

Gyuygens okulyarınıń fokuslıq qashıqlıqları f_1' penen f_2' shamalarına teń hám olar $f_1' = 3f_2' = 3a$ shártin qanaatlardınatuǵın eki linzadan turatuǵın sistema ekenligin eske salamız; linzalardıń arasındaǵı qashıqlıq $d = 2a$ shamasına teń. Linzalardı sheksiz juqa dep esaplaymız.

L_1 linza beretuǵın AB diafragmasıń hám L_2 linzanıń qasnaǵınıń súwretleriniń orınların anıqlaymız. L_1 linzanıń optikalıq kúshi $\Phi_1 = 1/3a$ ǵa teń.

L_1 linzaǵa salıstırǵandaǵı obekt penen onıń súwretiniń iyelegen orınların s hám s' arqalı belgilep minanı alamız (320-paragrafqa qarańız):

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \Phi_1.$$

Bunnan

$$s' = \frac{s}{1 + \Phi_1 s} \quad (1)$$

formulasına iye bolamız.

SHárt boyınsha AB diafragmasınan birinshi linzaǵa shekemgi qashıqlıq a ǵa teń, sonlıqtan $s = -a$ hám (1)-teńlikten

$$s' = \frac{-a}{1 - \frac{a}{3a}} = -\frac{3}{2}a$$

teńligi kelip shıǵadı. Bunday jaǵdayda sızıqlı úlkeytiw β mınaǵan teń boladı:

$$\beta = \frac{s'}{s} = \frac{3a}{2a} = \frac{3}{2}.$$

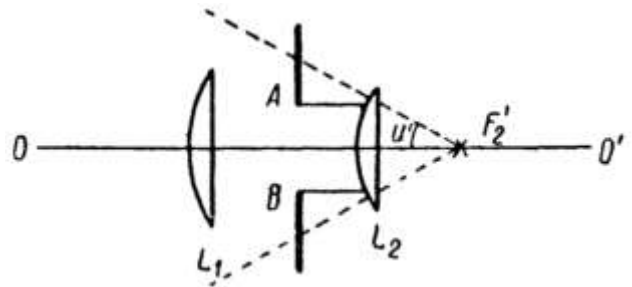
Solay etip, L_1 linza beretuǵın AB diafragmanıń súwreti linzalardıń arasında birinshi linzadan $\frac{3}{2}a$ qashıqlıǵında jaylasadı. Eger diafragmanıń diametrin D arqalı belgilesek, onda súwrettiń diametri $D' = \frac{3}{2}D$ ǵa teń boladı.

L_2 linzanıń qasnaǵı birinshi linzadan $2a$ qashıqlıǵında jaylasqan. Sonlıqtan onıń ushın $s = -2a$ hám (1)-teńlik boyınsha mınanı alamız:

$$s' = \frac{-2a}{1 - \frac{2a}{3a}} = -6a.$$

Bul jaǵdayda sızıqlı úlkeytiw $\beta = 3$. Demek, ekinshi linzanıń qasnaǵınıń súwreti birinshi linzadan $6a$ qashıqlıqta onıń shep tárepinde jaylasadı hám $D'_2 = 3D_2$ diametrine iye boladı (bul teńlikte D_2 arqalı ekinshi linzanıń diametri belgilengen).

278-súwret.
Gyuygens okulyarınıń shıǵıw qarashıǵı.



Sistemanıń shep tárepinde onıń birinshi linzasınan l qashıqlıǵında jaylasqan P noqatın alamız. Qarashıqtı tabıw ushın usı noqattan qaraǵanda birinshi linzanıń qasnaǵına (onıń diametrin D_1 arqalı belgileybiz), AB diafragmasınıń súwretine hám L_1 linza beretuǵın L_2 linzanıń qasnaǵınıń súwretine sáykes keletuǵın $2u_1$, $2u$ hám $2u_2$ múyeshlerin salıstırıw kerek.

Kiriw qarashıǵı L_1 linzasınıń qasnaǵı yamasa u_1 , u hám u_2 múyeshleriniń qaysısınıń kishi ekenligine baylanıslı L_2 linzasınıń yamasa diafragmanıń súwreti bolıp tabıladı. Eger kiriw qarashıǵı anıqlanayın dep atırǵan P noqatı linzalardıń arasındaǵı qashıqlıqtan kóp úlken bolǵan l qashıqlıǵında jaylasqan bolsa, onda 277-súwrette kórinip turǵanıday, mınaday teńlik orın aladı:

$$\operatorname{tg} u_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{D_1}{l}, \quad \operatorname{tg} u = \frac{1}{2} \cdot \frac{3D}{2l}, \quad \operatorname{tg} u_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{3D_2}{l}. \quad (2)$$

(2)-teńlikten mınaday jaǵday kelip shıǵadı: eger L_1 menen L_2 linzalardıń diametrleri

$$D_1 > \frac{3}{2}D, \quad D_2 > \frac{1}{2}D$$

teńsizliklerin qanaatlandıratuǵın bolsa, onda birinshi linza beretuǵın diafragmanıń súwreti bolıp tabıladı. Bunday jaǵdayda hárekettegi diafragma xızmetin AB diafragması atqaradı.

AB diafragmasın hárekettegi diafragma dep esaplap, shıǵıw qarashıǵın anıqlaymız. AB diafragması L_2 linzasınıń birinshi fokallıq tegisliginde jatadı. Bunnan shıǵıw qarashıǵınıń sheksizlikte jatatuǵınlıǵın alamız. Ol L_2 linzasınıń ekinshi bas fokusu F'_2 ten (278-súwret) AB diafragmasınan optikalıq kósherge parallel bolıp shıǵatuǵın nurlar L_2 linzasınıń ekinshi bas fokusu F'_2 fokusında jıynalatuǵın tap sonday bolǵan u' múyeshi menen kórinedi. Demek, biz izlep atırǵan aperturalıq $2u'$ múyeshi mınaday teńliktiń járdeminde anıqlanadı:

$$\operatorname{tg} u' = \frac{D/2}{a} = \frac{D}{2a}.$$

§ 326. Kózdıń optikalıq sisteması. Adamnıń kóziniń ulıwmalıq qurılısı 306-paragrafta keltirildi. Endi setchatkada kórinetuǵın obektlerdiń haqıyqıy súwretiniń payda etetuǵın kózdıń optikalıq sistemasın qaraymız. Kózdıń sıdırıw sisteması bolıp rogovicanıń²⁸ dóńes beti (306-paragraf), xrustalik, kózdi toltırıp turǵan suw tárizli suyıqlıq shiyshe tárizli dene xızmet etedi. Kóздеgi súwret qarap atırǵan obekt jaylasqan zattan (hawadan) basqa zatta (shiyshe tárizli

²⁸ Kózdıń sırtındaǵı tınıq qabıq.

denede) payda boladı. Sonlıqtan kózdıń birinshi hám ekinshi bas fokuslıq qashıqlıqları hár qıylı. Xrustalik bir tekli bolmaǵan zat bolıp tabıladı, onıń sırtqı bóliminiń sındırıw koefficienti 1,38 ge, al ishki bólimi shama menen 1,41 ge teń. Xrustaliktiń optikalıq kúshi kirpik bulshıq etleriniń háreketinen júzege keletuǵın onıń betleriniń iymekliginiń ózgeriwiniń esabınan ózgere aladı. Xrustaliktiń optikalıq kúshiniń ózgeriwi menen setchatkadaǵı predmetlerdiń olardıń kózden qashıqlıǵına ǵárezli súwretleriniń keskin fokuslanıwı ámelge asadı. Bul processti *akkomodaciya* dep ataydı.

Kózdıń kiriw qarashıǵı onıń haqıyqıy qarashıǵına sáykes keledi. Kózdıń reńli perdesiniń²⁹ járdeminde qarashıqtıń diametriniń ózgeriwi múmkin, bul kózge túsetuǵın jaqtılıq aǵısınıń shamasın retlestiredi: ázzi jaqtılandırıwda qarashıq úlkeyedi, al kúshli jaqtılandırıwda - kishireydi.

Hár qıylı adamlarda kózdıń optikalıq sistemasında ádewir úlken individuallıq awıtqıwlar orın aladı. Kózdıń ulıwmalıq xarakteristikası ushın tómendegidey turaqlılardıǵa iye ápiwayılastırılǵan hám ortashalastırılǵan modelden paydalanıwǵa boladı (bul modeldi keltirilgen kóz dep ataydı):

sındırıwshı kúsh	58,64 D.
birinshi bas tegisliktiń ornı (kózdıń sırtındaǵı tınıq qabıqtıń tóbesinen)	+1,348 mm.
ekinshi bas tegisliktiń ornı (kózdıń sırtındaǵı tınıq qabıqtıń tóbesinen)	+1,602 mm.
birinshi bas fokuslıq qashıqlıq	-17,1 mm.
ekinshi bas fokuslıq qashıqlıq	+22,8 mm.

Kózdıń bas tegislikleri (H hám H') menen bas fokuslarınıń (F hám F') orınları 279-súwrette keltirilgen.

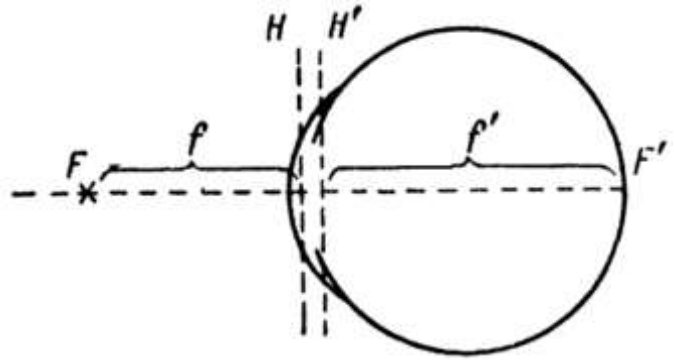
Akkomodaciya múmkin bolǵan sheklik noqatlardı *alıstaǵı* hám *jaqındaǵı* noqatlar dep ataydı. Ádettegidey normal kózde alıstaǵı noqat sheksizlikte, al jaqındaǵı noqat shama menen 20 sm qashıqlıqta jaylasadı. Jas waqıtta adamlar kózin jaqınaraq (10-15 sm) predmetke akkomodaciyalay aladı. Jastıń ótiwi menen kózlerdiń akkomodaciyalanıw qábiletligi tómendeydi.

Jaqınnan kóriw hám alıstan kóriw dep atalatuǵın kózdıń optikalıq sistemasınıń kemshilikleri jiyi ushırasadı. Jaqınnan kóretuǵın kóz normal kózge qaraǵanda úlken optikalıq kúshke iye boladı, onıń ushın alıstaǵı noqat sheksizlikte emes, al kózden shekli qashıqlıqta jaylasadı (kúshli jaqınnan kóriwde 1,5 - 1 m hám onnan da kishi qashıqlıqta). Alıstan kóretuǵın kóz ushın jaqın noqat kózden 20 sm den úlken shamaǵa qashıqlasqan, al alıs noqat kózdıń arǵı tárepinde jaylasadı; bul alıstan kóretuǵın kózdıń setchatkada tek parallel emes, al nurlardıń qosılatuǵın dástesin de fokuslay alatuǵınlıǵın ańǵartadı. Alıstan kóretuǵın kóz normal kózge salıstırǵanda kishi optikalıq kúshke iye boladı.

Kózdıń optikalıq sisteması bir qatar kemshiliklerge iye boladı: sferalıq aberraciyaǵa, komaǵa, ádewir úlken xromat aberraciyaǵa. Biraq bul kemshilikler kóriw processiniń fiziologiyalıq ózgeshelikleriniń nátiyjesinde kórinip turǵan predmetlerdiń subektivlik qabıllanıwınıń xarakterine kúshli tásir etpeydi.

²⁹ Kózdıń reńli perdesi - rus tilinde "radujnaya obolochka glaza" (Awdarıwshılar).

279-súwret.
Kózdiń bas tegislikleri menen bas
fokusları.

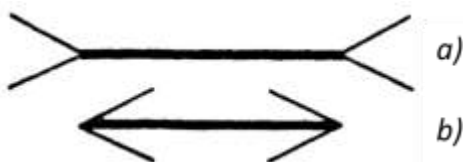


306-paragrafta aytıp ótkenimizdey, eger predmettiń súwreti setchatkanıń sarı daǵına, ayırıqsha onıń oraylıq shanaǵına túsetuǵın bolsa, onda kózler júdá kóp sanlı detallardı ayıra aladı. Sarı daq úlken bolmaǵan ólshemlerge iye, oǵan predmetlerdiń shama menen 6—7 graduslıq múyesh penen kórinetuǵın súwreti túsedı. Kóz benen qabıl etiletuǵın ulıwmalıq maydan vertikal baǵıtta shama menen 130° hám gorizont baǵıtında 160° tı quraydı. Normal kóz ushın sarı daqtıń sheklerindeki ajırata alıw kúshi shama menen $1'$ tı quraydı. Bul kózlerdiń bir birinen múyeshlik qashıqlıǵı $1'$ bolǵan jaqtılıq shıǵaratuǵın noqatlardı ajırata alatuǵınlıǵın ańǵartadı; $30''$ qa hám hátte $10''$ qa jetetuǵın joqarıraq ajırata alıw uqıplıǵı da jıyı ushırasadı. Sarı daqtıń orayınan qashıqlasqan sayın ajırata alıw kúshi tez kemeyedi: 60° múyeshtegi ajırata alıw kúshi sarı daqtıń sheklerindeki ajırata alıw kúshiniń shama menen $0,02$ bólimin quraydı. Gewgimdeki kóriwde ajırata alıw kúshi kúndizgi kóriwge qaraǵanda ádewir kishi (10 esege shekem).

Eger predmet kózden jaqın noqattan biraz úlken qashıqlıqta jaylasqan bolsa, onda kúndizgi jaqtılandırıwda kóz júdá kóp sanlı detallardı ajırata aladı. Ádette bul qashıqlıq 25 sm ge teń dep qabıl etiledi, bunday qashıqlıqtı *en jaqsı kóriw qashıqlıǵı* dep ataladı.

Kóriw seziminiń intensivligi jaqtılıqtıń setchatkaǵa tásiiri baslanıwdan dárhál maksimumǵa jetpeydi hám jaqtılıqtıń tásiiri tamam bolǵannan keyin dárhál joǵalmaydı. Jaqtılıqtıń kózge túsiwi toqtaǵannan keyin kóriw sezimi $1/10$ sek dawamında dawam etedi. Usınıń saldarınan jıltıdap jaqtılıq shıǵaratuǵın derek bir sekund dawamında 10 retten kóbirek jıltıdaytuǵın bolsa, onda bunday derek teń ólshemli jaqtılıq shıǵaratuǵında bolıp kórinedi.

Kózdiń fiziologiyalıq ózgeshelikleri mınaday jaǵdayǵa alıp keledi: kózdi qozǵatpay uslap turǵanda bir detallarınıń sanı az bolǵan keń maydandı hám kóp sanlı detalları bar úlken bolmaǵan maydandı kóremiz (sarı daqqa sáykes keletuǵın). Kóriw processı predmetlerge "izbe-iz" qarawǵa alıp klinedi. Bul jaǵday úlken fiziologiyalıq áhmiyetke iye, sebebi hár bir berilgen momentte kóp bolmaǵan obektlerge tiykarǵı dıqqattı awdarıwǵa hám usınıń menen birge qorshap alǵan jaǵdaydaǵı obektlerdiń kóp bolmaǵan sanına itibar beriwge múmkinshilik beredi. Ulıwma aytqanda kóriw processı júdá quramalı akt bolıp, bul akta belgili orındı este saqlaw, basqa organlardıń qabıl etiwı h.t.b. áhmiyetli orındı iyeleydi. Bir qatar jaǵdaylarda obektlerdiń arasındaǵı qabıl etiletuǵın geometriyalıq qatnaslar olardıń haqıyqıy geometriyalıq qatnaslarına sáykes kelmeydi. Bunday jaǵdaylardı "optikalıq aldaw" dep ataydı. 280-súwrette ushlarına jıńışke sızıqlar tutastırılǵan juwan gorizont baǵıtındaǵı sızıqlar kórsetilgen. Joqarǵı juwan sızıq tómengi sızıqqa salıstırǵanda uzınraq bolıp kórinedi. Haqıyqatında eki juwan sızıqtıń uzınlıqları birdey. Onı olardıń uzınlıqların tegis qaǵazde belgilew jolı menen iseniwge boladı.



280-súwret.
"Optikalıq aldaw" ǵa mısál.
b sızıǵı *a* sızıǵına salıstırǵanda kelterek bolıp
kórinedi.

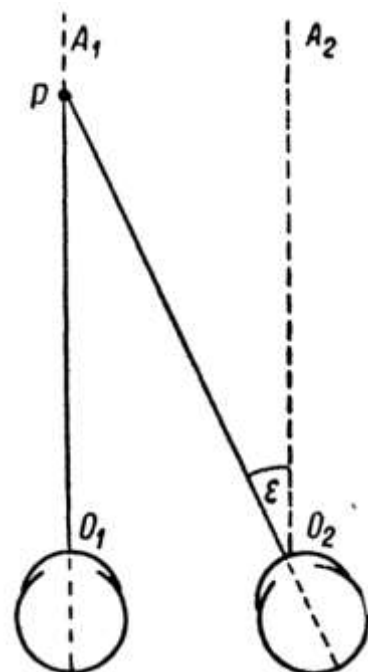
Sarı daq setchatkanın kózdin optikalıq kósheri menen kesilisiw noqatınan azmaz jılısqan. Sonlıqtan, kózdi qanday da bir obektke qaratqanda biz sol obektke kózdin optikalıq kósherin emes, al kózdin túyinlik noqatı menen sarı daqtın orayın tutastıratuğın tuwrını qaratamız. Bul sızıqtı *tuwrı kóriw tuwrısı* dep ataydı. Kóriw processinde obektlerdi eki kóz benen kóriw áhmiyetli orındı iyeleydi. Qanday da bir P obektine qarağanımızda biz kózdi eki kózdin de tuwrı kóriw tuwrısı usı obekt arqalı ótetuğında etip qaraymız. Bunday jağdayda P obektinen jaqın hám alıs jaylasqan obektler qos bolıp kórinedi (281-súwret). Eki kóz benen kóriwdin saldarınan (*binokulyarlıq kóriw*) biz obektten kózge shekemgi qashıqlıqtı bahalaw múmkinshiligine iye bolamız. Bul bahalaw kózdin burılıwına baylanıslı pútkilley ıqtıyarlı emes túrde júzege keledi. Meyli, O_1A_1 hám O_2A_2 tuwrı kóriw sızıqları (281-súwret) júdá alıstağı obektke qarawğa sáykes keledi; bunday jağdayda is júzinde bul sızıqlar bir birine parallel. O_1A_1 tuwrısınıń boyınsha shekli l qashıqlıǵında jaylasqan obektke qaraǵanda kóz azmaz burıladı; O_1A_1 hám O_2A_2 tuwrılarınıń arasındaǵı ε múyeshi *parallaks múyeshi* dep ataladı. ε múyeshi obektke shekemgi l qashıqlıǵı menen

$$l = \frac{b}{\omega}. \quad (1)$$

Bul teńlikte b - eki kózdin túyinlik noqatlarınıń arasındaǵı qashıqlıq. Eki kóz benen qaraǵanda parallaks múyeshi ε boyınsha qashıqlıqlardı bahalaw *stereoskopiyalıq kóriw* dep ataladı. Stereoskopiyalıq kóriw parallaks múyeshiniń bazı bir minimallıq mánisi ε_{min} shamasınan úlken bolǵan múyeshlerde orın aladı. Ádette $\varepsilon_{min} = 1'$. Biraq kóp sanlı adamlarda ε_{min} niń mánisi kishi, hátte $1''$ shamasına da jetedi. $1'$ shamasındaǵı parallaks múyeshine $l \cong 220$ m qashıqlıq sáykes keledi. Demek, stereoskopiyalıq effekt kózden 200-250 m den úlken bolmaǵan qashıqlıqtaǵı predmetler ushın orın aladı. Oǵan salıstırǵanda ádewir úlken qashıqlıqlar haqqında bir qatar janapay belgiler boyınsha gáp etiwge boladı: ólshemleri belgili bolǵan predmetlerdin kózge kórinetuğın múyeshlik ólshemleri, bir birinen ajırata alıwǵa bolatuğın detallardıń sanı h.t.b. boyınsha.

Eger tómendegidey ápiwayı tájiriybeni ótkersek, onda jaqın qashıqlıqlarda jaylasqan predmetlerdi kórgendegi stereoskopiyalıq kóriwdin tutqan ornın ayqın kóriwge boladı: eki qolǵa eki qálem alıp, olardıń ushların bir birine tiygiziwge tırısw kerek; eger bir kóz benen qaraǵanda qálemlerdiń ushların bir birine tiygiziw qıyın boladı.

281-súwret.
Eki kóz benen kóriw.



§ 327. Subektivlik jariqlıq. Kóz benen qaraytuǵın predmetlerdiń subektivlik jariqlıǵı haqqındaǵı júdá áhmiyetli máseleni qaraymız.

Jariqlıqtı subektivlik seziw setchatkadaǵı súwrettiń sheklerinde alınatuǵın jaqtılandırılıw menen anıqlanadı. Biz shekli ólshemlerge iye bolǵan obektke qaraymız dep boljayıq. Bunday jaǵdayda 324-paragraftaǵı (8a) formula boyınsha onıń súwretiniń sheklerindegi jaqtılandırılǵanlıq A' tıń

$$A' = kB \left(\frac{n'}{n} \right)^2 \Delta\omega' \quad (1)$$

shamasına teń ekenligi belgili. Bul teńlikte $\Delta\omega'$ arqalı kózdiń qarashıǵınan shıǵıp, setchatkada kesilisetuǵın nurlardıń arasındaǵı múyesh, n' hám n arqalı hawa menen kóz almasın toltırıp turǵan shiyshe tárizli deneniń sıdırıw kórsetkishleri, B arqalı obektiniń fotometrlik jariqlıǵı belgilengen.

Kózdiń qarashıǵınıń diametrin d arqalı belgileybiz; qarashıqtan setchatkaǵa shekemgi qashıqlıq kózdiń ekinshi fokuslıq qashıqlıǵı f' qa teń; bunnan $\Delta\omega'$ denelik múyeshi ushın juwıq túrde mınanı alamız:

$$\Delta\omega' = \frac{\pi d^2}{4f'^2}.$$

$\Delta\omega'$ nıń bul mánisin (1)-ańlatpaǵa qoysaq,

$$A' = \frac{k\pi}{4} \left(\frac{n'}{n} \right)^2 \left(\frac{d}{f'} \right)^2 B \quad (2)$$

ańlatpasın tabamız. Berilgen sharayatlardaǵı berilgen kóz ushın $\frac{d}{f'}$ qatnası turaqlı. Nátiyjede (2)-formuladan mınaǵan iye bolamız: *kóz benen qaralatuǵın obektlerdiń subektivlik jariqlıǵı olardıń fotometrlik jariqlıǵı menen anıqlanadı.* Setchatkadaǵı súwrettiń ólshemleri shekli bolǵan jaǵdaylarda subektivlik jariqlıq obektiniń ólshemlerinen de, onıń kózden qashıqlıǵınan da ǵárezsiz. Birdey bolıp jaqtılandırılǵan eki qaǵaz sol eki qaǵazdıń biri jaqın, al ekinshisi alıstıraıq jaylasqan jaǵdayda da birdey jariq bolıp kórinedi.

Basqa sezimler sıyaqlı, kóriw seziminiń intensivligi titirketiwshiniń quwatına ápiwayı proporcionallıqqa iye emes. Esitiw seziminiń intensivligi sıyaqlı (I tomǵa qarańız) kóriw seziminiń intensivligin titirketiwshiniń quwatınıń logarifmine proporcional dep esaplawǵa boladı. Sonlıqtan, (2)-formulaǵa sáykes fotometrlik jariqlıq B nıń úlkeygende, mısalı eki ese úlkeygende, subektivlik jariqlıq ádewir kishi úlkeyedi. Obektlerdiń jariqlıqlıǵınıń úlken ózgerisinde qarashıqtıń diametri d nıń kózge túsetuǵın jaqtılıq aǵısınan ǵárezligin itibarǵa alıwǵa tuwrı keledi.

Joqarıda ayılǵanlardıń barlıǵı qaralatuǵın obekt shekli kóriniw múyeshi menen kórinetuǵın jaǵday ushın durıs. Eger obekt júdá alısta jaylasqan bolsa hám onnan shıqqan nurlar kózge parallel túsetuǵın bolsa, basqa qatnaslar alınadı. Bunday jaǵdayda setchatkada obektke geometriyalıq uqsas bolǵan súwret payda bolmaydı, al kózdegi difrakciyalıq qubılıslar menen anıqlanatuǵın dóńgelek payda boladı. Bul dóńgelektiń ólshemleri (269-paragrafqa qarańız) kózdiń qurılısınan ǵárezli. Nátiyjede difrakciyalıq dóńgelektiń sheklerindegi jaqtılandırılǵanlıq kózdiń qarashıǵına túsetuǵın jaqtılıq aǵısı ΔF tiń shaması boyınsha anıqlanadı. Biz qaraytuǵın jaqtılıq deregin onı noqatlıq derek dep esaplaǵanday dárejede júdá alısta jaylasqan dep boljayıq. Bunday jaǵdayda aǵıs $\Delta F = I\Delta\omega$ shamasına teń (I - jaqtılıq dereginin jaqtılıq kúshi, al $\Delta\omega$ - derek turǵan orınnan kózdiń qarashıǵı kórinetuǵın múyesh). Eger kózden derekke shekemgi qashıqlıq r ge teń bolsa, onda $\Delta\omega = \pi d^2 / 4r^2$ hám qarashıqqa túsetuǵın jaqtılıq aǵısı ΔF mınaǵan teń:

$$\Delta F = \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{I}{r^2}. \quad (3)$$

Subektivlik jariqlıq usı ΔF aǵısınıń shaması boyınsha anıqlanadı. Solay etip, (3)-formulaǵa sáykes mınanı alamız: noqatlıq derektiń subektivlik jariqlıǵı onıń jaqtılıq kúshi boyınsha anıqlanadı hám kózden derekke shekemgi qashıqlıqtan ǵárezli.

§ 328. Vizualıq optikalıq ásbaplar. Vizualıq optikalıq ásbaplar kózge qosımsha sıpatında xızmet etedi. Kópshilik jaǵdaylarda olardıń maqseti ajırata alıw kúshin joqarılatıw bolıp tabıladı.

Bir qatar vizualıq ásbaplardı qaraymız.

Lupa. Eń ápiwayı lupa oń linzadan turadı. L linza baqlanatuǵın PP' obekti onıń bas fokallıq tegisligi F tiń qasında kózge biraz jaqın jaylastırıladı. Bunday jaǵdayda jormal, tuwrı, úlkeytilgen $P_1P'_1$ súwret ádewir úlken bolǵan hám kóz akkomodaciyasız kóretuǵın qashıqlıqta payda boladı. Linzanı juqa dep esaplasaq, onda obekttiń shetlerinen shıqqan hám linzanıń orayı O dan ótetuǵın PO hám $P'O$ nurların linza arqalı sınbay ótedi dep esaplawǵa boladı. Bunday jaǵdayda $P_1P'_1$ súwrettiń múyeshlik ólshemleri $2u$ múyeshi menen anıqlanadı. Bul múyeshiń shaması PP' obektiniń ózi linzanıń orayı O dan kórinetuǵın múyeshke teń. Linzanıń birinshi bas fokuslıq qashıqlıǵın f arqalı, al obekttiń ólshemlerin y arqalı belgilep

$$2u = \frac{y}{f} \quad (1)$$

formulasın alamız.

Lupanıń tásirin bahalaw ushın, biz $2u$ múyeshlik qashıqlıǵın obekti qurallanbaǵan kóz benen kórinetuǵın $2u_0$ múyeshi menen salıstıramız. Bul múyeshlik qashıqlıq $2u_0 = \frac{y}{l}$ shamasına teń. Bul teńlikte l arqalı obekt penen kózdiń arasındaǵı qashıqlıq belgilengen. Lupanı ádette kózden ıqtıyarlı qashıqlıqta jaylasqan predmetlerdi kóriw ushın paydalanatuǵın bolǵanlıqtan, l qashıqlıǵı eń jaqsı kóriw qashıqlıǵı l_0 ge teń etip alınadı. Bunday jaǵdayda

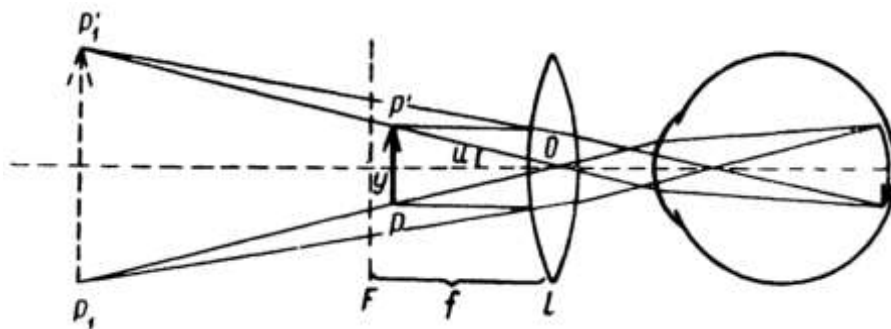
$$2u_0 = \frac{y}{l_0} \quad (2)$$

teńligi orınlı boladı.

(1)- hám (2)-teńliklerdi salıstırıp, lupanıń qaralatuǵın predmettiń muyeshlik ólshemlerin

$$\gamma = \frac{u}{u_0} = \frac{l_0}{f} \quad (3)$$

ese úlkeytiwge múmkinshilik beretuǵınlıǵın kóremiz.



282-súwret. Linzanıń islewi.

Eger lupanıń linzası súwretti buzbaytuǵın bolsa, onda ajırata alıw kúshi de tap sonshama úlkeyedi.

γ shaması lupanıń múyeshlik úlkeytiwi dep ataladı. Eger l_0 menen f ti santimetrlerde ańǵartatuǵın bolsaq, onda $l_0 = 25$ sm hám γ ushın

$$\gamma = \frac{25}{f \text{ (sm)}} \quad (3a)$$

shamasın alamız.

Aberraciylardı dúzetiw ushın lupanı bir birinen bazı bir qashılıqta jaylasqan eki linzadan quraydı. Bunday linza 10-20 ese úlkeyte aladı.

Kóriw trubası. Kóriw trubaları menen teleskoplar úlken qashılıqlardağı obektlerdi kóriw ushın arnalğan. Olar eń ápiwayı jaǵdayda L_1 hám L_2 linzalarınan turatuǵın sistema bolıp tabıladı (283-súwret). Olar L_1 linzalıń ekinshi bas fokusu L_2 linzalıń birinshi bas fokusu menen sáykes keletuǵınday etip jaylastırılğan (teleskoplıq sistema). L_1 linza obektiv, al L_2 linza okulyar dep ataladı. Eger obekt jetkilikli dárejedegi úlken qashılıqta jaylasqan bolsa, onda L_1 linza beretuǵın onıń $P'P'$ súwreti onıń bas fokallıq tegisliginde alınadı; súwrettiń múyeshlik ólshemleri $2u_1 = y'/f'_1$ shamasına teń, bul teńlikte y' arqalı onıń sızıqlı ólshemleri, al f'_1 arqalı obektivtiń ekinshi bas fokuslıq qashılıǵı belgilengen. Okulyar lupanıń xızmetin atqaradı hám, soǵan sáykes, okulyar beretuǵın súwret kóz tárepinen

$$2u_2 = \frac{y'}{f_2}$$

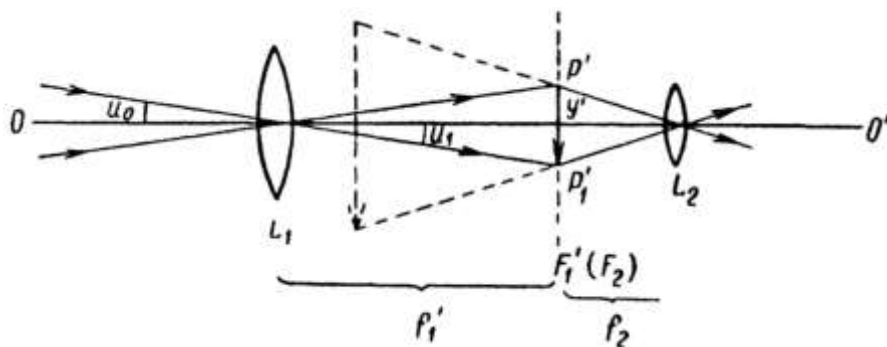
múyeshinde qabıl etiledi. Bul teńlikte f_2 - okulyardıń birinshi bas fokuslıq qashılıǵı.

Kóriw trubasınıń uzınlıǵı obektke shekemgi qashılıqtan kishi bolǵanlıqtan, qurallanbaǵan kóz obektte $2u_2 = 2u_1$ múyeshi menen qabıl etedi. Bunnan kóriw trubasınıń múyeshlik úlkeytiwi mınaǵan teń boladı:

$$\gamma = \frac{2u_2}{2u_1} = \frac{2u_2}{2u_0} = \frac{f'_1}{f_2}. \quad (4)$$

Solay etip, obektivtiń fokuslıq qashılıǵı qanshama úlken hám okulyardıń fokuslıq qashılıǵı qanshama kishi bolsa trubanıń múyeshlik úlkeytiwi sonshama úlken boladı.

Kórsetilgendey sxema boyınsha soǵılğan kóriw trubası baqlanatuǵın predmettiń tónkerilgen súwretin beredi. Eger truba astronomıyalıq obektlerdi baqlaw ushın soǵılğan bolsa (bunday jaǵdayda onı teleskop dep ataydı), onda súwrettiń tónkerilgen bolıwı áhmiyetke iye emes. Jerdegi baqlawlardı ótkeriw ushın arnalğan trubalarda súwrettiń tónkerilgen bolmawı ushın súwretti jáne bir ret tónkeretuǵın qosımsha sistemanı kirgizedi.



283-súwret. Kóriw trubasınıń sxeması.

Is júzinde úlken aberraciylar menen xromatizmniń saldarınan ápiwayı linzalar túrindegi obektivler menen okulyarlar paydalanıwǵa jaramaydı. Sonlıqtan obektivti birewi oń, al ekinshisi teris bolǵan bir birine jelimlengen eki linzadan soǵadı. Geypara jaǵdaylarda súwretti onnan da jaqsılaw ushın quramalı sistema túrinde tayarlaydı. Okulyarlı quramalı, ádette eki linzadan turatuǵın sistema túrinde soǵadı.

SHekli kóriw múyeshi menen kórinetuǵın obektlerdi kóriw trubası arqalı kórgende, 324-paragrafta kórsetilgenge sáykes, olardıń jarıqlıǵı olardıń haqıyqiy fotometrlik jarıqlıǵınan joqarı bola almaydı. Trubadaǵı shaǵılıswlar menen jutılıwlarıń saldarınan jaqtılıqtıń qutılıwǵa bolmaytuǵın joǵaltıwlarınan sebebinen trubalar barlıq waqıtta jarıqlıqtı bir qansha tómenletedi. Trubadaǵı jaqtılıqtıń joǵalıwınan qutılıw ushın artıqmash shaǵılıstırıwshı betlerdiń bolmawına hám baqlawshınıń kóziniń qarashıǵınıń tolıǵı menen okulyardan shıqqan jaqtılıq penen

toltırılıwına erisedi. Sebebi tek usı jaǵdayda ǵana obektin berilgen jariqlıǵında kózdin setchatkasındaǵı múmkin bolǵan maksimalıq jaqtılandırılǵanlıq alınadı.

Kóriw trubası baqlanatuǵın obektlerdin jariqlıǵın kúsheyte almasa da, gewgimdegi jaqtılıqta kóz benen qaraǵanǵa salıstırǵanda truba arqalı qaraǵanda "jaqsıraq kórinedi". Másele sonnan ibarat, 306-paragrafta aytııp ótilgenindey gewgimdegi kóriwde kózdin ajırata alıw kúshi kúndizgi jaqtılandırıwdıǵıǵa salıstırǵanda ádewir tómén. Trubanın úlken úlkeytiwinde predmetin barlıq detalları úlken múyeshlerde kórinedi hám kóz olardı ajırata alıw imkaniyatına iye boladı.

Gewgimdegi jaqtılıqta predmetlerdi kóriwge múmkinshilik beretuǵın trubanı soǵıw máselesi M.V.Lomonosov tárepinen qoyılǵan edi. Ol ózi "túnde kóretuǵın" dep ataǵan trubanı soqtı. Úlken úlkeytiwge iye hám jaqtılıq aǵısı kózdin qarashıǵın tolıq toltıratuǵın etip konstrukciyalanǵan bul truba túngi waqıtları qurallanbaǵan kóz benen baqlaǵanǵa salıstırǵanda jaqsıraq baqlawǵa múmkinshilik berdi.

Teleskop penen juldızlarǵa qaraǵanda teleskoptın obektivine obektten jaqtılıqtın parallel dástesi túsetuǵın jaǵdayǵa iye bolamız.

Bul jaǵdayda teleskoptın obektivi óziniń fokallıq tegisliginde biz 269-paragrafta tallan dóngelek tesikten alınatuǵın difrakciyalıq súwretke sáykes keletuǵın difrakciyalıq súwretti beredi. Bul kartınaǵa keyin okulyar arqalı qaraydı. Parallel nurlardin difrakciyalanıwshı dástesin shekleytuǵın dóngelek sańlaq teleskoptın qasnaǵı bolıp tabıladı. Dóngelek sańlaqtan difrakciyada jaqtılıqtın úlken bólimi oraylıq jaqtılı daqqa túsetuǵın bolǵanlıqtan, teleskopta kórinetuǵın juldızdin "súwreti" difrakciyalıq súwretin oraylıq daǵınan basqa hesh nárese bolmaydı. 269-paragrafta ayılǵanlarǵa sáykes oraylıq daqtın múyeshlik radiusı bolǵan ϑ shaması mánisi $\vartheta \cong 1,22 \frac{\lambda}{D}$ teńliginiń járdeminde anıqlanadı. Bul teńlikte D - tesiktin diametri (bul jaǵdayda obektivtin qasnaǵınıń diametri). Sol dóngelektin sıızılı radiusı $r = \vartheta f'_1 \cong 1,22 \frac{f'_1}{D} \lambda$ shamasına teń (f'_1 arqalı obektivtin ekinshi fokuslıq qashılıǵı belgilengen). D shaması berilgen teleskop ushın turaqlı shama bolǵanlıqtan barlıq juldızlar birdey ólshemdegi dóngeleklerdi beredi. Demek, bul dóngeleklerdin jariqlıǵı juldızdan teleskoptın obektivine kelip túsetuǵın jaqtılıqtın aǵısı ΔF ke proporcional. Eger A juldız tárepinen Jerdin betinde payda etiletuǵın jaqtılandırıw bolsa, onda $\Delta F = A \frac{\pi D^2}{4}$ teńligine iye bolamız; teleskop penen qaraǵandaǵı difrakciyalıq dóngelektin jariqlıǵı menen juldızdin subektivlik jariqlıǵı proporcional. Eger sol juldız qurallanbaǵan juldız benen qaralatuǵın bolsa, onda 327-paragrafta ayılǵanlarǵa baylanıslı bul juldızdin subektivlik jariqlıǵı kózdin qarashıǵına túsetuǵın $\Delta F'$ aǵısına proporcional, al $\Delta F'$ aǵısınıń ózi $\Delta F' = A \frac{\pi d^2}{4}$ shamasına teń (d arqalı qarashıqtın diametri). Joqarıda kórsetilgen aǵıslardin qatnası teleskop penen baqlaǵanda juldızdin jariqlıǵınıń ósiminiń ólshemi bolıp tabıladı:

$$\frac{\Delta F}{\Delta F'} = \left(\frac{D}{d} \right)^2.$$

Teleskoptın obektivtin diametri úlken bolǵanda $\left(\frac{D}{d} \right)^2$ qatnası da úlken hám juldızlardı teleskop arqalı qaraǵanda qurallanbaǵan kóz benen qaraǵandaǵıǵa salıstırǵanda ádewir jariq bolıp kórinedi. Teleskop arqalı aspanǵa qaraǵanda onın subektivlik jariqlıǵı is júzinde ózgermeydi.

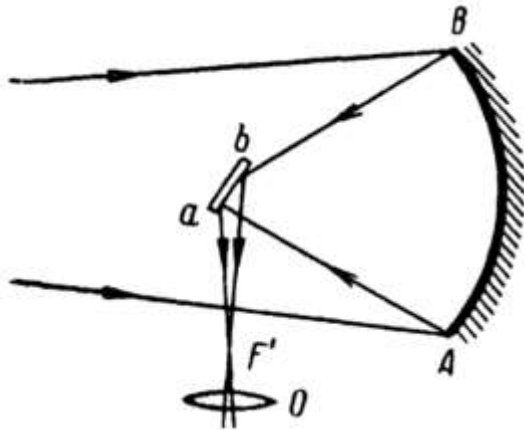
Teleskoptın ajırata alıw kúshi tómende 330-paragrafta qaraladı.

Joqarıda táriyiplengen linzalıq sistemaǵa iye kóriw trubaları hám teleskoplar menen bir qatarda shaǵılıstırıwshı aynalarǵa iye sistemalardı dóretiwge boladı. Shaǵılıstırıwshı teleskop birinshi ret Nyuton tárepinen soǵıldı. Nyutonın teleskoptın sxeması 284-a súwrette kórsetilgen. Obektten shıqqan nurlardin dástesi oyıs AB aynasına kelip túsedı. AB aynasında shaǵılısqan nurlar kishi ab tegis aynanın járdeminde oyıs aynanın F' fokallıq tegisliginde jıynaladı. F' fokallıq tegisliginde alınatuǵın súwret O okulyarınin járdeminde qaraladı.

Barlıq tolqın uzınlıqların birdey etip shağılıstıratuǵın ayna xromatlıq aberracıyanı bermeydi. Bul ózgesheligi boyınsha Nyutonnıń teleskopı sol dáwirlerdegi linzalıq teleskoplardan úlken artıqmashlıqqa iye boldı. Sebebi sol waqıtları axromatlıq linzalardı soǵa almaytuǵın edi hám teleskoplar úlken xromatlıq aberracıyaǵa iye boldı.

Úlken diametrge hám jaqsı sapaǵa iye bolǵan linzalardı alıw júdá qıyın bolǵanlıqtan, házirgi waqıtları da eń úlken teleskoplardı shağılıstırıwshı aynalarǵa iye teleskoplar túrinde shıǵadı. Házirgi waqıtlardaǵı eń úlken linzalıq teleskoplardıń ("refraktorlardıń") obektiviniń diametri 1 m diń átirapında; al eń úlken aynalıq teleskoplar ("reflektorlar") diametri 5 m ge shekemgi aynalarǵa iye.

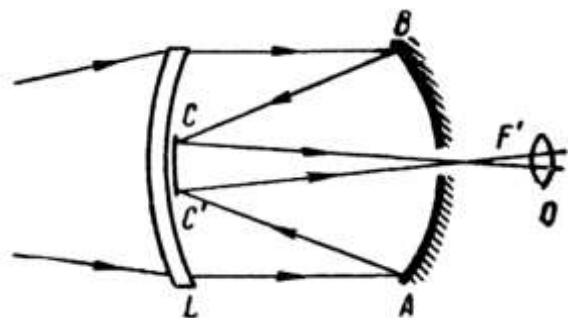
Házirgi waqıtları aralas bolǵan linzalıq-aynalıq sistemalar da paydalanıladı.



284-a súwret.

Nyutonnıń shağılıstırıwshı teleskopınıń sxeması.

Meniskli (dóńes-oyıs) linzalarǵa iye usınday sistemalar sovet optotexnigi D.D.Maksutov tárepinen usınıldı hám júzege keltirildi. Maksutovtıń teleskoplarınıń biriniń sxeması 284-b súwrette kórsetilgen. Bul súwrette L - meniskli linza, AB - oyıs ayna. Qarap atırılǵan obektten shıqqan nurlar L linzaǵa kelip túsedı, AB aynasında shaǵılısadı hám keri baǵıtta L linzaǵa keledi. Linzanıń oyıq betiniń orta bólimi CC' alyuminiylengen hám oyıs bet bolıp tabıladı hám onnan nurlar shaǵılısadı. AB aynasınıń ortasında úlken emes tesik tesiledi hám bul tesik arqalı nurlar trubadan shıǵadı. Nurlardıń F' fokusınıń artında O okulyarı jaylasadı. Nurlardıń eki ret shaǵılısıwı teleskoptı kelte etip soǵıwǵa múmkinshilik beredi. Meniskli linza axromatlıq qásiyetlerge iye, usınıń menen birge aynanıń sferalıq aberracıyasın korrelyacıyalawǵa múmkinshilik beredi. 284-b súwrette keltirilgen sxema boyınsha soǵılǵan ásbap tuwrı súwretti beredi hám sonlıqtan onı aspan denelerin de, jerdegi obektlerdi de kóriw ushın paydalanıwǵa boladı.



284-b súwret.

Maksutov teleskopınıń sxeması.

Mikroskop. Úlken úlkeytiwlerdi alıw ushın mikroskop paydalanıladı. Onıń optikalıq sxeması 285-súwrette kórsetilgen. Bul súwrette L_1 - qısqa fokuslı obektiv, L_2 - okulyar.

Mikroskoptıń járdeminde baqlanatuǵın obekt PP' obektiv L_1 diń birinshi bas fokallıq tegisligine jaqın orında onıń arǵı tárepinde jaylastırıladı. Obektiv obektтіń ózinen s' qashıqlıqta jaylasqan keri hám úlkeytilgen $P'P'_1$ súwretin beredi. Obektivtiń sızıqlı úlkeytiwi $\beta \cong \frac{s'}{f_1}$ ge teń. Bul teńlikte f_1 - onıń birinshi fokuslıq qashıqlıǵı. Meyli, obektтіń sızıqlı ólshemleri y bolsın. Bunday jaǵdayda súwrettiń sızıqlı ólshemleri mınaǵan teń boladı:

$$y' = y \frac{s'}{f_1}. \quad (5)$$

L_2 okulyar lupa xızmetin atqaradı. Sonlıqtan, okulyar arqalı qaralatuǵın y' súwreti

$$2u = \frac{y'}{f_2}$$

múyeshi menen kórinedi. Bul teńlikte f_2 arqalı okulyardıń birinshi bas fokuslıq qashıqlıǵı belgilengen. Bul teńlikke (5)-teńlik boyınsha y' tırnıń mánisin qoyıp, mikroskop penen qaraǵanda PP' obektı kórinetuǵın múyesh ushın minaday shamanı alamız:

$$2u = y \frac{s'}{f_1 f_2}. \quad (6)$$

Tap usı obekt qurallanbaǵan kóz benen

$$2u_0 = \frac{y}{l_0}$$

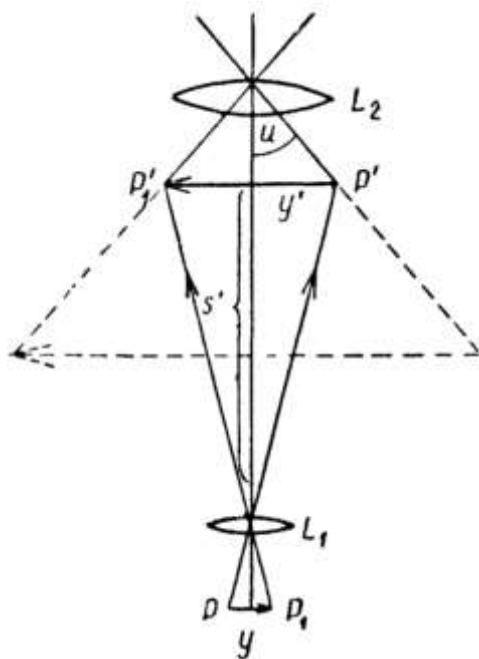
múyeshi menen kórinedi. Bul teńlikte l_0 arqalı obekt qaralatuǵın qashıqlıq belgilengen. Mikroskoptıń múyeshlik úlkeytiwi ushın minaday shamanı tabamız:

$$\gamma = \frac{2u}{2u_0} = \frac{l_0 s'}{f_1 f_2}. \quad (7)$$

Eger l_0 di eń jaqsı kóriw qashıqlıǵına teń etip alsaq hám (7)-formulaǵa kiretuǵın barlıq shamalardı santimetrlerde ólshesek, onda

$$\gamma = \frac{25s'}{f_1 f_2} \quad (7a)$$

teńligine iye bolamız.



285-súwret.

Mikroskoptıń optikasınıń sxeması.

s' qashıqlıǵı ámeliy jaqtan L_1 obektivi menen L_2 okulyardıń bas fokallıq tegisliginiń arasındaqı qashıqlıq d ǵa teń (turpayı túrde ótkerilgen bahalawlarda mikroskoptıń úlkeytiwi d nı mikroskoptıń tubusınıń uzınlıǵına teń dep esaplawǵa boladı). Mikroskoptıń úlkeytiwi 2000 ǵa jetedi.

Mikroskoptıń ajırata alıw kúshi haqqında 330-paragrafta aytıladı. Úlken ajırata alıw kúshin alıw ushın mikroskoptıń obektivi múmkin bolǵanınsha obektten shıǵatuǵın nurlardıń keń dástesin óziniń ishine alıwı kerek. Bunday jaǵdayda súwrettiń aberraciyaǵalardıń saldarınan buzılmawı ushın mikroskoptıń obektivin bir qatar linzalardan turatuǵın quramalı sistema túrinde soǵıwǵa

turı keledi (quramalı obektivlerde 10-12 linzağa shekem). Mikroskop ushın obekt sıpatında ádette eki shiysheniń (predmetlik hám ústine qoyılatuǵın) arasına jaylastırılǵan azı-kópı móldir preparatlar qollanıladı. Preparatlar ótiwshi nurlarda qaraladı hám olardı jaqtılandırıw ushın arnawlı jaqtılandıratuǵın sistemalar bolǵan kondensorlar paydalanıladı.

Ádette, mikroskoptıń obektivleri menen okulyarların ózgertiwge bolatuǵın etip soǵıladı. Bul hár qıylı úlkeytiwlerdi alıwǵa múmkinshilik beredi.

Kóz áynkeler. Kózdiń optikalıq kemshilikleri bolǵan jaqınnan kóriwshilik penen alıstan kóriwshilik kóz áynek linzalarınń járdeminde dúzitedi. Jaqınnan kórgish kóz júdá úlken optikalıq kúshke iye hám onı korrekciyalaw ushın teris optikalıq linza qollanıladı. Alistan kórgish kóz júdá kishi optikalıq kúshke iye hám onı korrekciyalaw ushın oń linzanı paydalanadı. Uzaqtan kórgish kózdi durıslaw talap etiledi dep boljayıq. Onıń eń uzaq noqatı P_d setchatkanıń arǵı tárepinde jaylasqan (286-súwret). Kózdiń ádettegidey tınısh jaǵdaylarda sheksiz qashıqlasqan predmetlerdi kóre alıwı ushın nurlardıń parallel dástesin kózdiń eń alıstaǵı P_d noqatına baǵıtlaytuǵın L kóz áynek linzasın saylap alıw kerek. Demek, kóz áynek linzasınıń ekinshi bas fokusu F' kózdiń alıstaǵı noqatı P_d ǵa sáykes keliwi kerek. Bunnan kóz áynek linzasınıń ekinshi bas fokuslıq qashıqlıǵı f' tiń mınaǵan teń bolıwınıń kerek ekenligi kelip shıǵadı:

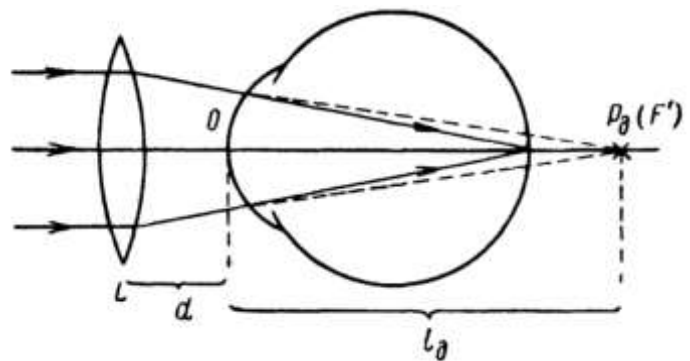
$$f' = d + l_d.$$

Bul teńlikte d arqalı L linzadan kózdiń tóbesine shekemgi qashıqlıq, l_d arqalı bul jaǵdayda da kózdiń tóbesinen kózdiń alıstaǵı noqatına shekemgi qashıqlıq belgilengen. Korrekciyalawshı kóz áynek linzasınıń optikalıq kúshi mınaǵan teń:

$$\Phi = \frac{1}{f'} = \frac{1}{d + l_d}.$$

Eger d menen l_d nı metrlerde ańǵartatuǵın bolsaq, onda kóz áynek linzasınıń optikalıq kúshi dioptriylerde alınadı.

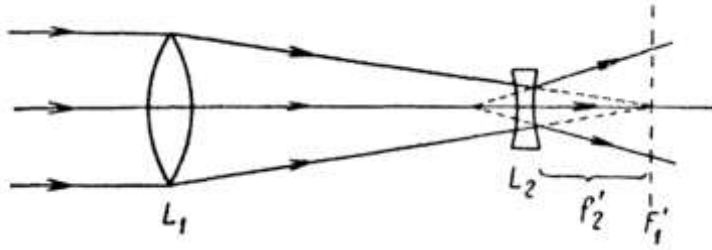
286-súwret.
Uzaqtan kórgish kózdi kóz áynek
linzasınıń járdeminde durıslaw.



Binokl hám dalnomer. Jerdiń betindegi obektlerdi bir waqıtta eki kóz benen baqlaw ushın arnalǵan kóriw trubaların jup-juptan bir biri menen baylanıstıradı. Usınday túrde olar *binokldi* payda etedi.

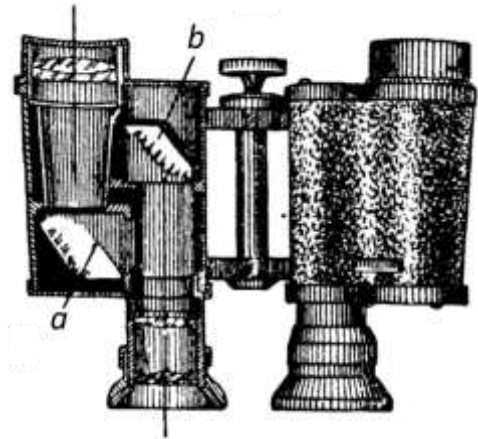
Binokllerde eki oń linzadan turatuǵın optikalıq sistemalar menen bir qatarda okulyar xızmetin teris linza atqaratuǵın kóriw trubaları paydalanıladı. Usınday tiptegi kóriw trubasın Galiley trubası dep ataydı. L_2 teris linza L_1 obektiv penen onıń bas fokallıq tegisligi F'_1 tiń arasında usı F'_1 tegisliginen onıń menshikli fokuslıq qashıqlıǵı f'_2 ge teń qashıqlıqta jaylasqan (287-súwret). Solay etip, obektiv penen okulyardıń fokusları bir noqatta jaylasqan hám Galiley trubasındaǵı eki linza teleskoplıq sistemanı payda etedi. Okulyar qaralatuǵın obektin tuwrı jormal súwretin beredi. Galiley trubasınıń múyeshlik úlkeytiwi f'_1/f_2 ge teń.

Úlken emes úlkeytiwge iye binokllerdi Galileydiń eki trubasınan soǵadı. Úlken úlkeytiwge iye binokllerdi ("dalada paydalanılatuǵın") oń okulyarlardıǵa iye eki trubadan soǵadı. Dalada paydalanılatuǵın binokldiń sxeması 288-súwrette keltirilgen. Tolıq ishki shaǵılıswǵa iye bolǵan eki a hám b prizmaları nurdı qaytaratuǵın sistema bolıp tabıladı. Usınıń menen bir waqıtta bul prizmalar trubalardıń uzınlıǵın keltertiwge hám obektivlerdiń oraylarınń arasındaǵı qashıqlıqtı kózdiń qarashıqlarınıń arasındaǵı qashıqlıqtan úlkeytiwge múmkinshilik beredi. Obektivlerdiń arasındaǵı úlken qashıqlıq stereografiyalıq effektin úlkeyiwine alıp keledi.



287-súwret.
Galilei trubası.

Úlken stereografiyalıq effektke iye trubalardı baqlanatuǵın obektke shekemgi qashıqlıqtı ólshew ushın paydalanıwǵa boladı. Usınday túrde olardı dalnometrler dep ataydı.



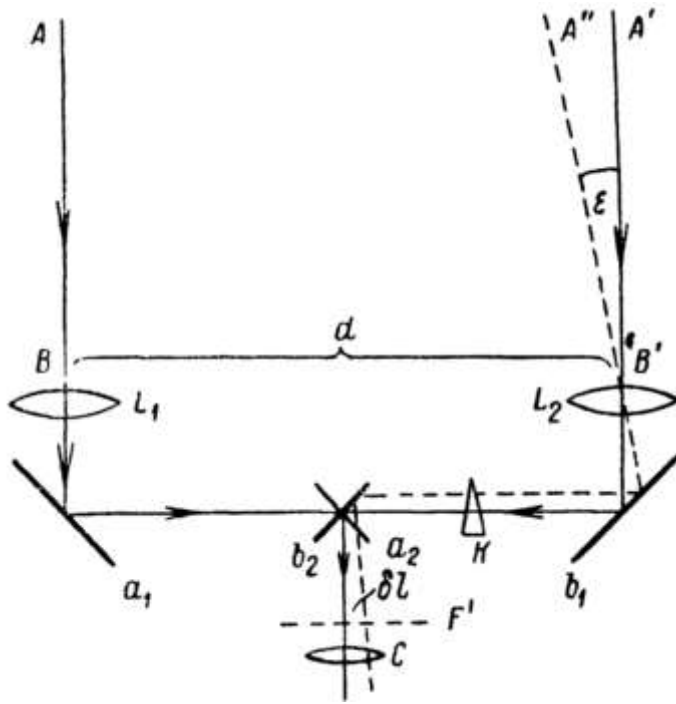
288-súwret.
Dalada paydalanılatuǵın binokl.

Monokulyarlıq dalnomerdiń dúzilisinń sxeması 289-súwrette keltirilgen. Eki L_1 hám L_2 obektivleri bir birinen úlken d qashıqlıǵına uzaqlastırılǵan (bir neshe metrge). d shaması dalnomerdiń bazası dep ataladı. a_1 , a_2 hám b_1 , b_2 aynalarınń járdeminde obektlerden shıqqan nurlar C okulyarına túsiriledi hám usı C okulyarı arqalı L_1 hám L_2 obektivleri bergeni eki súwret qaraladı. Eger obekt shekli qashıqlıqta jaylasqan bolsa, onda nurlardıń arasında ε múyeshine teń parallaks orın aladı hám súwretler bir birine salıstırǵanda jılsqan boladı. Ápiwayılıq ushın obektte shep obektivtiń kósherinde jaylasqan dep boljaymız. Bunday jaǵdayda oń obektivke obektten $A'B'$ nurı menen ε múyesh jasaytuǵın $A''B'$ nurı kelip túsedi. Fokallıq tegislikte birinshi obektiv beretuǵın súwret $\delta l = \varepsilon f'$ shamasına jılsqan boladı (f' arqalı obektivtiń ekinshi bas fokuslıq qashıqlıǵı belgilengen). Ekinshi tárepten, ε múyeshi baqlanatuǵın obektke shekemgi qashıqlıq l menen $\varepsilon = d/l$ qatnası boyınsha baylanısqan.

Joqarıda keltirilgen qatnaslardan mınanı alamız:

$$l = \frac{d \cdot f'}{\delta l}.$$

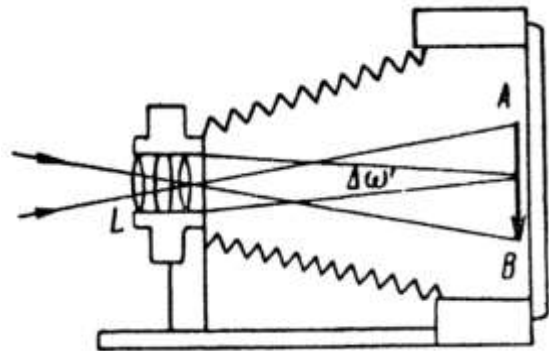
$d \cdot f'$ shaması berilgen dalnomer ushın turaqlı shama; solay etip, baqlanatuǵın obektke shekemgi qashıqlıq l di eki súwrettiń awısıwı δl di ólshew jolı menen anıqlawǵa boladı eken. Ádette δl shaması eki súwretti bir biriniń ústine túsiriw jolı menen ólshenedi. Onıń ushın dalnomerdiń shaqalarınń birine K sinası kirgiziledi. δl awısıwınıń shaması qansha úlken bolsa sinanı úlken múyeshke buriwǵa tuwrı keledi. Demek, sinanıń qıyalıq múyeshi boyınsha δl diń mánisin anıqlawǵa hám usınday jollar menen obektke shekemgi qashıqlıq l di anıqlawǵa boladı.



289-súwret.
Monokulyarlıq dálnometrдің dúzilisinín
sxeması.

§ 329. Proekciyalaytuǵın hám jaqtılandıratuǵın ásbaplar. *Fotografiyalıq apparat* (fotoapparat) eń ápiwayı proekciyalawshı ásbap bolıp tabıladı. Onıń L obektivi (290-súwret) fotosúwreti túsiriletuǵın predmettiń haqıyqıy súwretin AB tegisliginde payda etedi. Bul jerde bolsa jaqtılıqtı sezetuǵın plastinka yamasa planka jaylasadı. Ádette, fotografiyalıq obektiv xromatizmi, sferalıq aberraciyası hám basqa da kemshilikleri dúzetilgen quramalı sistema (tórt yamasa onnan da kóp sanlı linzaldan turatuǵın) bolıp tabıladı. Fotoplastinkadaǵı súwrettiń keskinligi (anıqlıǵı) obektivti yamasa onıń basqa da bólimlerin jılastırıw arqalı júzege keltiriledi.

290-súwret.
Fotografiyalıq apparattıń optikasınıń sxeması.



Ádette obektiv sańlaǵınıń ólshemleri ózgermeli bolǵan diafragma menen támiyinlenedi (irislik diafragma). Bunday diafragma fokustıń "tereńligin" jaqsılawǵa, yaǵnıy obektivten hár qıylı qashılıqlarda jaylasqan predmetlerdi jetkilikli dárejedegi anıqlıqta fokuslawǵa hám sonıń menen bir waqıtta fotoapparatqa kelip túsetuǵın jaqtılıq aǵısınıń shamasın regulirovkalıwǵa múmkinshilik beredi.

Joqarıda kórsetkenimizdey (306-paragraf), plastinkanıń jaqtılıqtı sezgish qatlamındaǵı fotoximiyalıq processtiń intensivligi plastinkanıń tegisligindegi jaqtılandırıwǵa proporcional.

324-paragraftaǵı (8)-formula boyınsha bul jaqtılandırılǵanlıq A' mınaǵan teń:

$$A' = kB\Delta\omega'. \quad (1)$$

Bul teńlikte B obektıń jarıqlıǵı, k - obektiv arqalı ótkende jaqtılıqtıń joǵalıwın anıqlaytuǵın shama, $\Delta\omega'$ - súwret turǵan orınnan obektiv kórinetuǵın denelik múyesh. Eger súwreti

túsiriletuǵın predmet jetkilikli dárejede alısta jaylasqan bolsa, onda súwret obektivtiń ekinshi bas fokuslıq qashıqlıǵı bolǵan f' shamasına jaqın orında payda boladı. Bunday jaǵdayda $\Delta\omega'$ múyeshi ushın juwıq túrde mınaday ańlatpanı alamız:

$$\Delta\omega' = \frac{\pi d^2}{4f'^2}.$$

Bul ańlatpada d arqalı obektivtiń diametri belgilengen (diafragma maksimal ashıq bolǵan jaǵdayda). Bul ańlatpanı (1)-ańlatpaǵa qoyıp,

$$A' = \frac{k\pi}{4} \left(\frac{d}{f'} \right)^2 B \quad (2)$$

formulasın alamız. (2)-formuladan fotoplastinkadaǵı jaqtılandırılǵanlıqtıń obektivtiń diametriniń onıń fokuslıq qashıqlıǵına qatnasınıń kvadratına proporcional ekenligi kórinip tur. $\frac{d}{f'}$ shamasın *obektivtiń jaqtılıq kúshi* yamasa onıń *salıstırmalı sańlaǵı* dep ataydı. (2)-formuladan fotoplastinkadaǵı jaqtılandırılǵanlıqtıń obektivtiń diametriniń onıń fokuslıq qashıqlıǵına qatnasınıń kvadratına proporcional ekenligi kórinip tur. Bul d/f' qatnasın *obektivtiń jaqtılıq kúshi* yamasa onıń *salıstırmalı tesigi* dep ataydı. Házirgi zaman fotoapparatlarınń kópshiliginiń jaqtılıq kúshi $1:4,5 \sim 1:2,5$ shamasına teń³⁰. Salıstırmalı tesigi birden úlken bolǵan (mısalı, $1:0,9$) obektivlerdi soǵıwǵa boladı. Biraq olardıń joqarı sapaǵa iye súwretlerdi beriwi ushın olardı kóp linzalı etip islewge tuwrı keledi. Bul jaqtılıqtıń shaǵılısıwǵa baylanıslı joǵaltıwına, yaǵnıy k koefficientiniń kishireyiwine alıp keledi. Nátiyjede úlken salıstırmalı tesikke iye obektivtiń kishi salıstırmalı tesikke iye obektivke salıstırǵanda kishi jaqtılandırılǵanlıqtı beredi. Biraq konstrukciyası boyınsha ápiwayı boladı.

Qatań túrde aytqanda, (1)-formuladaǵı $\Delta\omega'$ múyeshi haqqında gáp etkende fotoplastinka turǵan orınnan shıǵıw qarashıǵı kórinetuǵın denelik múyeshti názerde tutıw kerek (325-paragraf). Fotoobektivlerdiń háreket etetuǵın diafragması obektivtiń linzalarınń arasında jaylasqan irislik diafragma bolıp tabıladı. Diafragmanı maksimal túrde ashqanda onıń súwreti kórinetuǵın $\Delta\omega'$ múyeshi obektivtiń artqı linzası kórinetuǵın múyeshke jaqın. Sonlıqtan jaqındasıwdıń maksimallıq dárejesinde diafragmanı maksimal túrde ashqanda jaqtılandırıw $\left(\frac{d}{f'} \right)^2$ qatnası menen anıqlanadı. Bul qatnasta d arqalı tiykarǵı tekste ayılǵanday obektivtiń diametri belgilengen. Diafragmanıń sańlaǵı (tesigi) kishireygende A' jaqtılandırılǵanlıq kemeyedi.

Kelesi ásbap sıpatında ekranda móldir súwretlerdiń (diapozitivlerdiń) úlkeytilgen súwretin alıw ushın xızmet etetuǵın proekciyalıq fonardı qaraymız. 191-súwrette proekciyalıq fonardıń optikalıq sxeması berilgen: S - jaqtılıqtıń deregi, M_1N_1 menen M_2N_2 - eki tegis-dóńes linzadan turatuǵın jaqtılandırıwshı sistema (kondensor), PP_1 - diapozitiv, L - proekciyalaytuǵın obektiv. Kondensordıń xızmeti - diapozitivtiń jaqtılandırılǵanlıǵın (soǵan sáykes jarıqlıq B nı) úlkeytiw.

Proekciyalawshı obektiv ekranda PP_1 diapozitiviniń úlkeytilgen haqıyqıy hám kerı súwretin beredi. Ekrandaǵı jaqtılandırılǵanlıq A' nıń 324-paragraftaǵı (7)-formulanıń járdeminde anıqlanıwı múmkin:

$$A' = kB \frac{\Delta\omega}{\beta^2}.$$

Bul formulada β - sıızqlı úlkeytiw hám $\Delta\omega$ arqalı PP_1 diapozitivi turǵan orınnan proekciyalawshı L obektiv kórinetuǵın denelik múyesh belgilengen. Ádette proekciyalawshı

³⁰ Bul gáplerdiń 1960-jıllardaǵı fotoplenkalı fotoapparatlar ushın durıs ekenligin eskertip ótemiz (Awdarıwshılar).

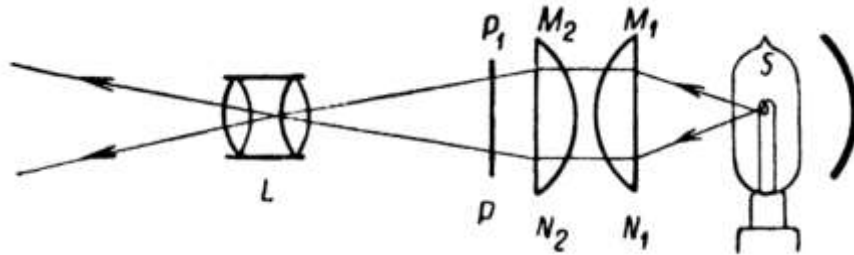
fonar úlken úlkeytiwdi beretuǵın bolǵanlıqtan PP_1 diapozitivi L obektiviniń birinshi fokallıq tegisliginde jaylasadı. Sonlıqtan $\Delta\omega$ múyeshi ushın juwıq túrde

$$\Delta\omega = \frac{\pi d^2}{4f^2}$$

formulasına iye bolamız. Bul formulada d - obektivtiń diametri hám f - onıń birinshi bas fokuslıq qashıqlıǵı. $\Delta\omega$ nıń bul mánisin (3)-ańlatpaǵa qoyıp

$$A' = \frac{\pi k}{4} \cdot \left(\frac{d}{f}\right)^2 \frac{1}{\beta^2} \cdot B \quad (4)$$

ańlatpasın tabamız.



291-súwret. Proekciyalıq fonardıń optikasınıń sxeması.

(4)-formuladan ekrandaǵı jaqtılandırılǵanlıqtıń jáne obektivtiń jaqtılıq kúshi menen anıqlanatuǵınlıǵı kórinip tur (salıstırmalı tesik d/f boyınsha), usınıń menen birge ol sıızqlı úlkeytiw β nıń kvadratına keri proporcional. Eger ekranda qanshama úlken súwretti alıw kerek bolsa, obektıń jarıqlıǵı B nıń da sonshama úlken, yaǵnıy proekciyalıq fonardı sonshama intensivli S deregi menen támiyinlew kerek.

Kórsetilgen sxema boyınsha kinonıń proekciyalawshı sisteması da qurıladı. Bunday jaǵdayda úlken úlkeytiwler paydalanılatuǵın bolǵanlıqtan, proekciyalawshı kinoapparatura jaqtılıqtıń quwatlı derekleri menen, kópshilik jaǵdaylarda elektr doǵaları menen támiyinleydi.

Házirgi waqıtları auditoriyalarda móldir emes predmetlerdiń, misalı kitaptaǵı súwretlerdiń proekciyası (epiproekciya) jiyi paydalanıladı. Bul jaǵdayda ekrannıń zárúrli bolǵan jaqtılandırılǵanlıǵına jetiw ushın proekciyalanatuǵın obekt jaylasqan orındaǵı jarıqlıq B nıń shaması jetkilikli dárejede úlken bolıwı kerek. Bul elektr doǵasınıń yamasa bir neshe qızdırıw lampalarınıń járdeminde ámelge asırıladı. Sonıń menen birge, epiproekciya ushın úlken jaqtılıq kúshine iye L obektivi alınadı.

Optikalıq sistemalar sheklerinde jaqtılıq aǵısları tarqalatuǵın denelik múyeshlerdi ózgertiw menen birge jaqtılandırılǵanlıqtı da ózgerte aladı. Usınday maqsetlerde soǵılǵan qashıqlatılǵan obektlerdi jaqtılandırıwshı sistemalardıń, solardıń ishinde projektorlardıń jumısları tiykarlangan. Projektor jaqtılıq kúshi I bolǵan S jaqtılıq dereginen hám L linzadan turadı (292-súwret).

Meyli, L linza derek turǵan orınnan ω denelik múyeshi menen kórinetuǵın bolsın, bunday jaǵdayda derekten linzaǵa $I\omega$ shamasına teń aǵıs kelip túsedı hám linza arqalı

$$F' = kI\omega \quad (5)$$

aǵısı ótedi. Bul teńlikte k - linza arqalı ótkende jaqtılıqtıń joǵalıwın kórsetetuǵın shama. Eger S deregi L linza menen onıń birinshi bas fokusınıń arasında jaylasqan bolsa, onda onıń jormal S' súwreti alınadı. Linzadan shıqqan jaqtılıqtıń dástesi ω' denelik múyeshiniń sheklerinde toplanǵan, tap usınday múyesh penen linza S' súwreti turǵan orınnan kórinedi. Bul dásteniń jaqtılıq kúshi

$$I' = \frac{F'}{\omega'}$$

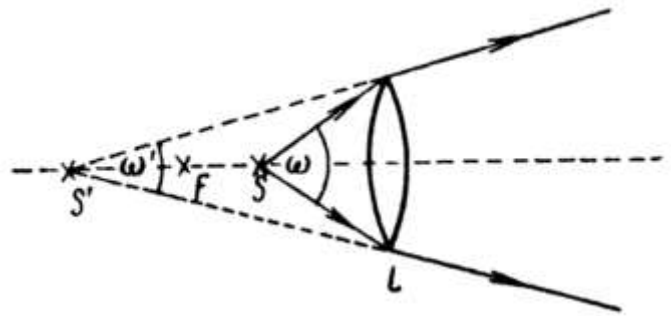
shamasına teń. Bul teńlikke F' tıń ornına onıń (5)-ańlatpadaǵı mánisin alıp kelip qoysaq, onda

$$I' = kI \frac{\omega}{\omega'} \quad (6)$$

ańlatpasına iye bolamız.

Bir linzadagi jaqtılıqtıń joǵalıwı kishi bolǵanlıqtan, k nıń mánisi 1 ge jaqın hám (6)-formuladan mınaday jaǵdaydıń orın alatuǵınlıǵı kelip shıǵadı: dástedegi jaqtılıqtıń kúshi derektiń óziniń jaqtılıq kúshine salıstırǵanda ω/ω' qatnasına proporcional ósedi. ω/ω' shamasın júdá úlken etiwge hám sonıń nátiyjesinde linzanıń járdeminde dástedegi jaqtılıqtıń kúshin júdá úlken shamaǵa úlkeytiwge boladı.

292-súwret.
Linzanıń járdeminde jaqtılıqtıń kúshi I di
úlkeytiw.



Jaqtılıqtıń S noqatlıq deregin bas fokallıq tegislikte jaylastırıp, bizler onıń sheksizliktegi S' súwretin alamız. Usınıń nátiyjesinde denelik múyeshtiń shaması nolge teń bolıwı kerek. Usıǵan sáykes, linzadan shıǵatuǵın dástedegi jaqtılıqtıń kúshiniń sheksiz úlken bolıwı kerek. Haqıyqatında, qálegen derek noqatlıq emes, al qanday da bir uzınlıqqa iye boladı (sonıń menen birge difrakciyanıń saldarınan qatań parallel dásteni alıwǵa bolmaydı). Sonlıqtan ω' múyeshiniń shaması barlıq waqıtta nolden ózgeshe boladı hám, nátiyjede, sheksiz úlken jaqtılıq kúshine iye jaqtılıq alınbaydı.

Házirgi zaman projektorlarında linzalardıń ornına oyıs aynalar paydalanıladı, Biraq olardıń jumıs islewiniń principi joqarıda tallanǵan principke sáykes keledi.

Mınaday dara jaǵdaydı qaraymız: jaqtılıq kúshi $I = 1000$ sh bolǵan jaqtılıqtıń S deregi oyıs AB aynasınıń aldında derek turǵan orında ayna $\omega = \pi$ denelik múyeshinde kórinetuǵın orında jaylasqan bolsın (293-súwret). Meyli, aynada shaǵılısqan nurlardıń dástesi tóbesindegi múyeshtiń shaması $\alpha = 6^\circ$ qa teń konustıń ishinde tarqalatuǵın bolsın. Aynanıń shaǵılıstırıw koefficienti k nıń shaması 0,8 ge teń dep esaplap, dástedegi jaqtılıqtıń kúshi I' tı anıqlaymız. (6)-formula boyınsha jaqtılıqtıń kúshi I' tı anıqlaw ushın ω' denelik múyeshiniń shamasın tabıw kerek. Usı múyesh ushın mınaǵan iye bolamız (303-paragrafqa qarańız):

$$\omega' = 4\pi \sin^2 \frac{\alpha}{4} \cong \pi \frac{\alpha^2}{4}.$$

Bul teńlikte α múyeshin radianlarda ańǵartıw kerek. ω' tıń bul mánisin (6)-teńlikke qoyıp, tómendegini alamız:

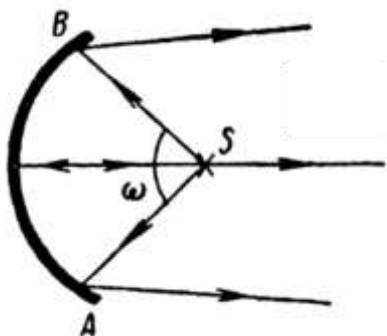
$$I' = kI \frac{4\omega}{\pi\alpha^2}.$$

Alınǵan teńlikke $\omega = \pi$, $\alpha = 6^\circ \cong 0,1$ rad hám $k = 0,8$ mánislerin qoyıp

$$I' = 0,8I \frac{4}{0,1^2} = 320I$$

teńligine iye bolamız.

Demek, oyıs aynanı paydalanıwdıń sebebinen dástedegi jaqtılıqtıń kúshi 320 ese úlkeyedi eken; $I = 1000$ sh bolǵan jaǵdayda $I' = 320\,000$ sh shamasın alamız.



293-súwret.
Aynalıq projektordıń sxeması.

Házirgi zaman projektorlarında tarqalıw múyeshi shama menen 2^o bolğan jaqtılıq kúshi millionlağan shamğa iye dástelerdi aladı.

§ 330. Optikalıq ásbaplardıń ajırata alıw kúshi. Usı waqıtlarğa sistema noqatlıq obekttiń dál noqatlıq súwretin beredi hám sferalıq aberraciya, astigmatizm hám t.b. kemshilikler principinde saplastırıladı dep esapladı. Biraq 328-paragrafta teleskop bolğan jaǵdayda juldızlardıń obektivtiń fokallıq tegisliginde difrakciyalıq súwrette beretuǵınlıǵın kórsetiwge tuwrı keldi. Haqıyqatında, difrakciya qubılısı qálegen optikalıq sistemada orın aladı hám obekttiń hár bir noqatı fokallıq tegislikte difrakciyalıq dóńgelek penen súwretlenedi. Bul jaǵday súwrette ajıralıwı múmkin bolğan detallardıń sanın shekleydi hám úlkeytiwler ushın ámeliy mánistiń sheklerin beredi.

Teleskopta difrakciya eń ápiwayı xarakterge iye, sonlıqtan eń dáslep usı ásbapqa dıqqat awdaramız. Joqarıda kórsetip ótkenimizdey, teleskoptıń járdeminde juldızlardı baqlaǵanda obektivke nurlardıń parallel dástesi túsedı hám obektivtiń fokallıq tegisliginde 269-paragrafta qarap ótilgen hám 88-súwrette kórsetilgen difrakciyalıq súwret payda boladı. Barlıq jaqtılıq aǵısınıń shama menen 84 procenti usı difrakciyalıq súwrettiń oraylıq daǵına, al shama menen 16 procenti onı qorshaytuǵın saqıynalarǵa sáykes keledi. Sonlıqtan bunnan bılay saqıynalarǵa itibar bermesek te boladı. Bir birine júdá jaqın bolğan juldızlardı baqlaǵanda olardıń beretuǵın difrakciyalıq súwretlerdiń ayırım bólimleri bir biriniń ústine túsedı hám bir azı-kem sozılǵan hám jaqtılıǵı bir tekli bolmaǵan jaqtılı daq payda boladı. Usı jaǵdayǵa baylanıslı mınaday sorawdıń payda bolıwı múmkin: qanday jaǵdaylarda bul daqtı eki juldızdıń súwreti hám qanday jaǵdayda bul daqtıń bir juldızdıń súwreti emes, al eki juldızdıń súwreti dep tastıyıqlawǵa boladı?

271-paragraftaǵı eki spektrallıq sızıqlardı ajratıwdaǵıday sıyaqlı, bul jaǵdayda da Reley kriteriyine súyenemiz. Atap aytqanda, *eger intensivliktiń qosındı iymekligindegi oyislıq minimumda 20 procentke jetetuǵın hám kóz tárepinen eki maksimumnıń arasındaǵı qarańǵı aralıq barday bolıp kórinetuǵın bolsa* eki difrakciyalıq súwret ajralǵan dep esaplanadı.

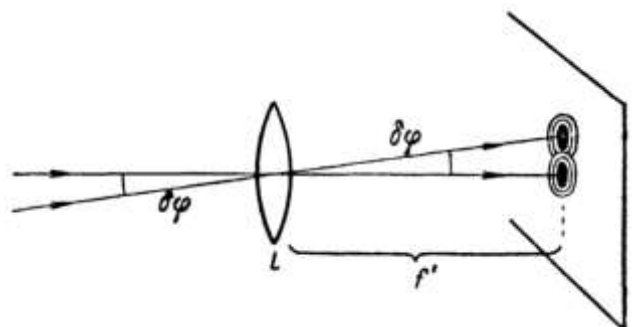
Dóńgelek sańlaqlardaǵı bir biriniń ústine túsetuǵın difrakciyalıq súwretlerdegi *bir iymekliktiń maksimumı ekinshi iymekliktiń minimumına sáykes keletuǵın bolsa oyislıqtıń shaması 20 % ke jetedi*. Dóńgelek sańlaqtan alınǵan difrakciyalıq súwrettegi bas maksimum menen onıń birinshi saqıynasınıń arasındaǵı qashıqlıq (269-paragraf) $\delta\varphi = 1,22 \frac{\lambda}{D}$ ǵa teń. Bul teńlikte λ - tolqın uzınlıǵı hám D - sańlaqtıń diametri. Bul jaǵdayda sańlaq obektivtiń qasnaǵı bolıp tabıladı hám sonlıqtan D shaması teleskoptıń diametrine sáykes keledi. Difrakciyalıq súwretlerdiń sheklerindegi múyeshlik qashıqlıqlar L obektivtiń ortasınan difrakciyalıq súwretlerdiń sáykes noqatlarına túsirilgen tuwrılardıń arasındaǵı múyesh penen anıqlanadı (294-súwret). Bunnan eger juldızlardıń arasındaǵı múyeshlik qashıqlıq

$$\delta\varphi = 1,22 \frac{\lambda}{D} \quad (1)$$

shamasına teń bolatuǵın bolsa, onda eki juldızdı ajratıw ushın Reley kriteriyiniń orınlanatuǵınlıǵın alamız.

294-súwret.

Bir birinen zorǵa ajralatuǵın noqatlardıń arasındaǵı múyeshlik qashıqlıq $\delta\varphi$.



(1)-teńlikten *teleskoptıń obektiviniń diametriniń qansha úlken bolsa, onda onıń bir birine jaqın jaylasqan juldızlarǵı ayıra alatuǵınlıǵı kórinip tur.*

Teleskoptıń okulyarınıń úlkeytiwin obektiv tárepinen ajratılǵan difrakciyalıq daqlardıń kóz tárepinen de ajratılǵan bolıwı, yaǵnıy 1' múyesh penen kórinıwi kerek. Juldızlardıń fotosúwretin túsirgende olardıń difrakciyalıq súwretleriniń oraylarınıń arasındaqı qashıqlıq bolǵan $\delta y'$ shaması fotoplastinkalardıǵı dánlerdiń ólshemlerinen úlken bolıwı kerek. Bul shama menen 0,01 mm shamasındaqı qashıqlıqqa sáykes keledi. Eger teleskoptıń obektiviniń ekinshi bas fokuslıq qashıqlıǵı f' bolsa, onda bir birinen zorǵa ajıralatuǵın eki juldızdıń arasındaqı sıızıqlıq qashıqlıq $\delta y'$ mınaǵan teń:

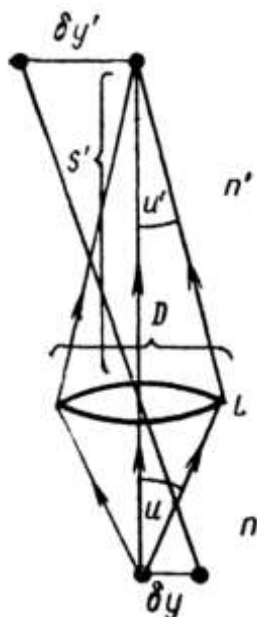
$$\delta y' = f' \cdot \delta \varphi = 1,22 \frac{\lambda}{D} f'. \quad (2)$$

Mikrofotometrlewdiń házirgi zaman usıllarında jaqtılandırılıwdaqı salıstırmalı minimumdı 10% ke hám hátte 5% ke teń etip alıw, usınıń saldarınan Reley kriteriyin qanaatlardınatuǵın juldızlarǵa salıstırǵanda jaqınaraq jaylasqan juldızlarǵı ajratıwǵa múmkinshilik beredi.

Teleskoplar ushın keltirip shıǵarılǵan (1)- hám (2)-shártler alıstaǵı predmetlerge qaraǵanda jerdegi kóriw trubaları, sonıń menen fotoapparatlar, úlken qashıqlıqlardaqı predmetlerdiń fotosúwretin túsiriw ushın da qollanıwǵa boladı. Eger predmet obektivten jaqın jaylasatuǵın bolsa, onda oǵan nurlardıń parallel dástesi túsedi dep esaplawǵa bolmaydı; bunday jaǵdayda súwret payda bolǵandaǵı difrakciyanıń tutqan ornı quramalıraq boladı. Tap usınday bolǵan baqlanatuǵın predmettiń obektivke jaqın jaylasatuǵın jaǵdayı mikroskopta orın aladı. Sonlıqtan, mikroskoptaqı difrakciyanıń ornın dál esapqa alıw quramalı másele bolıp tabıladı. Usınday máseleni sheshiwge biz tómenirekte itibar beremiz (331-paragraf). Al házir obekttiń hár bir noqatı ǵárezsiz jaqtılıq deregi bolıp tabıladı hám bul noqat nurlardıń parallel dástesiniń difrakciyası sıyaqlı obekttiń fokallıq tegisliginde difrakciyalıq dóńgelekti beredi degen boljawdan mikroskoptıń ajırata alıw uqıplıǵın esaplaymız. Bunday jaǵdayda biz obekttiń eki qońsıl noqatları ajırılǵan dep esaplaymız, eger olardıń súwretleriniń orayları bir birinen (2)-formula menen anıqlanǵan $\delta y'$ qashıqlıǵında jaylasadı dep esaplawımız kerek. Al bunday jaǵdayda (2)-formuladaǵı f' tiń ornına obektivten súwret turǵan orınǵa shekemgi qashıqlıq s' tı qoyıw kerek (295-súwret):

$$\delta y' = 1,22 \frac{\lambda}{D} s'. \quad (3)$$

δy arqalı obekttiń zorǵa ajıralatuǵın noqatlarınıń arasındaqı qashıqlıqtı belgileymiz.



295-súwret.

Mikroskoptıń ajırata alıw kúshin esaplawǵa.

Mikroskoplardıń obektivlerin olardıń túyinles noqatlarına qatnasta sinuslar shárti orınlanatuǵınday etip soǵadı (322-paragraf); sonlıqtan biz mınaǵan iye bolamız:

$$n \sin u \cdot \delta y = n' \sin u' \cdot \delta y'. \quad (4)$$

Bul teńlikte n hám n' arqalı obektivtiń sáykes aldındaǵı hám onnan keyingi zatlardıń sındırıw koefficientleri belgilengen.

Mikroskoplardaǵı súwret barlıq waqıtta hawada alınadı, sonlıqtan $n' \cong 1$; obekt bolsa hawadan ózgeshe bolǵan zatta jaylasa aladı (tómende immersiya haqqında qarańız). Sonlıqtan ulıwmalıq ushın biz n di 1 ge teń dep esaplamaymız. Usınıń menen birge, 295-súwretten biz mınaǵan iye bolamız:

$$\sin u' \cong \frac{D/2}{s'}.$$

n' penen $\sin u'$ tiń mánislerin (4)-ańlatpaǵa qoyıp, $\delta y'$ ushın

$$\delta y' = \frac{2s'}{D} \cdot n \sin u \cdot \delta y.$$

$\delta y'$ ushın jazılǵan bul ańlatpanı (3)-ańlatpa menen salıstırıp,

$$\frac{2s'}{D} \cdot n \sin u \cdot \delta y = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{D} s'$$

teńligin alamız hám bunnan bir birinen zorǵa ajıralatuǵın obektler ushın

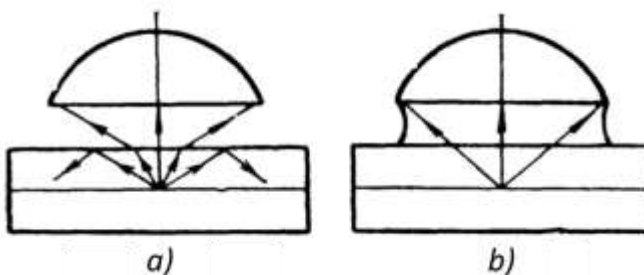
$$\delta y = 0,61 \frac{\lambda}{n \sin u} \quad (5)$$

ańlatpasına iye bolamız.

$A = n \sin u$ shaması mikroskoptıń obektiviniń sanlı aperturası dep ataladı. Eger obekt hawada jaylasqan bolsa, onda $n = 1$ hám bunday jaǵdayda (5)-formuladan mikroskoptıń bir birinen $\delta y = 0,61 \frac{\lambda}{\sin u}$ qashıqlıqta jaylasqan obektlerdi ajırata alatuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Mikroskopiya obektler ushın u múyeshiniń shaması $\pi/2$ ge jaqın hám, usıǵan sáykes, $\sin u \cong 1$. Bunnan mikroskoptıń bir birinen $\lambda/2$ qashıqlıqta jaylasqan obektlerdi ajırata alatuǵınlıǵın ańǵaramız. Vizualıq baqlawlarda tolqın uzınlıǵı λ spektrdiń kózge kórinetuǵın oblastına kiredi, yaǵnıy $5 \cdot 10^{-5} \text{ sm}$ ge teń. Demek, mikroskop bir birinen shama menen $3 \cdot 10^{-5} \text{ sm}$ qashıqlıqta jaylasqan obektlerdi bir birinen ajırata aladı.

(5)-formuladan eger obektti sındırıw koefficienti $n > 1$ bolǵan zatqa salsaq, onda mikroskoptıń ajırata alıw kúshiniń úlkeyetuǵınlıǵı kórinip tur. Bul mınaday jollar menen ámelge asırıladı: ádette júdá juqa bolǵan mikroskopiya preparat eki tegis shiysheniń (predmetlik hám ústine basatuǵın) ortasında jelimlenedi. Jelimleytuǵın zattı onıń sındırıw koefficienti shiyshelerdiń sındırıw koefficientine teńdey etip aladı (ádette $n = 1,5$). Bunday jaǵdayda ústine basatuǵın shiyshemenen hawanıń arasındaǵı tolıq ishki shaǵılısıw (296-a súwret) aperturalıq múyesh u diń mánisin shekemewi ushın ústine basatuǵın shiyshemenen obektivtiń birinshi linzasınıń arasına sındırıw koefficienti n ge teń bolǵan móldir maydı kirgizedi. Bunday jaǵdayda, 296-b súwrette kórinip turǵanıday, múyeshiń mánisi $\pi/2$ ge jaqınlaydı. Bunday sistemanı *immersiya* dep ataydı. $n = 1,5$ teńligi orınlanatuǵın immersiya jolı menen mikroskoptıń sanlıq aperturasınıń mánisin 1,4 ke jetkeriwge boladı. Bunday jaǵdayda ajırata alıw kúshiniń shaması qaralatuǵın preparat penen obektivtiń arasına hawa qatlamı bolǵan jaǵdayǵa salıstırǵanda shama menen 1,5 ese joqarılaydı.

296-súwret.
Immersiyanıń tutqan ornı.



Mikroskoptıń obektivi ajratqan detallardıń kóz benen qabıl etiliwi ushın okulyardıń úlkeytiwin olardıń shama menen 1' múyesh penen kórinetuǵınday etip saylap alıw kerek. Úlken úlkeytiwge iye bolǵan okulyar detallardıń úlken sanın kóriwge múmkinshilik bermeydi.

Mikroskopta obektlerdiń fotosúwretin túsirgende tolqın uzınlıǵı kózge kórinetuǵın jaqtılıqtıń tolqın uzınlıǵına salıstırǵanda kishi bolǵan ultrafiolet nurlarǵa ótiw jolı menen ajırata alıw kúshin úlkeytiwge boladı.

Usınday ultrafiolet mikroskop ($\lambda \cong 2,5 \cdot 10^{-5}$ sm bolǵan jaǵdayda) ádettegi mikroskopqa salıstırǵanda eki ese maydaraq bolǵan detallardı ajratıwǵa múmkinshilik beredi.

§ 331. Mikroskoptaǵı difrakciyalıq qubılısı. 330-paragrafta mikroskoptıń ajırata alıw kúshin qaraǵanımda biz obektin hár bir noqatın bir birinen ǵárezsiz bolǵan óz betinshe jaqtılıq shıǵaratuǵın derek bolıp tabıladı dep esapladıq. Bunday jaǵdayda hár qıylı noqatlardan keletuǵın terbelisler kogerentli emes. Obektin hár bir noqatı obektivtiń fokallıq tegisliginde óziniń difrakciyalıq dóńgelegin beredi. Difrakciyalıq dóńgelekler bir biriniń ústine jarım-jartı túsetuǵın orınlarda nurlar bir biri menen interferenciyalanbaydı hám jaqtılandırılǵanlıqlar ápiwayı túrde qosıladı. Bul jaǵday bizge qońsılás eki difrakciyalıq dáńgelekleriń jaqtılandırılǵanlıqlarınıń qosındı iymekligin qaraw jolı menen mikroskoptıń ajırata alıw kúshin anıqlawǵa múmkinshilik berdi. Biraq mikroskop arqalı kóritetuǵın obektler kópshilik jaǵdayda ózinen jaqtılıq shıǵaratuǵın obektler bolıp tabılmaıdı. Olar basqa jaqtılıq derekleri tárepinen jaqtılandırıladı hám olardıń ayırım noqatlarınan shıqqan terbelisler qanday da shamada kogerentli boladı. Eger obektin hár qıylı orınları kogerent nurlardıń parallel nurları menen, yaǵnıy fokallıq tegisliginde jaqtılıqtıń noqatlıq dereǵı jaylasatuǵın linzaniń járdeminde alınatuǵın jaqtılıq penen jaqtılandırılatuǵın bolsa, onda obektin hár qıylı noqatlarınan shıǵatuǵın terbelisler tolıq kogerentli boladı.

Ádette jaqtılandırıw kondensordıń járdeminde obektke shekli ólshemlerge iye jaqtılıqtıń dereǵiniń súwretin túsiriw jolı menen ámelge asırıladı. Bul jaǵdayda obektin hár qıylı noqatlarınan shıǵatuǵın nurlardı kogerentli bolmaıdı dep kútiwge boladı, sebebi obektin hár qıylı noqatları derektiń hár qıylı orınlarınan shıqqan jaqtılıq penen jaqtılandırıladı. Biraq bul juwmaq obektin bir birine júdá jaqın jaylaspaǵan noqatları ushın ǵana durıs. Obektin bir birine jaqın noqatları jaqtılıq dereǵiniń bir noqatınan shıǵatuǵın nurlar menen jaqtılandırılǵan bolıwı múmkin, sebebi óz aldına sistema bolǵan kondensordıń ózi shekli ajratıw kúshine iye (sonıń menen birge aberraciyaǵa) hám derektiń hár bir noqatı shekli ólshemge iye bolǵan dóńgelek túrinde súwretlenedi. Sonlıqtan ádette obekt aralas jaqtılıq, jarım-jartısı kogerentli, jarım-jartısı kogerentli emes jaqtılıq penen jaqtılandırılǵan bolıp shıǵadı.

Kogerentli emes (bir biri menen interferenciyalanbaytuǵın) hám kogerent (bir biri menen interferenciyalanatuǵın) nurlar menen jaqtılandırılwdıń tarqalıwı hár qıylı bolǵanlıqtan, mikroskoptıń ajırata alıw kúshi jaqtılandırılwdıń usılınan ǵárezli dep esaplawǵa boladı. Abbe tolıq kogerentli jaqtılıq penen jaqtılandırılıw ushın mikroskoptıń ajratıw kúshiniń teoriyasın dóretti.

Kogerentli jaqtılıq penen jaqtılandırılǵan obektin ayırım orınlarınan shıǵatuǵın nurlardıń interferenciyasınıń ańsat esapqa alıw ushın Abbe obekt sıpatında móldir difrakciyalıq pánjerini aldı. Meyli, b turıqlısına iye AB pánjeresi OO' kogerentli nurlardıń parallel dástesi menen jaqtılandırılǵan bolsın (297-súwret). Mikroskoptıń L obektivi beretuǵın pánjeriniń súwreti $A'B'$ tegisliginde alınadı. L obektivtiń F bas fokallıq tegisliginde pánjere beretuǵın hár qıylı tártiptegi spektrdiń súwretleri alınadı. 270-paragraftıń (7)-formulası boyınsha k -tártiptegi spektr

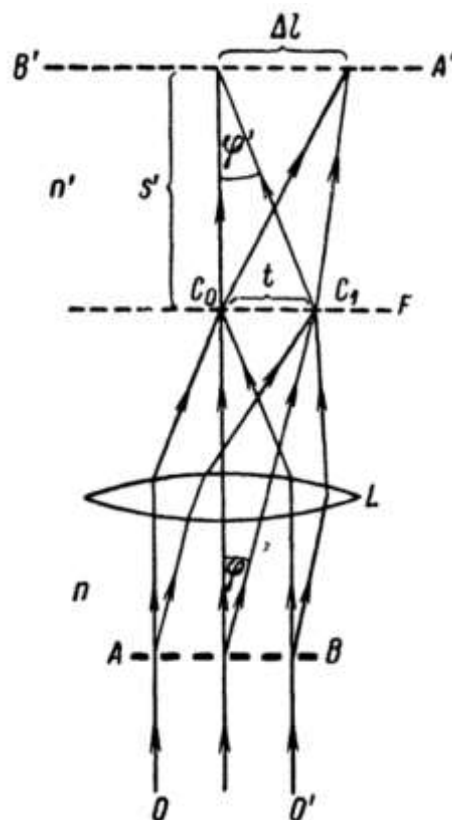
$$b \sin \varphi = k\lambda \quad (1)$$

qatnas boyınsha anıqlanǵan φ múyeshinde difrakciyalanǵan nurlar tárepinen payda etiledi. Eger biz immersiyalıq sistema menen is alıp baratuǵın bolsaq (330-paragraf), onda pánjere sındırıw koefficienti n bolǵan suıqlıqqa batırılǵan hám λ ge keletuǵın bolsaq, onda tolqınnıń usı suıqlıqtaǵı uzınlıǵın názerde tutıw kerek. Eger λ haqqında gáp etkende boslıqtaǵı tolqın uzınlıǵı názerde tutilatuǵın bolsa (ádette boslıqtaǵı tolqın uzınlıǵı názerde tutiladı), onda (1)-teńliktiń óń tárepin n ge bóliw kerek boladı hám bunday jaǵdayda

$$b \sin \varphi = k \frac{\lambda}{n} \quad (1a)$$

teńligine iye bolamız. $k = 0$ teńligi orınlanǵanda oraylıq jaqtılı jolaq alınadı. Usı oraylıq jaqtılı jolaqtan hám ayırım spektrlerden keletuǵın nurlar $A'B'$ tegisliginde interferenciyalanadı. Usınıń saldarınan AB

pánjeresiniń súwreti alınadı. Eger spektrlerdiń bir bólimin japsaq, onda pánjereniń súwreti mayısadı. Mısalı, barlıq spektrler jabılğan hám tek oraylıq jaqtılı C_0 jolağı qaldırılğan dep boljayıq. $A'B'$ tegisliginde ol teń ólshewli jaqtılandırılğanlıqtı payda etedi. Solay etip, eger tek oraylıq jaqtılı jolaqtı ashıq qaldıratuǵın bolsaq, onda $A'B'$ tegisligine fokuslangan okulyarda bir teń ólshemli jaqtılandırılğan maydandı kóremiz; pánjereniń hesh qanday súwretin kórmeymiz.



297-súwret.
Mikroskoptaǵı difrakciyalıq pánjereniń súwretiniń
payda bolıwı.

Endi oraylıq jaqtılı jolaq C_0 menen spektrdiń biri, mısalı $k = 1$ ge sáykes keletuǵın C_1 spektr ashıq bolsın. Ápiwayılıq ushın pánjere monoxromat jaqtılıq penen jaqtılandırıladı dep esaplaymız. Bunday jaǵdayda C_1 spektri bir maksimumǵa alıp kelinedi hám F obektiviniń bas fokallıq tegisliginde jaqtılıqtıń eki kogerentli deregi jaylasadı oraylıq jolaq C_0 hám onnan t qashıqlıǵında jaylasqan C_1 maksimumı. Bul dereklerdiń nurları $A'B'$ tegisliginde bir biri menen interferenciyalanıp, bir qatar interferenciyalıq jolaqlardı beredi. 256-paragrafta keltirilgen esaplawlar boyınsha qorısıl jaqtılı jolaqlardıń arasındaǵı qashıqlıq

$$\Delta l = \frac{\lambda}{t} \cdot s'$$

shamasına teń boladı. Bul teńlikte s' - bas fokallıq tegislik F penen $A'B'$ tegisliktiń arasındaǵı qashıqlıq. 297-súwretten $t/s' \cong \sin \varphi'$ teńligine iye bolamız. Bunnan Δl ushın

$$\Delta l = \frac{\lambda}{\sin \varphi'} \quad (2)$$

formulasına iye bolamız.

Pánjereniń móldir shtrixları bir birinen b qashıqlıǵında jaylasqan; eger biz olardıń $A'B'$ tegisligindegi súwretleriniń ólshemlerin nur optikasınıń talaplarına sáykes $\Delta y'$ arqalı belgilesek, onda sinuslar qatnası boyınsha (330-paragraf)

$$nb \sin \varphi = n' \Delta y' \sin \varphi'$$

teńligin jazamız. Súwret alınatuǵın ortalıqtıń sındırıw koefficienti ushın $n' = 1$ teńligi orınlanadı dep boljap (hawa) sońǵı teńlikten

$$\Delta y' = \frac{nb \sin \varphi}{\sin \varphi'}$$

teńligin alamız. Biz mikroskoptyń obektivinen shıqqan dásteni tek oraylıq jaqtılı jolaq penen bir spektr ótkeretuǵında etip sheklegen edik. Sonlıqtan $\sin \varphi'$ shamasınıń mánisi $k = 1$ teńligi qoyılǵan hám nátiyjede $nb \sin \varphi = \lambda$ túrine engen (1a) teńligi boyınsha anıqlanadı hám

$$\Delta y' = \frac{\lambda}{\sin \varphi'}$$

teńligi orınlı boladı. Bul ańlatpanı (2) menen salıstırıp mınanı alamız: $A'B'$ tegisliginde payda bolatuǵın interferenciyalıq jolaqlar pánjeriniń jaqtılı jolaqlarınıń súwretleri jatıwı kerek bolǵan $\Delta y'$ qashıqlıǵında jatadı. $A'B'$ tegisliginde pánjeriniń ózine tán bolǵan "súwreti" payda boladı. Geometriyalıq jaqtan durıs súwretten bul súwret mınaday ózgeshelikke iye: pánjeriniń jaqtılı jolaqlarına sáykes keletuǵın maksimumnan onıń qarańǵı jolaqlarına sáykes keletuǵın minimumlarǵa ótiw keskin túrde emes, al ástelik penen júzege keledi. Eger spektrlerdiń kóp sanın ótkeretuǵın bolsaq, onda olardan shıǵatuǵın nurlardıń interferenciyasınıń nátiyjesinde $A'B'$ tegisligindegi maksimumlardan minimumlarǵa ótiw keskinirek boladı, yaǵnıy "súwret" obektiniń ózine kóbirek usaytuǵın boladı.

Joqarıda keltirilgen kóz-qaraslardan eger oraylıq maksimum hám eń keminde bir spektr ótkeriletuǵın bolsa, yaǵnıy eger

$$\sin \varphi \geq \frac{\lambda}{nb}$$

teńsizligi orınlanatuǵın bolsa, onda $A'B'$ tegisliginde payda bolatuǵın interferenciyalıq súwrettegi pánjeriniń shtrixları ajıraladı dep esaplawǵa boladı. Basqa sóz benen aytqanda, pánjeriniń shtrixları bir birinen

$$b \geq \frac{\lambda}{n \sin \varphi}$$

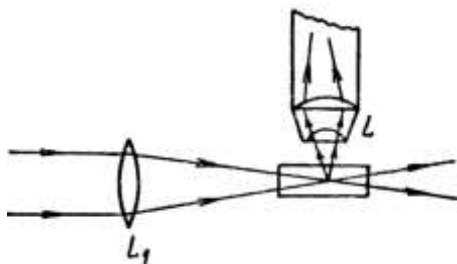
qashıqlıǵında turǵan bolsa, onda mikroskop pánjeriniń shtrixların ajırata aladı.

330-paragrafta biz eger jaqtılıq shıǵarıp turǵan noqattıń arasındaǵı qashıqlıq $0,61 \frac{\lambda}{n \sin \varphi}$ shamasınan kishi bolmaǵan jaǵdayda mikroskoptyń járdeminde ajıralatuǵınlıǵın kórdik. Solay etip, obektte kogerentli jaqtılıq penen jaqtılandırǵandaǵı mikroskoptyń ajıratıw kúshi shama menen ayırım noqatları kogerentli bolmaǵan nurlardı shıǵaratuǵın obektte qaraǵandaǵı ajıratıw kúshindey boladı.

Abbe teoriyasınan mınaday jaǵday kelip shıǵadı: eger F obektivtiń bas fokallıq tegisliginde alınatuǵın spektrlerdiń bir bólimi jasalma túrde jabılsa, "súwrettiń" obektiniń ózine geometriyalıq jaqtan usamawı múmkin. Misalı, eger oraylıq maksimumdı hám tek jup tártiptegi spektrlerdi ótkerse ($k = \pm 2, \pm 4, \dots$), onda "súwrettegi" jaqtılı jolaqlar $\Delta l' = \frac{1}{2} \Delta y'$ qashıqlıǵında jaylasqan bolar edi, yaǵnıy "súwret" pánjeredegi shtrixlardan eki ese kóp shtrixlardı bergen bolar edi. Bul juwmaqlardıń barlıǵı bas fokallıq tegislik F ke hár qıylı formalarǵa iye diafragmalardı qoyıw jolı menen tastıyıqlanadı.

Mikroskoptyń teoriyasınıń bunnan bılay rawajlanıwı sovet fizikleri L.I.Mandelshtam hám D.S.Rojdestvenskiy tárepinen orındandı. L.I.Mandelshtam ózi jaqtılıq shıǵarıp turǵan obektler ushın teoriyanı tolıq rawajlandırıwı hám Abbeniń jawmaqlarınıń bir qatarın, sonıń ishinde pánjeriniń shtrixlarınıń eki ese artıwı qubılısın eksperimentlerde kórsetti. D.S.Rojdestvenskiy tolıq emes kogerentli jaqtılıq bolǵan eń ulıwmalıq jaǵdaylardı izertledi. Ol obektiniń hár qıylı bólimleri arqalı ótetuǵın jaqtılıq dásteleriniń interferenciyalıq qubılıslardıń úlken orındı iyeleytuǵınlıǵın kórsetti. Kópshilik jaǵdaylarda mikroskopta baqlanatuǵın obektler azlı-kemli móldir bolıp tabıladı. Obektiniń hár qıylı bólimleri arqalı ótetuǵın nurlar belgili bolǵan júrisler ayırmasına iye boladı hám bir biri menen interferenciyanadı. Qaralatuǵın obektiniń shetlerinde súwretti onnan da mayıstıratuǵın interferenciyalıq jolaqlar payda boladı.

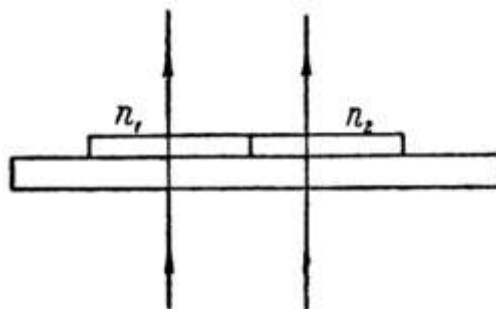
Bul paragrafta, tap sol sıyaqlı 330-paragrafta islengen juwmaqlar mikroskoptyń ajırata alıw kúshiniń sheklerine jaqınlaǵanda obekt penen onıń súwretiniń arasındaǵı geometriyalıq uqsaslıqtıń joǵala baslaytuǵınlıǵın kórsetedi. Bunday jaǵdayda vizualıq baqlawlar ótkergende mikroskoplar immersiya bolmaǵan jaǵdayda ólshemleri shama menen 0,3 mkm bolǵan, al immersiya bolǵan jaǵdaylarda ólshemleri shama menen 0,2 mkm bolǵan obektlerdi ajırata aladı. Ultrafiolet nurlarda fotosúwretlerdi túsirgende ólshemleri 0,1 mkm bolǵan obektlerdi ajıratıw múmkin.



298-súwret.
Ultramikroskopiyaq bólekshelerdi baqlawdıń
sxeması.

Eger baqlanatuǵın obekt penen onıń súwretiniń arasındaǵı geometriyalıq uqsaslıq talabınan bas tartqan jaǵdayda mikroskoptıń járdeminde ólshemleri mikronnıń onnan bir úlesinen de kem bolǵan kishi bólekshelerdi tabıw múmkin. Bunday usıl jaqtılıqtıń kishi bólekshelerdegi shashırawına tiykarlangan. Usıldıń sxeması 298-súwrette keltirilgen. Jaqtılıqtıń dástesi linzaniń járdeminde kishi bóleksheler ushıp júrgen kyuvetaǵa koncentracıyalanadı. Bunday bólekshelerdi *ultramikroskopiyaq* bóleksheler dep ataydı. Ayırım ultramikroskopiyaq bólekshede shashıratın jaqtılıq mikroskoptıń L obektivine kelip túsedi hám onıń fokallıq tegisliginde difrakciyalıq dóńgelekti payda etedi. Usınday dóńgelektiń bar bolıwına baylanıslı bólekshelerdiń bar ekenligi hám olardıń qozǵalısqı haqqında juwmaq shıǵarıwǵa boladı. Bólekshelerdiń barlıq jıynaǵı qara fondaǵı jaqtılıq shıǵarıp turǵan juldızshalar túrinde baqlanadı. Usınday "ultramikroskopiyaq" usıl ólshemleri 0,005 mkm ge shekemgi bólekshelerdiń tabıwǵa múmkinshilik beredi.

299-súwret.
Nurlardıń obekttiń hár qıylı sındırıw
koefficientlerine iye bólimleri arqalı ótiwi.



Házirgi zaman mikroskopiyaında paydalanılatuǵın basqa usıl jaqtılıqtı jıypaytuǵın, al jaqtılıq dástelerine belgili bolǵan júrisler ayırmasın kirgizetuǵın obektlerdi baqlawǵa arnalǵan. Mikroskopta baqlanatuǵın biologiyaq obektlerdiń kópshiligi móldir hám sonlıqtan olardı baqlaw ushın aldın ala boyaw kerek boladı. Sonıń menen hár qıylı tkanlardıń hár qıylı reńlerge iye bolıwına itibar beriw kerek. Bunday boyawdı hám reńdi saylap alıw dım qıyın. Biraq, boyalmaǵan tkanlardıń ózleri de bir tekli emes, sebebi olar hár qıylı sındırıw koefficientlerine iye. Sonlıqtan, baqlanatuǵın obekttiń sındırıw koefficienti n_1 bolǵan bólimi arqalı hám sındırıw koefficienti n_2 shamasına teń bólimi arqalı ótetuǵın tolqınlardıń arasında belgili bolǵan fazalar ayırması payda boladı (299-súwret). Bunday fazalar ayırmasınıń bolıwı tikkeley kórinbeydi. Biraq, 1935-jılı Cernike oraylıq C_0 jolaqtı beretuǵın nurǵa qosımsha $\pi/2$ fazalar ayırmasın berip, bul nurlardıń baqlanatuǵın obekttegi bir tekli bolmaǵan orınlarında difrakciyalanǵan nurlar menen interferenciyanı alıwǵa boladı (297-súwret). Usınıń nátiyjesinde boyalmaǵan obektteń strukturasın ayqınlastırıw múmkin. Bul usıldı *fazalıq kontrast* usılı dep ataydı.

XXIX BAP

FOTONLAR

§ 332. Elektronnıń nurlanıwınıń klassikalıq teoriyası hám onıń qollanılıwınıń shegaraları.

Kursımızdıń bunnan burınǵı paragraflarda biz atomlar menen molekullardıń quramında ózleri qanday ν jıyılıǵı menen terbeletuǵın bolsa, tap sonday ν jıyılıǵındegı jaqtılıqtı nurlandıratuǵın elektronlardı bar dep esaplasaq, onda kóp sanlı optikalıq qubılıslardı túsindirıwdıń múmkin ekenligin kórdik. Bul boljawdıń durıs ekenligi klassikalıq elektrodinamikanıń juwmaqları menen tastıyıqlanadı. Klassikalıq elektrodinamikadan $\ddot{x}$ tezleniwi menen qozǵalatuǵın elektronnıń quwatı

$$W = \frac{2e^2\ddot{x}^2}{3c^3} \quad (1)$$

shamasına teń elektromagnit tolqınların nurlandıratuǵınlıǵı belgili.

Eger elektron amplitudası a hám jıyılıǵı ν bolǵan garmonikalıq terebeletuǵın bolsa, onda onıń átirapında tap sonday ν jıyılıǵındegı sferalıq elektromagnit tolqın payda boladı.

(1)-formulaǵa sáykes, elektronnıń nurlanıwınıń quwatı (waqıt boyınsha ortashalanǵan)

$$\bar{W} = \frac{16\pi^4 e^2 \nu^4 a^2}{3c^3} \quad (2)$$

shamasına teń.

Eger elektronnıń qozǵalıstı taza garmonikalıq bolmasa, onda bunday qozǵalıstı Fure qatarına garmonikalıq qurawshılardıǵa jayıw kerek. Amplitudası a_i bolǵan hár bir garmonikalıq qurawshıǵa (2)-teńlik penen anıqlanǵan nurlanıwdıń $\bar{W}_i$ quwatı sáykes keledi.

Haqıyqatında, elektron hesh waqıtta taza garmonikalıq túrde terbelmeydi, sebebi nurlanıw menen ol energiyasın joǵaltadı. Sonlıqtan, eger elektrongá sırttaǵı qanday da bir derekten úzliksiz túrde energiya alıp kelinbese, onıń terbelisleriniń amplitudası sónedi. Sónetuǵın terbeliske qatnasatuǵın usınday elektron amplitudası jıyılıqtıń shekli intervalında nolden sezilerliktey ózgeshe bolǵan nurlanıwdı beredi (I tomdaǵı 104-paragrafta ayılǵanlar menen salıstırıńız). Basqa sóz benen aytqanda, sóniwshi terbeliske qatnasatuǵın elektron qatań emes túrdegi monoxromat jaqtılıqtı beredi (Biraq shekli keńlikke iye spektrallıq sıziqtı beredi). "Tábiyiy" dep atalatuǵın bul sıziqtıń keńligi $\delta\nu$ mınaǵan teń

$$\delta\nu = \frac{\gamma}{2\pi}. \quad (3)$$

Bul teńlikte

$$\gamma = \frac{8\pi^2 e^2 \nu^2}{3c^3 m}.$$

(3)-formuladan tábiyiy keńlikteń elektronnıń zaryadı e den hám massası m nen, jaqtılıqtıń tezligi c dan hám nurlanıw jıyılıǵı ν dan gárezli ekenligin kórinip tur. 10^{15} sek^{-1} shamasındaǵı (kózge kórinetuǵın jaqtılıq) jıyılıq ushın onıń shaması $\delta\nu \cong 4 \cdot 10^7 \text{ sek}^{-1}$, yaǵnıy júdá kishi. Sonlıqtan biz jaqınlasıwdıń jetkilikli dárejesinde atom yamasa molekulanıń ishinde ν jıyılıǵı menen garmonikalıq terbeletuǵın elektronnıń, klassikalıq elektrodinamikaǵa sáykes tap sonday ν jıyılıqtı jaqtılıqtı shıǵaradı dep esaplay alamız.

Elektronnıń dáwirli emes qozǵalıstı ushın ulıwma jaǵdayda Fure qatarına jayıw barlıq ν_i jıyılıqları ushın amplituda a_i lerdiń nolden ózgeshe bolatuǵınlıǵın kórsetedi. Bunnan biz qarap ótken jaǵdayda nurlanıwdıń múmkin bolǵan barlıq uzınlıqlarınıń bar bolıwı menen táriyiplenedi, yaǵnıy nurlanıw sıziqlı emes, al tutas boladı.

Elektronnıń tutas nurlanıwına misal sıpatında elektronnıń toqtawında payda bolatuǵın *tormozlıq nurlanıw* dep atalatuǵın nurlanıw xızmet ete aladı. (1)-formuladan paydalanıp, tormozlanıwshı elektronnıń dt waqıttır ishinde

$$W \cdot dt = \frac{2e^2 \ddot{x}^2}{3c^3} \Delta t$$

shamasındaǵı energiyanı nurlandıratuǵınlıǵın kóremiz. Meyli Δt waqıttır ishinde elektron tolıq tormozlanatuǵın, yaǵnıy baslanǵısh tezligin v dan nolge shekem ózgartetuǵın bolsın; tormozlanıwdı turaqlı $\ddot{x} = w_0$ tezleniwi menen júzege keledi dep esaplaymız. Bunday jaǵdayda Δt waqıttır ishinde nurlanǵan energiyannıń tolıq muǵdarı E ushın mınanı alamız:

$$E = \int_0^{\Delta t} \frac{2e^2 w_0^2}{3c^3} dt = \frac{2e^2 w_0^2}{3c^3} \Delta t.$$

Turaqlı tezleniwde $w_0 = \frac{v}{\Delta t}$ qatnası orın alatuǵın bolǵanlıqtan, soǵıq formula mınanı beredi:

$$E = \frac{2e^2 v^2}{3c^3 \Delta t}. \quad (4)$$

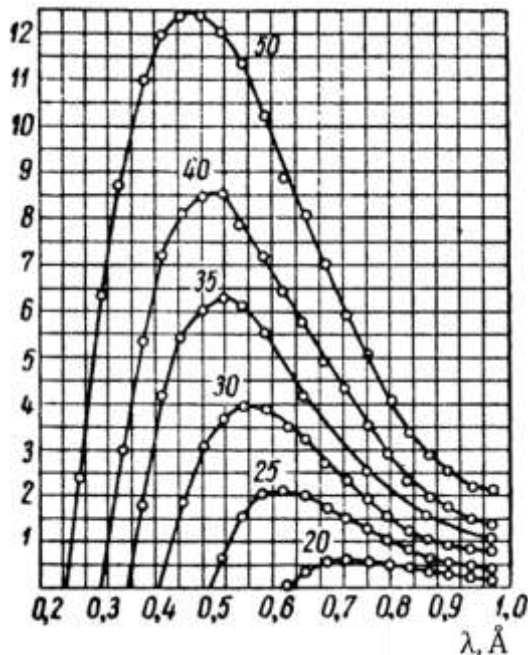
(5)-formuladan nurlanǵan energiyannıń elektronnıń baslanǵısh tezligi v menen tormozlanıw waqıtı qansha úlken bolsa, nurlanǵan energiyannıń da úlken bolatuǵınlıǵı kórinip tur. Bul elektronnıń keskin túrdegi tormozlanıwında ǵana sezilerliktey nurlanıwdı kútiwge bolatuǵınlıǵın ańǵartadı. Bunday sharayat tez ushatuǵın elektronlar menen qattı antikatodtı bombalaǵanda júzege keledi. Bunday jaǵday rentgen trubkalarında orın aladı. Tormozlanıw waqıtı Δt nıń júdá kishi bolıwı bunday jaǵdayda qısqa tolqınlardıń nurlanıwına alıp keledi. Usınday jollar menen rentgen nurlarınń payda bolıwı túsindiriledi.

Elektronnıń ástelengen qozǵalısnıń Fure integralına jayıw bunday jaǵdayda elektronnıń baslanǵısh tezligine salıstırǵanda energiyasınıń maksimumı tolqın uzınlıǵınıń qısqaq oblastında jatqan tutas spektrdiń nurlanıwınıń kerek ekenligin kórsetedi. Bul juwmaqtı tájiriye bastıyıqlaydı. 300-súwrette elektronlardıń wolfram antikatodına urılıwınıń nátiyjesinde alınǵan tutas rentgen spektrindegı energiyannıń tarqalıwı iymeklikleri kórsetilgen. Iymeklikler 20 dan 50 kV ke shekemgi potencıallardıń hár qıylı tezletiwshı ayırmaları $V - V_0$ ge tiyisli.

Elektronnıń nurlanıwına basqa misal sıpatında betatronlar menen sinxrotronlar dep atalatuǵın dúzilislerdegi nurlanıwdı kórsetemiz (378-paragraf). Bul ásbaplarda elektron quyn tárizli elektr maydanınıń tásirinde sheńber boyınsha qozǵalıp, tezligi jaqtılıqtır tezligine jaqın bolǵan júdá úlken mánislerge shekem joqarılaydı. 1944-jılı sovet fizikleri I.Pomeranchuk penen D.Ivanenko betatronda yamasa sinxrotronlarda sheńber boyınsha qozǵalatuǵın elektronnıń nurlandıratuǵınlıǵı kórsetildi. Bir qansha waqıttan keyin sinxrotronlarda baqlandı. Bul sinxrotronlarda elektronlar $7 \cdot 10^7$ eV energiyaǵa shekem tezletilgen. Elektronlar dástesiniń orbitası 29,3 sm ge teń diametrge iye boldı. Eger vakuum trubkasına orbita tegisligine elektronlardıń qozǵalısnı baǵıtına qarama-qarsı baǵıtta qaraǵanda nurlanıw aq reńdegi kishkene jaqtılı daq sıpatında kóringen.

Joqarıda keltirilgen misallar klassikalıq elektrodinamikanıń tezleniw menen qozǵalatuǵın elektronnıń nurlanıwın esaplawǵa paydalanıwǵa bolatuǵınlıǵın kórsetedi. Tek tezleniw menen qozǵalatuǵın elektron ǵana nurlandıradı; teń ólsheuli qozǵalatuǵın elektronnıń nurlandırmawı kerek. Biraq, bul juwmaq elektronnıń qozǵalıw tezligi v jaqtılıqtır fazalıq tezliginen kishi bolǵan jaǵdaylarda ǵana durıs. Boslıqta jaqtılıq múmkin bolǵan maksimallıq c tezligi menen tarqaladı hám elektronnıń tezligi v hesh waqıtta c dan úlken bolmaydı. Biraq, elektron qanday da bir móldir zatta qozǵalǵanda jaǵday basqasha boladı. Móldir zatta jaqtılıqtır fazalıq tezligi c/n ge teń (n arqalı zattıń sıdırıw kórsetkishi belgilengen). Qattı hám suyıq deneler ushın n nıń mánisi 1 den ádewir úlken hám elektronnıń tezligi c/n shamasınan úlken bolıwı múmkin. "Jaqtılıqtır tezliginen úlken" tezlik penen qozǵalatuǵın usınday elektronnıń jaqtılıq shıǵarıwı 1934-jılı P.A.Cherenkov tárepinen tabıldı. Ol radioaktiv elementlerdiń γ -nurlarınıń tásirinde payda bolǵan júdá úlken

tezlikke iye bolğan elektronlardıń suyıqlıq arqalı ótiwin baqladı. Bul qubılıstıń teoriyası I.M.Frank hám I.E.Tamm tárepinen berildi.



300-súwret.
Tutas rentgen spektrindegi energiyanıń tarqalıwı.

P.A.Cherenkov tárepinen tabılğan nurlanıw tóbesindegi múyeshtiń mánisi

$$\cos \vartheta = \frac{c}{vn} \quad (5)$$

shamasına teń konustıń ishinde tarqalğan. Bul teńlikte ϑ arqalı elektronnıń qozǵalıwı baǵıtınan baslap esaplangan múyesh belgilengen. (5)-formula ϑ múyeshi ushın $\pi/2$ shamasınan kishi mánisti beretuǵın bolǵanlıqtan, jaqtılıqtıń shıǵıwı elektronnıń qozǵalıwı baǵıtında ǵana baqlanadı. Qarama-qarsı baǵıtta jaqtılıq nurlandırılmaıdı.

Bul qatnastıń durıs ekenligi tájiriybede jaqsı tastıyqlanadı. Mısalı, tájiriybelerde benzol ushın $\vartheta = 38^\circ 30'$ mánisi alınǵan, al (5)-formula boyınsha $38^\circ 40'$ alınadı.

Joqarıda keltirilgen misallardıń barlıǵı klassikalıq elektrodinamikanıń juwmaqların tájiriybede alınǵan nátiyjelerge sáykes kelmeytuǵınlıǵın kórsetedi. Biraq, usınıń menen bir qatarda fizikanıń rawajlanıwı menen nurlanıwdıń klassikalıq teoriyası menen de, jaqtılıqtıń tábiyatınń tolqınlıq tábiyatı menen de sáykes kelmeytuǵın faktler jıynala basladı. Nurlanıwdıń klassikalıq teoriyasınń juwmaqları menen eksperimentlerde alınǵan maǵlıwmatlardıń bir birine sáykes kelmewi birinshi ret absolyut qara deneniń spektrindegi energiyanıń tolqın uzınlıǵı boyınsha tarqalıwın úyreniwdiń barısında kórindi. 310- hám 311-paragraflarda kórsetilip ótilgenindey, ulıwmalıq termodinamikalıq principlerden absolyut qara deneniń spektrindegi energiyanıń tarqalıwınń tek tolqın uzınlıǵı menen absolyut temperaturadan ǵárezli bolǵan universallıq funkciya bolıp tabılatuǵınlıǵın kórsetiwge boladı. Biraq, bul funkciyanıń durıs túri Plank tárepinen klassikalıq kóz-qaraslarǵa pútkilley jat bolǵan, atap aytqanda jaqtılıqtıń energiyanıń $\varepsilon = h\nu$ shamasına (h arqalı mánisi $6,624 \cdot 10^{-27}$ erg·sek shamasına teń Plank turaqlısı, ν arqalı nurlanıwdıń jiyiligi belgilengen) teń ayırım porciyalar menen nurlandırılauıǵı haqqındaǵı boljawınan keyin ǵana tabıldı.

Klassikalıq nurlanıw teoriyasın paydalanıwǵa bolmaytuǵınlıǵın ekinshi mısalı retinde tormozlıq rentgen nurlanıwın qaraymız. Biz ástelengen qozǵalıstı Fure qatarına jayıwdıń onıń nurlanıwınń tutas xarakterge iye ekenligin túsindiretuǵınlıǵın kórsettik. Bunday jaǵdayda jayıwda qálegen shamadaǵı úlken jiyilikler qatnasadı, bunnan nurlanıwdıń qısqa tolqınlar oblastındaǵı intensivliginiń kishi bolıwı múmkın bolsa da, tutas rentgen spektriniń qısqa tolqınlar tárepinen

sheklenbegenligi kelip shıǵadı. Tájiriýbeler bolsa, rentgen nurlarınıń tutas spektrindegi energiyanıń tarqalıwınıń qısqa tolqınlar tárepte shegaraǵa iye ekenligin kórsetedi (300-súwret). Bul shegaranıń turǵan ornı antikatodqa kelip urılatuǵın elektronlardıń tezliginen ǵárezli, Biraq antikatodtıń materialınan ǵárezli emes. Elektronlardıń tezligi qanshama úlken bolsa, spektrdiń shegarasına sonshama qısqa λ_0 tolqın uzınlıǵı sáykes keledi. Kóp sanlı ólshewler spektrdiń shegarası sáykes keletuǵın λ_0 tolqın uzınlıǵınıń elektronlardı tezlendiretuǵın $V_1 - V_2$ potenciallyar ayırmasına kerı proporcional ekenligin kórsetedi:

$$\lambda_0 = \frac{K}{V_1 - V_2}. \quad (6)$$

Eger (6)-formuladaǵı λ_0 tolqın uzınlıǵın angstremlerde, al $V_1 - V_2$ potenciallyar ayırmasın voltlerde ólsheytuǵın bolsaq, onda proporcionallıq koefficienti K nıń mánisi $K = 12\,350$ ge teń boladı.

Rentgen nurlarınıń tutas spektriniń qısqa tolqınlı shegarasınıń bolıwı energiyanıń $\varepsilon = h\nu$ porciyası menen nurlanatuǵınlıǵı haqqındaǵı Plank gipotezasınıń járdeminde tikkeley túsindiriledi. Haqıyqatında da, eger nurlanıw tormozlanıwshı elektronlardıń energiyanıń esabınan júzege keletuǵın bolsa, onda elektron tárepinen nurlandırılǵan energiyanıń porciyası onıń baslanǵısh energiyanan úlken bola almaydı:

$$\varepsilon = h\nu \leq E_k. \quad (7)$$

Bul teńlikte E_k - antikatodqa urılatuǵın elektronnıń kinetikalıq energiyası. $V_1 - V_2$ potenciallyar ayırmasın ótken elektron $E_k = e(V_1 - V_2)$ energiyanı iye bolatuǵın bolǵanlıqtan (e arqalı onıń energiyası belgilengen), (7)-ańlatpadan

$$h\nu \leq e(V_1 - V_2)$$

teńsizligine iye bolamız. Bunnan tormozlanıwshı elektron tárepinen nurlandırılatuǵın maksimallıq jiyilik ν_0 diń

$$\nu_0 = \frac{e}{h}(V_1 - V_2)$$

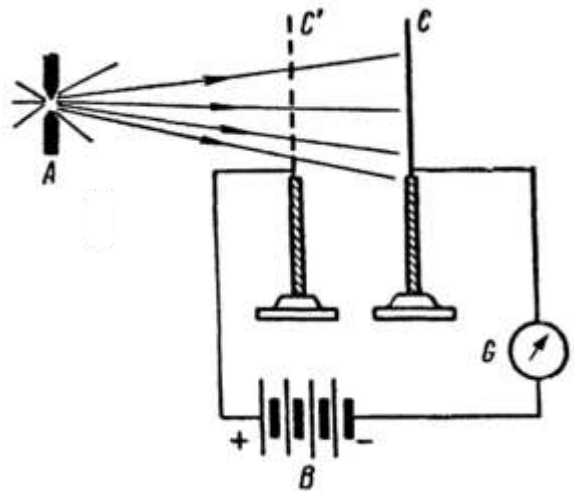
shamasına teń bolatuǵınlıǵın kóremiz.

ν jiyiliginen tolqın uzınlıǵına ótip, rentgen nurlarınıń tutas spektriniń shegarasına sáykes keletuǵın tolqın uzınlıǵınıń

$$\lambda_0 = \frac{hc}{e} \cdot \frac{1}{V_1 - V_2} = \frac{K}{V_1 - V_2}$$

shamasına teń bolatuǵınlıǵın hám onıń (6)-formulaǵa sáykes keletuǵınlıǵın kóremiz. h , c hám e niń belgili bolǵan sanlı mánislerin paydalanıp, $K = \frac{hc}{e} = 4,13 \cdot 10^{-7}$ shamasın alamız. Eger bul mánisti λ_0 angstremlerde, al $V_1 - V_2$ voltlerde ólshenetuǵın sistemaǵa ótkersek, onda $K = 12\,340$ shamasın alamız. Bul tutas rentgen spektriniń qısqa tolqınlı shegarasın tikkeley ólshewlerde alıńǵan shamaǵa sáykes keledi.

§ 333. Fotoeffekt. Bunnan aldırǵı paragrafta biz jaqtılıqtıń $\varepsilon = h\nu$ porciyası menen nurlandırılatuǵınlıǵın kórdik. Jaqtılıq tap usınday porciyalar menen jutıladı. Bul jaǵday mánisi denelerden jaqtılıqtıń tásirinde elektronlardıń ushıp shıǵıwınan ibarat bolǵan fotoelektrlik qubılıs dep atalatuǵın qubılıstan júdá kórgizbeli túrde kelip shıǵadı.

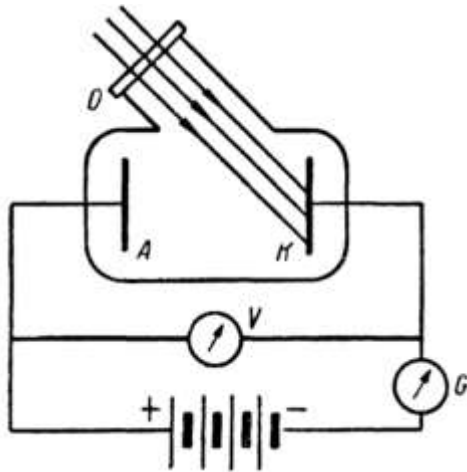


301-súwret.
A.G.Stoletovtın tájiriybesiniń sxeması.

Jaqtılıqtıń elektrlik qubılıslardıń ótiwine tásiriniń birinshi ret Gerc tárepinen bayanlandı. Ol eki cink sharikleriniń birin ultrafiolet jaqtılıq penen jaqtılandırғanda usı eki shariktiń arasındaǵı elektr ushqınınıń shıǵıwınıń ádewir ańsatlasatuǵınlıǵın ańǵarǵan. Jaqtılıqtıń zaryadlangan denelerge bunnan bılay izertlewdi 1888-1890 jılları Moskva universiteniniń professorı A.G.Stoletov tárepinen dawam etildi. Stoletovtın tájiriybeleriniń sxeması 301-súwrette kórsetilgen. Bul súwrette CC' arqalı polirovkalangán cink plastinka C menen metall tor C' belgilengen. Plastinka menen tordıń arasında B batareyasınıń járdeminde potenciallar ayırması túsiriledi. C plastinkasınıń zaryadı ózgergende payda bolatuǵın toqtıń shamasın G galvanometriniń járdeminde ólshewge boladı. C plastinkası A doǵasınıń jaqtılıǵı menen jaqtılandırıldı. Stoletov teris zaryadlangán C plastinkasınıń óziniń zaryadın jaqtılıqtıń tásirinde joǵaltatuǵının taptı. Bul qubılıstı ol *aktinoelektrlik* dep atadı; házirgi waqıtları onı fotoeffekt dep ataydı. Bunnan keyin Stoletov fotoeffekt baǵınatuǵın tómendegidey tiykarǵı nızamlıqlardı ashtı:

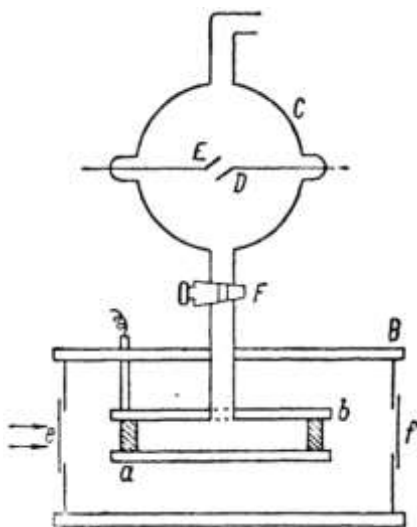
- 1) eger dene teris zaryadlangán bolǵan jaǵdayda ǵana zaryadın joǵaltadı; deneniń zaryad on bolǵan jaǵdayda onıń zaryadı jaqtılıqtıń tásirinde joǵalmaydı;
- 2) qubılıs ultrafiolet nurlardıń tásirinde jaqsıraq júzege keledi;
- 3) nurlardıń zaryadlawshı tásirini olardıń energiyasına proporcional;
- 4) nurlardıń razryadlaw tásirini hátte júdá qısqa waqıttıń ishinde de tabıwǵa boladı, jaqtılandırıw menen razryadtıń arasında sezilerliktey waqıt ótpeydi.

Bunnan keyin Stoletov jaqtılandırıwshı plastinkanı vakuumǵa jaylastırıp fotoeffekt qubılısın úyrendi. Tap usınday usıldı basqa izertlewlerde de paydalandı. Dúzilistiń sxeması 302-súwrette kórsetilgen. K plastinkası O kvarc ayna arqalı ultrafiolet nurlanıw menen jaqtılandırıldı. K plastinkası menen A elektrodınıń arasındaǵı potenciallar ayırması $V_1 - V_2$ nıń shaması G galvanometriniń járdeminde ólshenedi. K plastinkasın jaqtılandırғanda G galvanometri menen ólshenetuǵın toq payda boladı. İdista jaqsı vakuum bolǵanlıqtan, bul toq jaqtılandırılǵan plastinkadan julıp alınǵan zaryadlangán bólekshelerdiń esabınan ǵana payda bolıwı múmkin. Qubılıs qálegen materialdan soǵılǵan K plastinkası bolǵan jaǵdaylarda da baqlanatuǵın bolǵanlıqtan, jaqtılıq tárepinen julıp alınatuǵın bólekshelerdi elektronlar dep boljaw tábiyiy.



302-súwret.
Vakuumdagi fotoeffektti úyreniw boyınsha tájiriybeniń sxeması.

Jaqtılıqtıń tásirinde denelerden elektronlardıń julıp alınatuǵınlıǵınıń tuwrıdan-tuwrı dálili A.F.Ioffe tárepinen berildi. Ol kondensatordıń plastinkalarınń arasında payda etilgen qozǵalmaytuǵın shańnıń bólekshesi usılınan paydalandı (II tom, 151-paragraf). Ioffe tájiriybesiniń sxeması 303-súwrette keltirilgen. *C* shiyshe ıdısınıń *E* hám *D* elektrodlarınń arasında elektr razryadı júzege keledi. Bunday jaǵdayda elektrodlar soǵılǵan metaldıń puwlanıwı orın aladı. *F* kranınıń járdeminde shańnıń bóleksheleri kondensatordıń *a* hám *b* plastinkalarınń arasına kirgiziliwı múmkin boldı. Sırtqı tásirlerden qorgaw ushın kondensator *B* qutısına jaylastırılǵan. *B* qutısı eki aynaǵa iye - shań bólekshelerin ultrafiolet nurlar menen jaqtılandırıw ushın xızmet etetuǵın *e* kvarc aynası hám shań bólekshelerin mikroskoptıń járdeminde baqlaw ushın arnalǵan *f* aynası. Hawa menen súykelisiwdiń saldarınan zaryadlangan shań bóleksheleri kondensatorda *a* hám *b* plastinkalarınń saykes potenciallar ayırmasın saylap alıw jolı menen kondensatordıń plastinkalarınń arasında qalqıp júrdi. Shań bólekshesin ultrafiolet nurlardıń ázzi aǵısı menen jaqtılandırǵanda shań bólekshesi hár waqıt óziniń zaryadın ózgertedi. Nátiyjede ol teń salmaqlıq halınan shıǵadı hám kondensatordıń teris zaryadlangan plastinkasına qaray qozǵaladı. Bul jaǵday shań bólekshesiniń teris zaryadtı joǵaltqanın bildiredi. Kondensatordıń *a* hám *b* plastinkalardıń arasındaǵı potenciallar ayırmasınıń jańa mánisin saylap alıw jolı menen shańnıń bólekshesiniń qaytadan qalqıp júriwin júzege keltiriwge boladı. Teń salmaqlıqqa saykes keletuǵın potenciallar ayırmasınıń mánisleri boyınsha shań bólekshesiniń zaryadınıń ózgerisi esaplandı hám bul ózgeris elektronnıń zaryadı *e* ge teń bolıp shıqtı.

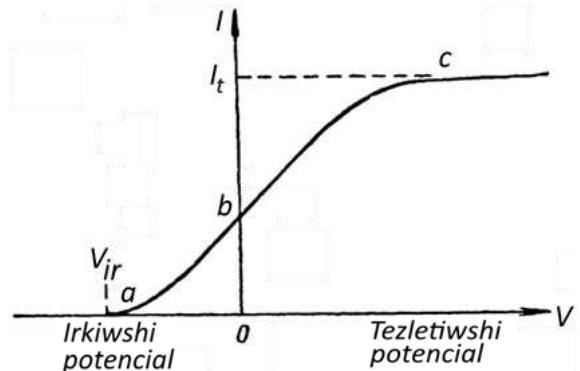


303-súwret.
A.F.Ioffeniń tájiriybesiniń sxeması.

302-súwrette keltirilgen tájiriybeniń sxemasına qaytıp kelip, plastinkanı jaqtılandırǵanda julıp alınatuǵın elektronlardıń sanın hám olardıń tezligin ólshewdiń usılın qaraymız. Nurlanıwdıń ózgermeytuǵın quramı menen quwatındaǵı K hám A elektrodlarınń arasında payda bolatuǵın I toǵınıń kúshi elektrodlardıń arasındaǵı potenciallar ayırması $V = V_1 - V_2$ dan ǵárezli. Plastinkanı monoxromat jaqtılıq penen jaqtılandırǵandaǵı ǵárezlik 304-súwrette kórsetilgen. Toq kúshi I diń potenciallar ayırması V dan ǵárezligin súwretleytuǵın iymeklikti *voltamperlik xarakteristika* dep ataydı. Bul jaǵdayda voltamperlik xarakteristika óziniń mınaday ózgeshelikleri menen ayrılıp turadı:

- tezletiwshi potenciallar ayırması V nıń ósiwi menen toq I toyınıw mánisine jetedi;
- irkiwshi* potencialdıń sonday V_{ir} mánisi boladı, bunday potencialda toq I joǵaladı.

304-súwret.
Voltamperlik xarakteristika.



Álbette, jaqtılıqtıń tásirinde K plastinkasınan julıp alınǵan barlıq elektronlar A elektrodına jetetuǵın bolsa, onda toqtıń mánisi toyınıw toǵı I_t nıń mánisine teń boladı (II tom, 172-paragraf). Stoletovtıń baqlawlarınń nátiyjesine sáykes (úshinshi nızamlıq), toyınıw toǵınıń shaması plastinkaǵa túsetuǵın jaqtılıq aǵısınıń quwatı W ge proporcional. Toyınıw toǵı $I_t = en$ shamasına teń bolǵanlıqtan (n arqalı waqıt birliginde julıp alınatuǵın elektronlardıń sanı belgilengen) biz mınanı alamız: *waqıt birliginde julıp alınatuǵın elektronlardıń sanı túsiwshi nurdıń quwatına proporcional*.

Irkiwshi potencialdaǵı I toǵınıń bolıwı (304-súwrettegi ab iymekligi) elektronlardıń deneden bazı bir baslanǵısh tezlik penen ushıp shıǵatuǵınlıǵın kórsetti. Irkiwshi elektr maydanınıń jumısı eV_{ir} diń mánisi julıp alınǵan elektronlardıń baslanǵısh kinetikalıq energiyasına teń bolǵanda elektronlar A elektrodına jete almaydı:

$$eV_{ir} = \frac{mv^2}{2} \quad (1)$$

Fotoelektronlardıń tezligi v nıń jaqtılıqtıń jiyiligi ν den ǵárezligi úlken qızıǵıwdı payda etedi. tájiriybeler V_{ir} irkiwshi potencialdıń jiyilik ν den ǵárezligin tikkeley beredi; tezlik v nıń jiyilik ν den ǵárezligin ν menen V_i arasındaǵı (1)-qatnastıń tiykarında tabıwǵa boladı. Kóp sanlı ólshepler V_i nıń jiyilik ν diń sızıqlı funkciyası ekenligin kórsetedi:

$$V_{ir} = k\nu - V_0. \quad (2)$$

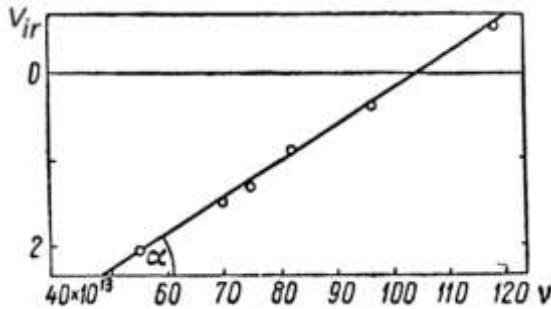
Bul teńlikte k menen V_0 turaqlı shamalar. k nıń mánisi materialdıń túrinen ǵárezli emes. 305-súwrette Milliken tárepinen hár qıylı jiyiliktegi jaqtılıqtıń tásirinde julıp alınǵan fotoelektronlar ushın maǵlıwmatlar keltirilgen. Abscissa kósherine jaqtılıqtıń jiyiligi ν , al ordinata kósherine V_{ir} irkiwshi potencialdıń mánisleri qoyılǵan. Ádette, eksperimentallıq noqatlar bir tuwrınıń boyında jaylasadı.

V_{ir} irkiwshi potencial elektronlardıń tezligi menen (1)-qatnas boyınsha bir mánisli baylanısqa bolǵanlıqtan, (2)-teńlikten jutılǵan jaqtılıqtıń jiyiligi ν qansha úlken bolsa, onda fotoeffektte julıp alınǵan elektronlardıń tezliginiń sonshama úlken bolatuǵınlıǵın kórsetedi.

V_{ir} irkiwshi potencialdıń ornına onıń (1)-qatnas boyınsha alınǵan $\frac{mv^2}{2}$ mánisin qoysaq, onda

$$\frac{mv^2}{2} = ek\nu - eV_0 \quad (3)$$

teńligine iye bolamız. Bul teńlikten *fotoelektronlardıń baslanǵısh kinetikalıq energiyasınıń jaqtılıqtıń jıyılıǵı ν dıń ósiwi menen sıızılıq ósetuǵınlıǵın ańǵartadı.*



305-súwret.

Irkiwshi potencialdıń jıyılıqtan sıızılıq ǵárezligin ańǵartatuǵın eksperimentallıq maǵlıwmatlar.

(2)- hám (1)-qatnaslardan jáne de bir nátiyje kelip shıǵadı: elektronlardıń deneden julıp alınıwı ushın jıyılıq ν dıń $\nu \geq V_0/k$ shártin qanaatlardıwıń kerek ekenligin kórsetedi. $\nu_0 = V_0/k$ shaması *fotoeffektıń qızıl shegarası* dep ataladı. Tolqın uzınlıǵı $\lambda_0 = c/\nu_0 = ck/V_0$ shamasınan kishi bolǵan jaqtılıq ǵana fotoeffektke bere aladı. Hár qıylı deneler ushın λ_0 hár qıylı mánislerge iye boladı (XIV kestege qarańız). λ_0 ultrafiolet oblastqa kiredi; tek siltili metallar ushın λ_0 kózge kórinetuǵın spektrdıń ishine kiredi. Bul Stoletovtıń fotoeffektke tiykarınan ultrafiolet oblastta júzege keledi degen juwmaǵınıń durıs ekenligin tastıyıqlaydı. λ_0 nıń mánisi deneniń betiniń tazalıǵınıń dárejesinen kúshli ǵárezli. XIV kestege keltirilgen maǵlıwmatlar gazden tazalanǵan metallar ushın durıs.

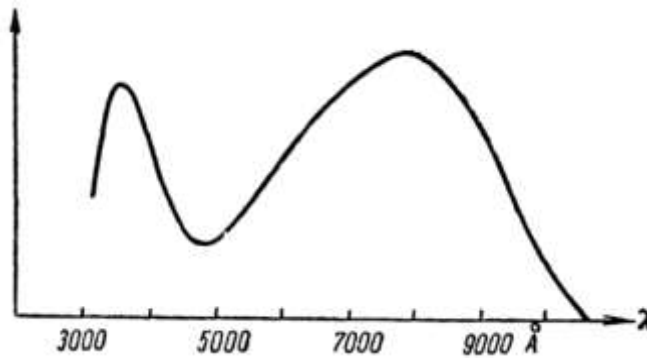
XIV keste

Fotoeffektıń qızıl shegarası

Metall	Cs	Na	Zn	Ag	Pt
$\lambda_0, \text{Å}$	6600	5000	3720	2600	1962

Eń aqırında Stoletovtıń jaqtılandırıwdıń bası menen fotoeffektıń payda bolıw momenti arasında sezilerliktey waqıttıń ótpeytuǵınlıǵı haqqındaǵı tastıyıqlawın tájiriybeler jaqsı tastıyıqladı. Stoletov bul fakttı mıńnan bir sekund dálilikte taptı. Sońǵı waqıtları ótkerilgen tájiriybeler jaqtılandırıwdıń bası menen fotoeffektıń payda bolıw momenti arasındaǵı waqıttıń 10^{-9} sekundtan úlken emes ekenligin kórsetti.

Fotoeffektıń intensivligi túsiwshi jaqtılıqtıń tolqın uzınlıǵına ǵárezli. Birdey quwatta hár qıylı λ tolqın uzınlıqları ushın I_t toyınıw toǵı ushın hár qıylı mánisler alınadı. 306-súwrette oksidlik-ceziyli qatlamnıń sezirliliginiń iymekligi kórsetilgen. Bunday qatlamnıń qızıl shegarası infraqızıl oblastta $\lambda_0 = 11\,000 \text{ Å}$ niń qasında jaylasadı. Usı mánisten baslap sezgirlik iymekligi tez ósedı hám $\lambda = 8000 \text{ Å}$ niń qasında maksimumdı beredi, ekinshi maksimum $\lambda = 3800 \text{ Å}$ niń qasında jaylasqan.



306-сúwret.
Оксидли-цезийли қатламның сезгірлігінің
іymeклігі.

Eger bet elektr vektorı E túsiw tegisligine parallel terbeletuǵın tegis-polyarizaciyalanǵan jaqtılıq penen jaqtılandırılátuǵın bolsa, onda sezgirliktiń keskin maksimumları baqlanadı. Bunday túrdegi qubılıs *selektivlik* yamasa *saylap alıwshılıq* dep ataladı. Eger túsiwshi tolqında elektr vektorı E túsiw tegisligine perpendikulyar baǵıtta terbeletuǵın bolsa, onda selektivlik fotoeffekt júzege kelmeydi.

§ 334. Eynshteyn formulası hám onı eksperimentte tekseriw. Fotoelektrlik qubılıs baǵınatuǵın eksperimentallıq nızamlar jaqtılıqtıń tolqınlıq teoriyasınıń kóz-qaraslarına qarama-qarsı keledi. Elektromagnit jaqtılıq tolqını zatqa kelip túsip usı jaqtılıq tolqınıń óziniń amplitudasına proporcional amplitudaǵa iye májbúriy terbelislerdi júzege keltiriwi kerek. Eger deneniń ishindegi elektronlardı uslap turatuǵın kúshler úlken bolmasa, onda elektronlar sırtqa túsetuǵın jaqtılıqtıń amplitudasınan ǵárezli bolǵan tezlik penen ushıp shıǵıwı kerek. Jaqtılıq tolqınıń amplitudası jaqtılıq aǵısınıń quwatın anıqlaytuǵın bolǵanlıqtan, biz julıp alınatuǵın elektronlardıń tezliginiń túsiwshi jaqtılıqtıń intensivliginiń ósiwi menen úlkeyetuǵınlıǵın alıwımız kerek. Haqıyqatında, bunday ǵárezlik joq: túsetuǵın jaqtılıqtıń quwatınıń úlkeyiwi menen julıp alınatuǵın elektronlardıń sanı úlkeyedi; elektronlardıń tezligi tek jaqtılıqtıń jiyiliginen ǵárezli. Bizin joqarıda kórgenimizdey, bunday jaǵdayda julıp alınǵan elektronlardıń energiyası jiyilikke baylanıslı sıızqlı ósedi. Qanday da bir jasalma túrdegi gipotezalarǵı oylap tappasaq, onda bunday ǵárezlikti tolqınlıq kóz qarastan túsindiriwdiń múmkinshiligi joq.

1905-jılı Eynshteyn mınaday ideyanı usındı: jaqtılıq Plank boyınsha qanday $\varepsilon = h\nu$ porciyalar menen nurlanatuǵın bolsa, tap sonday porciyalar menen jutıladı dep boljansa, onda fotoelektrlik qubılıslardıń barlıq tiykarǵı nızamlıqları tikkeley túsindiriledi. Haqıyqatında da, elektrondı qattı deneden julıp alǵanda jaqtılıqtıń energiyası mınalardıń jumısaladı:

1) julıp alıw ushın islengen jumısqı (onı A arqalı belgileymiz) hám

2) elektrongá $\frac{mv^2}{2}$ kinetikalıq energiyasın beriwge.

Eger bir elektrondı julıp alıw ushın jutılǵan jaqtılıq energiyasınıń porciyası $h\nu$ ge teń bolsa, onda energiyanıń saqlanıw nızamı boyınsha

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2} \quad (1)$$

teńligin alamız. Bul teńlikti Eynshteyn formulası dep ataydı. Elektronnıń kinetikalıq energiyası bolǵan $\frac{mv^2}{2}$ shamasın irkiwshi maydan eV_{ir} arqalı jazsaq [333-paragraftaǵı (1)-formula], onda Eynshteyn formulasın mınaday túrde kóshirip jazamız:

$$h\nu = eV_{ir} + A. \quad (1a)$$

Sońǵı teńlikten

$$V_{ir} = \frac{h}{e}\nu - \frac{A}{e} \quad (2)$$

teńligi kelip shıǵadı. Bul qatnas 333-paragraftaǵı (2)-formula menen ańlatılǵan eksperimentallıq nızamlıqqa sáykes keledi:

$$V_{ir} = k\nu - V_0. \quad (3)$$

Solay etip, fotoelektronlardıń kinetikalıq energiyasınıń jıyılık ν den sıızılıq ǵárezligi jaqtılıqtıń ayırım $\varepsilon = h\nu$ porciyası menen jutılatuǵınlıǵı gipotezasınan tikkeley kelip shıǵadı eken.

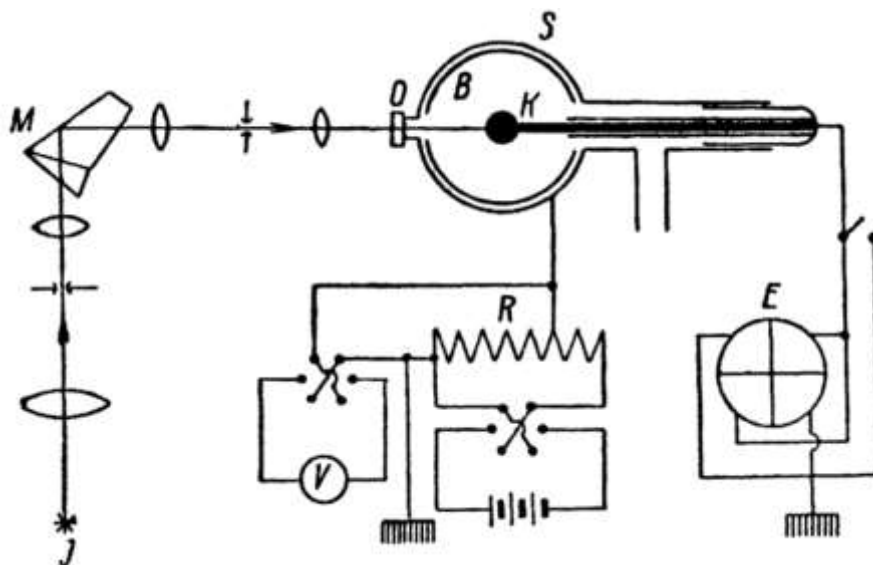
Tap sonday jollar menen I_n toyınıw toǵınıń shamasınıń túsiwshi jaqtılıqtıń quwatına proporcionallıǵı túsindiriledi. Jaqtılıq aǵısınıń ulıwmalıq quwatı W nıń úlkeyiwi menen ayırım $\varepsilon = h\nu$ porciyalarınıń sanı da, demek, waqt birliginde julıp alınatuǵın elektronlardıń sanı n de ósedi. I_n niń shamasınıń n ge proporcional bolǵanlıǵına baylanıslı toyınıw toǵı I_n niń jaqtılıqtıń quwatı W ǵa proporcionallıǵı túsindiriledi.

(1)- Eynshteyn nızamınıń durıs ekenligin eksperimentlerde tekserip kóriwge boladı. (2)- hám (3)-formulalardı salıstırıp Plank turaqlısı h penen empirikalıq konstanta k nıń arasındadı mınaday baylanıstı tabamız:

$$h = ke. \quad (4)$$

Bul teńlikte e arqalı elektronnıń zaryadı belgilengen. Tájiriybeden k nıń mánisin anıqlap hám elektronnıń zaryadı e niń belgili bolǵan mánisin paydalanıp, olardıń kóbeymesiniń haqıyqatında da Plank turaqlısına teń ekenligin tekserip kóriwge boladı. (4)-qatnastıń durıs ekenligi Millikenniń birinshi ólshewleriniń ózinde-aq kelip shıqtı. Bul ólshewlerdiń nátiyjeleri 305-súwrette kórsetilgen. k konstantası $tg \alpha$ ge teń, α - (3)-tuwrı menen abscissa kósheriniń arasındadı múyesh. Bunnan tabılǵan k nıń mánisi qátelerdiń sheklerinde h/e qatnasına sáykes kelgen.

(4)-teńlikti dálirek tekseriw P.I.Lukirskiy menen S.S.Prilejaev tárepinen orındandı. Olar Stoletovtan baslap barlıq eksperimentatorlar paydalanǵan tegis kondensatordı sferalıq kondensator menen almastırdı.

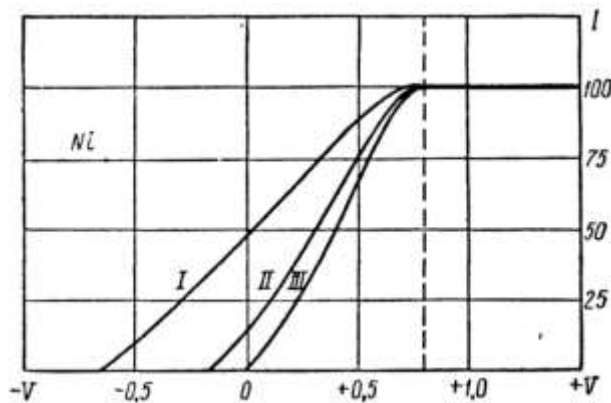


307-súwret. P.I.Lukirskiy menen S.S.Prilejaevlar tájiriybesiniń sxeması.

Lukirskiy menen Prilejaev paydalanǵan dúzilistiń ulıwma túri 307-súwrette keltirilgen. Bul súwrette S - ishi gúmislenegen shıyshe shar, ol B sferalıq kondensatordıń sırtqı elektrodı bolıp xızmet etedi. Ishki elektrod sıpatında izertlenetuǵın metaldan soǵılǵan K sharıǵı xızmet etedi. Bul sharıq O kvarc aynası arqalı jaqtılandırılǵan. Jaqtılıqtıń deregi sıpatında sıızılıq spektrdi beretuǵın J sinap lampası xızmet etedi. Usı derekten shıqqan jaqtılıq ayırım spektrallıq sıızılıq ajratıp alıw ushın xızmet etetuǵın M kvarc monoxromatorı arqalı ótedi. K sharıǵı kvadrant elektrometri menen tutastırılǵan. K sharıǵı menen B sferasınıń arasında potenciometrdiń járdeminde hár qıylı shama menen belgidegi potenciallar ayırması túsirilgen hám onıń mánisi V voltmetriniń járdeminde ólshengen. B elektrodı K sharıǵın qorshap turatuǵın bolǵanlıqtan usı K sharıǵınen julıp alınǵan barlıq elektronlar tezletiwshi potencial bolmaǵan jaǵdayda da B elektrodına jetip keledi. Nátiyjede K sharıǵı menen B elektrodınıń arasındadı potenciallar ayırması nolge teń

bolğan jaǵdayda da toyınıw toǵınıń I_t mánisi alınǵan. Bul jaǵday irkiwshi potencial V_{ir} dıń haqıyqıy mánisin anıqlawda kiyınshılıq payda etetuǵın elektrodlardıń arasındaǵı kontaktlıq potenciallar ayırmasınıń tutqan ornı joq etildi. Sferalıq kondensatordıń bunnan basqa artıqmashlıǵı onıń menen islegende irkiwshi potencialdıń ósiwi menen toq kúshiniń kishireyiwi keskin túrge iye boladı; bul $I = 0$ teńligi orınlangandaǵı $V = V_{ir}$ mánisin dál anıqlawǵa múmkinshilik beredi. 308-súwrette nikel ushın alınǵan voltamperlik xarakteristikalar kórsetilgen. Iymeklikler nikelden soǵılǵan K sharigin hár qıylı bolğan tolqın uzınlıqlarına iye jaqtılıq penen jaqtılandırılǵanlıqqa sáykes keledi. Barlıq búl iymeklikler ushın toyınıw toǵı $V = +0,8$ V shamasındaǵı potenciallar ayırmasında alınadı. Bul shama nikel elektrodı K menen gúmis elektrod B nıń arasındaǵı kontaktlıq potenciallar ayırmasına teń $0,8$ V shamasın voltmetrdiń barlıq kórsetiwlerinen alıp taslap, irkiwshi potencialdıń haqıyqıy mánisin alıwǵa boladı. Usıǵan sáykes keletuǵın iymeklikler $Al, Zn, Sn, Cd, Pb, Cu, Pt$ hám Ag ushın da alındı. Jaqtılıqtıń hár qıylı jiyiliklerindegi irkiwshi V_{ir} potencialınıń mánisleri boyınsha k konstantasınıń mánisleri alındı hám bunnan (4)-teńliktiń tiykarında Plank turaqlısı h tıń mánisi esaplandı; onı anıqlawdaǵı qáteliktiń shaması $0,2$ procenttiń átirapında boldı. Usınday dáliliktiń sheklerinde h tıń mánisi basqa usıllar menen alınǵan mánis penen sáykes keledi.

Eynshteynniń (1a) formulasınan elektronnıń metaldan shıǵıw jumısı A nı anıqlawǵa da boladı. Bunnan tabılǵan shıǵıw jumısıń mánisleri ($2 \sim 6$ eV) termoelektronlıq emissiyanıń tiykarında alınǵan shamalarǵa jaqsı sáykes keledi. (II tom, 172-paragraf).



308-súwret.
Ni ushın voltamperlik xarakteristikalar.

Irkiwshi potencialdıń shaması úlkeygende voltamperlik xarakteristikalarıdaǵı iymekliklerdiń ástelik penen tómenelewı (308-súwret) barlıq elektronlardıń (1)-Eynshteyn formulası boyınsha anıqlanǵan tezlikler menen julıp alınbaytuǵınlıǵın ańǵartadı. Elektronlardıń kópshiligi deneden kishi tezlik penen ushıp shıǵadı. Bul jaqtılıqtıń elektronlardı bettiń tek ózinen emes, al bazı bir tereńlikten julıp alıwı menen baylanıslı. Bunday jaǵdayda elektronlar deneniń betine jetemen degenshe energiyasınıń bir bólimin joǵaltadı. Bunday kóz-qaras juqa qatlamlardaǵı fotoeffektke baqlawlarda tastıyqlanadı. Eger júdá juqa túrdegi metaldı alatuǵın bolsaq (qalırlıǵı shama menen $10^{-6} - 10^{-7}$ sm), onda tezlikler boyınsha bir teklirek bolǵan fotoelektronlar alınadı.

§ 335. Jaqtılıqtıń korpuskulalıq qásiyetleri. Bunnan burınǵı paragrafta biz fotoelektronlardıń empirikalıq tezliginiń jiyilik ν den gárezligin jaqtılıqtıń tolqınlıq teoriiyası menen túsindiriwde payda bolatuǵın qiyınshılıqtı kórsetken edik. Eger deneni jaqtılandırıwdıń bası menen elektronlardıń payda bolıwınıń arasındaǵı keshigiwdiń joq ekenligine diqqat awdarsaq, onda jaqtılıqtıń tábiyatına tolqınlıq kóz-qaraslardıń kemshiligi jáne de keskin túrde kórinedi. Fotoelektronnıń julıp alınıwı hám onıń ushın atomnıń $\varepsilon = h\nu$ energiyanı toplawı ushın zárúrli bolǵan waqıttıń shaması kishi jaqtılandırǵanda úlken bolıwı kerek. Haqıyqatında da, tolqınlardıń energiyanı alıp júriwinde energiya tıǵızlıǵı boyınsha (turaqlı amplitudada) barlıq tolqın frontı boylap teń ólshewli tarqalǵan. Eger elektromagnit tolqınıń jolında vibrator jaylastırılǵan bolsa,

onda elektrodinamikada usı vibrator jutqan energiyanıń muǵdarı betiniń maydanı $\Delta S = \lambda^2$ shamasına teń bolǵan (λ - tolqın uzınlıǵı) bettiń elementi arqalı alıp júrilgen energiyaǵa teń. Bunday kóz-qaraslardan atomnıń elektrondı shıǵarıwı hám onnan keyin sol elektrongá $h\nu$ energiyasın beriwı ushın jetkilikli bolǵan energiyanı qanday waqıttıń ishinde toplaytuǵınlıǵın esaplaymız. Meyli, u jaqtılıq energiyasınıń aǵısınıń tıǵızlıǵı, yaǵnıy maydanı bir birlikke teń bolǵan bet arqalı waqıt birliginde alıp ótiletuǵın energiyanıń muǵdarı bolsın. Bunday jaǵdayda, joqarıda ayılǵanlar boyınsha atom t waqtınıń ishinde $u\Delta St = u\lambda^2 t$ shamasına teń energiyanı jutadı. Usı energiyanıń esabınan fotoelektronnıń ushıp shıǵıwı ushın onıń shaması $\varepsilon = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$ energiyasın jutıwı, yaǵnıy mınaday teńliktiń orın alıwı kerek:

$$u\lambda^2 t = h\frac{c}{\lambda}.$$

Bunnan t waqtı ushın

$$t = \frac{hc}{\lambda^3 u} \quad (1)$$

teńligine iye bolamız.

Tolqın uzınlıǵı $\lambda = 4000 \text{ \AA}$ bolǵan fiolet jaqtılıqta aǵıstıń $u = 10^{-6} \text{ erg/sm}^2\cdot\text{sek}$ tıǵızlıǵında fotoeffekt ańsat baqlanadı. λ menen u dıń bul mánislerin (1)-teńlikke qoysaq hám Plank turaqlısınıń belgili bolǵan $h \cong 6,6 \cdot 10^{-27} \text{ erg}\cdot\text{sek}$ mánisin, al boslıqtaǵı jaqtılıqtıń tezliginiń $c = 3 \cdot 10^{10} \text{ sm/sek}$ shamasın paydalansaq, onda t ushın

$$t = \frac{6,6 \cdot 10^{-27} \cdot 3 \cdot 10^{10}}{(4 \cdot 10^{-5})^3 \cdot 10^{-6}} \text{ sek} = 3 \cdot 10^3 \text{ sek} = 50 \text{ min}$$

shamasın alamız.

Solay etip, atomnıń fotoelektronı shıǵarıwı ushın ol biz qarap atırǵan jaǵdayda energiyanı 50 min tıń ishinde jıynawı kerek boladı. Fotoeffekt processiniń barlıǵı bılayınsha júzege kelgen bolar edi: dáslep, uzaq waqtıń ishinde fotoelektronlar pútkilley payda bolmaydı; bunnan keyin kóp sanlı atomlar birden elektronlardı shıǵarıwı kerek. Haqıyqatında process pútkilley basqasha júredi: birinshi elektronlar jaqtılandırılıw baslanǵannan keyin is júzinde hesh qanday keshikpey payda boladı; bazı bir waqıt ishinde julıp alınǵan fotoelektronlardıń energiyasınıń muǵdarı fotoeffektte payda etken jaqtılıq energiyasınıń tolıq muǵdarına teń. Jaqtılıq energiyasınıń úziksiz tolqınlıq process penen alıp júriliwi haqqındaǵı kóz-qaraslardı saqlaw ushın bir elektronlardan basqa elektronlarǵa energiyanıń alıp beriliwiniń mexanizminiń bar ekenligi yamasa fotoelektronlardıń energiyası túsken jaqtılıqtıń energiyasınıń esabınan emes, al atomlardadı qanday da bir ishki dereklerdiń esabınan ekenligi haqqındaǵı jasalma gipotezalarđı oylap tabıw kerek bolar edi. Sońǵı jaǵdayda jaqtılıqtıń tutqan ornı atomdaǵı bazı bir "tetiklik mexanizmdi" iske qosıwdan ibarat boladı. Bul gipotezalarđı paydalanıwǵa bolmaydı, sebebi fotoelektronlardıń energiyası fotoeffektte beretuǵın zattıń tábiyatınan pútkilley ǵárezsiz, al tolıǵı menen túsiwshi jaqtılıqtıń jiyiligi boyınsha anıqlanadı.

Joqarıda ayılǵan jaǵdaylardı juwmaqlay kele, biz mınalardı aytıwımız múmkin: fotoelektrlik process jaqtılıq energiyası ayırım bóleksheler tárepinen alıp kelinetuǵınday bolıp kórinedi. Eger bólekshe atomǵa "kelip tússe", ol oǵan óziniń energiyasın tolıǵı menen beredi. Atap aytqanda jaqtılıqtıń usınday tábiyatı haqqındaǵı tap usınday gipoteza Eynshteyn tárepinen usınıldı. Ol jaqtılıqtı ayırım bólekshelerdiń aǵısı bolıp tabıladı dep boljadı. Bul jaqtılıq bóleksheleri dáslep jaqtılıq kvantları dep ataldı; házirgi waqıtları fotonlar ataması qalıplesti. Fotonnıń energiyası $\varepsilon = h\nu$ ge teń. Solay etip, fotonlar, jaqtılıqtıń jiyiligine baylanıslı hár qıylı energiyaǵa iye boladı. Uzaq infraqızıl nurlarǵa sáykes keletuǵın fotonlar kishi energiyaǵa iye boladı (úlken λ ler, kishi ν ler), al rentgen nurlarına sáykes keletuǵın fotonlar úlken energiyaǵa iye boladı. Usıǵan baylanıslı jaqtılıqtıń korpuskulalıq qásiyetleri uzın tolqınlı nurlanıw ushın ázzi baqlanadı hám júdá kishi tolqın uzınlıqlarında korpuskulalıq qásiyet sezilerliktey kórinedi (rentgen nurları, radioaktiv elementlerdiń γ -nurları). $\varepsilon = h\nu$ qatnastan kelip shıqqan halda tolqın uzınlıǵı $\lambda = 10 \text{ mkm}$ bolǵan

infraqızıl nurlarğa fotonlardır $\varepsilon \cong 2 \cdot 10^{-13}$ erg, kózge kórinetuğın nurlar ushın ($\lambda = 5000 \text{ \AA}$) fotonlardır $\varepsilon \cong 4 \cdot 10^{-12}$ erg, aqırında tolqın uzınlıǵı $0,1 \text{ \AA}$ bolğan rentgen nurlarına fotonlardır salıstırmalı úlken $\varepsilon \cong 2 \cdot 10^{-7}$ erg energiyası sáykes keledi.

Salıstırmalıq teoriyası boyınsha massası nolge teń bolmağan bóleksheniń tezligi jaqtılıqtır tezligine jaqınlasqanda onıń energiyasınıń shaması sheksizlikke shekem úlkeyedi. Jaqtılıqtır tezligindey tezlik penen qozǵalatuğın fotonnıń energiyası shekli bolğanlıqtan fotondı nollik massaǵa iye dep esaplaw kerek. Bul juwmaq paradokslıq xarakterge iye emes, sebebi foton tınıshlıqta turatuğın esaplaw sisteması bolmaydı.

Energiya menen qozǵalıǵı muǵdarınıń arasındaqı qatnastı paydalanıp biz fotonnıń qozǵalıǵı muǵdarı p_f ushın ańlatpanı da taba alamız. 301-paragraftaǵı (7)-formulada $m_0 = 0$ dep boljap $p_f = \frac{\varepsilon}{c} = \frac{h\nu}{c}$ ańlatpasın alamız.

Eń aqırında fotonnıń tómendegidey shamalar menen táriyipleytuǵınlıǵın ańǵaramız:

1) energiyası menen

$$E_f = \varepsilon = h\nu;$$

2) qozǵalıǵı muǵdarı menen

$$p_f = \frac{h\nu}{c}.$$

Fotonlardır qozǵalıǵı muǵdarınıń bolatuǵınlıǵı jaqtılıqtır basımınıń bar ekenligine baylanıslı tikkeley kórinedi.

260-paragrafta P.N.Lebedevtiń jaqtılıqtır basımın ólshew boyınsha ótkergen tájiriybelerin táriyiplegende, biz jaqtılıq aǵısınıń kólem birliǵı ushın $k = w/c$ qozǵalıǵı muǵdarına iye bolıwınıń kerek ekenligin kórsetken edik, bul teńlikte w arqalı jaqtılıq energiyasınıń kólemlik tıǵızlıǵı, c arqalı jaqtılıqtır boslıqtaǵı tezligi belgilengen. Bul qatnas fotonlardır joqarıda ayılğan qásiyetlerinen tikkeley kelip shıǵadı. Haqıyqatında da, eger kólem birligindegi fotonlardır sanı n_0 bolsa, onda olardıń energiyası $w = n_0\varepsilon = n_0h\nu$ shamasına teń boladı. Sonlıqtan jaqtılıq aǵısındaǵı ulıwmalıq qozǵalıǵı muǵdarı mınaǵan teń boladı:

$$k = n_0p_f = n_0 \frac{h\nu}{c}.$$

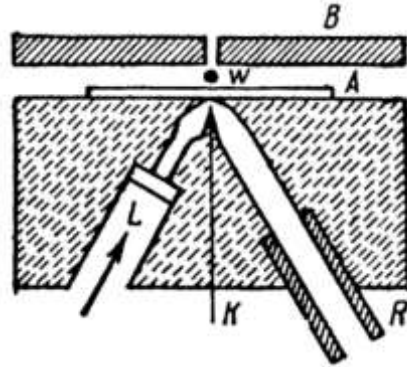
w menen k ushın jazılğan ańlatpalardı salıstırıwdan, mınanı alamız:

$$k = \frac{w}{c}.$$

Jaqtılıqtır korpuskulalıq qásiyetleri kóp sanlı tájiriybelerde, olardıń ishindegi kóp sanlı tájiriybeler sovet fiziklerine tiyisli. A.F.Ioffeniń shań bólekshelerindegi fotoeffektı baqlaw boyınsha ótkerilgen tájiriybeleri atomlardır energiyası toplawı ushın belgili waqtıtır bolmaytuǵınlıǵın ayqın túrde kórsetti (333-paragraf). SHań bólekshesinen elektronlardır ushıp shıǵıwı birinen soń biri tosınnan júzege keledi. Tap sol sıyaqlı tosınnan bolatuğın terbelisler menen jaqtılandırıwdır bası menen birinshi elektronnıń ushıp shıǵıwınıń arasındaqı waqtıtır uzaqlıǵı da anıqlandı. Qubılıs shańnıń bólekshesine bóleksheniń - fotonnıń tosınnan túsetuǵınlıǵı haqqındaǵı boljawǵa sáykes keldi. Bunnan keyin ótkerilgen tájiriybelerde, olardıń ishinde A.F.Ioffe menen N.I.Dobronravovlardır rentgen nurlarınıń tásirindegi shań bólekshesindegi fotoeffektı baqlaw boyınsha ótkerilgen tájiriybelerinde fotonlar haqqındaǵı gipotezanıń durıs ekenligi onnan da kórgizbeli túrde kórsetildi. Joqarıda kórsetilip ótilgenindey, rentgen nurlarınıń fotonları úlken energiyaǵa iye boladı hám sonlıqtan olar menen eksperimentlerdi ótkeriw jaqtılıq tolqınları menen eksperimentlerdi ótkeriwge qaraǵanda artıqmashlıqlarǵa iye.

Ioffe menen Dobronravovtıń tájiriybesiniń sxeması 309-súwrette keltirilgen. Qalıń ebonit plastinkada quwıslıq islenip, usı quwıslıqtan R nayı arqalı hawa sorıp alınğan. Bul quwıslıq miniatyuralıq rentgen trubkasınıń xızmetin atqaradı. Katod xızmetin kvarctan soǵılğan L aynası arqalı ultrafiolet nurlar menen jaqtılandırılatuğın jıńışke alyuminiy simnıń K ushı, al antikatodtıń

xızmetin jıńışke A alyuminiy plastinkası xızmet etti. K sımınıń ushınan ushıp shıqqan fotoelektronlar usı sim menen A plastinkasınıń arasına túsirilgen potenciallar ayırması 12 000 V bolǵan maydanniń tásirinde tezletilgen. A plastinkasına urılıp, elektronlar tormozlanadı hám rentgen nurların shıǵaradı. Plastinkadaǵı nurlardıń jutılıwı kishi, sonlıqtan olar plastinka arqalı derlik erkin ótedi. K sımı ultrafiolet nurlardıń hálisiz aǵısı menen jaqtılandırılǵan hám ol 1 sekundtıń ishinde shama menen 1000 elektrondı bergen. Bul elektronlar A plastinkasına urılıp, 1 sekundtıń ishinde rentgen impulsleriniń tap sonday sanan beredi.



309-súwret.

A.F.Ioffe menen N.I.Dobronravovtıń tájiriybesiniń sxeması.

A alyuminiy plastinkası hám ekinshi, oǵan parallel bolǵan B plastinkası tegis kondensatordı payda etedi. Onıń ishinde A antikatodtan shama menen 0,02 sm ge teń d qashıqlıǵında radiusı $3 \cdot 10^{-5}$ sm bolǵan W vismut shańnıń bólekshesi ildirilip turdı.

Ayırım waqıtları shańnıń bólekshesi oǵan túsetuǵın rentgen nurlarınıń tásirinde fotoelektronnıń joǵalıwınıń saldarınan teń salmaqlıq haldan shıǵadı. Ortasha, fotoelektronnıń joǵalıwı ortasha 30 minuttıń ishinde bir ret júzege kelgen. Bul eksperimentallıq nátiyje jaqtılıqtıń tábiyatı haqqında korpuskulalıq kóz-qarasqa dál sáykes keledi. Haqıyqatında da, korpuskulalıq kóz-qarastan hár bir rentgen impulsı iqtıyarlı baǵıtta ushıratuǵın foton bolıp tabıladı. Eger shańnıń bólekshesi foton payda bolǵan orınnan $\Delta\omega$ denelik múyesh penen kórinetuǵın bolsa, onda ushıp shıǵatuǵın fotonlardıń ulıwmalıq sanı n nen oǵan sanı

$$n' = n \frac{\Delta\omega}{4\pi}$$

shamasına teń foton kelip túsedi.

Meyli, baqlawlar t waqıttıń ishinde ótkeriletuǵın bolsın hám waqıt birliginde payda bolǵan fotonlardıń sanı n_0 ge teń bolsın. Bunday jaǵdayda

$$n' = n_0 t \cdot \frac{\Delta\omega}{4\pi}$$

teńligine iye bolamız.

Bunnan shańnıń bólekshesine fotonlardıń eki ret túsiwiniń arasındaqı waqıt $\bar{\tau}$ ushın mınaday shamalı alamız:

$$\bar{\tau} = \frac{t}{n'} = \frac{4\pi}{n_0 \Delta\omega}. \quad (2)$$

Denelik múyesh $\Delta\omega = \pi r^2 / d^2$, bul teńlikte r - shań bólekshesiniń radiusı hám d - shań bólekshesi menen foton payda bolǵan orınǵa shekemgi qashıqlıq (A alyuminiy plastinkaǵa shekem). $\Delta\omega$ nıń bul mánisin (2)-teńlikke qoyıp,

$$\bar{\tau} = \frac{4d^2}{n_0 r^2}$$

teńliginiń orınlı ekenligin tabamız. Biz qarap atırǵan jaǵdayda $n_0 = 1000$, $r = 3 \cdot 10^{-5}$ hám $d = 2 \cdot 10^{-2}$ sm, bunnan $\bar{\tau}$ ushın

$$\bar{\tau} = \frac{16 \cdot 10^{-4}}{10^3 \cdot 9 \cdot 10^{-10}} \text{ sek} \cong 1,8 \cdot 10^3 \text{ sek} = 30 \text{ min.}$$

Awır element bolğan vismut ushın hár bir túsetuǵın fotondı jutiladı hám hár bir jutilıwdıń fotoelektronnıń payda bolıwına alıp keledi dep esaplawǵa boladı. Bunnan, tájiriybeniń nátiyjeleri menen tolıq sáykeslikte fotoelektronnıń ortasha 30 minutta bir ret payda bolıwınıń kerek ekenligi kelip shıǵadı. Hár bir fotoelektronnıń energiyası $\varepsilon = h\nu$ ge teń.

Tolqınlıq teoriyanıń kóz-qarası boyınsha loffe menen Dobronravovtıń tájiriybesiniń nátiyjeleri pútkilley túsiniksiz. Rentgen fotonınıń energiyasınıń sferalıq front boyınsha shań bólekshesine túsetuǵın hám shaması fotonnıń ulıwma energiyasınıń $\frac{\Delta\omega}{4\pi} \cong 5 \cdot 10^{-7}$ úlesine teń energiyaǵa iye shań bólekshesiniń quramına kiretuǵın kóp sanlı elektronlardıń arasında tarqalıwı da kerek. Demek, energiyanı toplaw ushın úlken waqıt yamasa barlıq elektronlar ózleriniń energiyasın túsiniksiz bolğan sebepke baylanıslı bir elektrongá beriwı kerek.

Jaqtılıqtıń fotonlıq teoriyasın tastıyıqlaytuǵın basqa zor tájiriybeler *ázzi jaqtılıq aǵıslarınıń fluktuaciyların* baqlawǵa tiyisli.

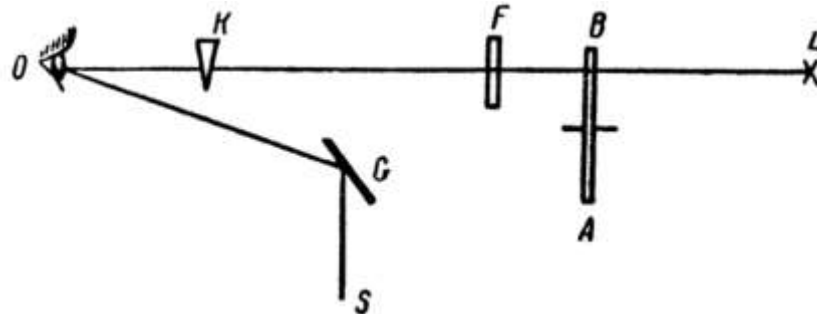
I tomnıń 76-paragrafında biz fizikalıq processlerdiń úzlikligi "qaltırarǵa" - fizikalıq shamalardıń fluktuaciylarına alıp keletuǵınlıǵın kórdik. Misalı, atomlardıń tártipsiz qozǵalısqazdıń shańnıń kishi bólekshesine túsiriletuǵın basımnıń fluktuaciyların júzege keltiredi; anodqa jetip baratuǵın elektronlardıń ortasha sanınıń tosınnan bolatuǵın awıttıqları katod trubkalarındaǵı ázzi toqlardıń flukciyaaciyların payda etedi. Tap sol sıyaqlı júdá ázzi bolğan jaqtılıq aǵısınıń quwatı usı aǵıstıń ayırım jaqtılıq bóleksheleri - fotonlardan payda bolatuǵın bolǵanlıqtan óziniń ortasha mánisinen úzliksiz awısıwın kórsetiwı kerek.

Ázzi jaqtılıq aǵıslarınıń fluktuaciyları birinshi ret vizualıq usıl menen tabıldı hám S.I.Vavilov hám onıń xızmetkerleriniń bir toparı tárepinen úyrenildi.

306-paragrafta biz gewgimge kóriwge adaptaciyalanǵan kózdıń kóriw seziminiń turaqlı bosaǵasına iye bolatuǵınlıǵın kórdik. Bunday bosaǵaǵa júdá kishi quwat sáykes keledi. Eń kúshli sezgirlik oblastında bul quwatıń mánisi $4 \cdot 10^{10} \text{ erg} \cdot \text{sek}^{-1}$ shamasına teń. Bul 1 sekunda 100 fotonnıń túsiwine sáykes keledi. Bul san kózdıń sırtındaǵı tınıq qatlamǵa (rogovicaǵa) kelip túsetuǵın fotonlardıń sanına teń. Kózdegi shaǵılıswdıń hám jutilıwdıń saldarınan setchatkaǵa kelip jetetuǵın fotonlardıń sanı onnan da az. Solay etip, kóriw seziminiń bosaǵasına fotonlardıń salıstırmalı kóp bolmaǵan sanı sáykes keledi, hám bul san ádewir úlken fluktuaciylarǵa ushırawı kerek. Eger kózge ortasha bir sekundtıń ishinde 100 foton kelip túsetuǵın hám bul kózdıń sezgirliginiń bosaǵasına sáykes keletuǵın bolsa, onda, álbette ayırım sekundlardıń ishinde 100 den aslam fotonnıń (misalı 110 fotonnıń) yamasa kemirek (misalı 90 fotonnıń) kelip túsiwi múmkin. Sońǵı jaǵdayda kóz jaqtılıqtı sezbeydi. Bunnan, kóriw seziminiń bosaǵasınıń qasında jaqtılıq aǵısınıń fluktuaciylarına baylanıslı ózine tán "jıltıldınıń" baqlanıwı kerek. Bunday jıltıldılar S.I.Vavilov hám onıń oqıwshıları tárepinen haqıyqatında da tabıldı.

Óziniń tájiriybelerinde kózdıń kóriw sezimin irkiwi uqıplıǵı hám basqa da sebeplerge baylanıslı S.I.Vavilov úzliksiz aǵıslardı baqlaǵan joq, al ayırım tutanıwları (vspıchkalardı) baqladı. Fotonlardıń sanınıń fluktuaciylarınıń saldarınan kóriw seziminiń bosaǵasınıń qasında barlıq tutanıwlar baqlanbaydı, al olardıń ayırımları baqlanadı. Vavilov paydalanǵan fotometrlaw (307-paragraf) ushın arnalǵan dúzilistiń sxeması 310-súwrette kórsetilgen. 306-paragrafta biz gewgimdegi kóriwdiń periferiyalıq ekenligin kórsettik. Sonlıqtan O kóz jaqtılıǵı G aynasında shaǵılısqan ázzi derekke qaray baǵdarlanǵan. Jaqtılıq L lampasınan kózdıń setchatkasınıń periferiyalıq bólimine túsken. LO dástesiniń jolında bir sekunda bir ret aylanatuǵın tesigi bar AB disk jaylastırılǵan. Tesiktiń ólshemleri bir aylanıwdıń barısında jaqtılıq 0,1 sek dawamında túsetuǵın hám 0,9 sek dawamında irkiletuǵınday etip islengen. F filtriniń járdeminde spektrdiń izertlenetuǵın bólimi (jasıl) ajratılıp alınǵan. K sinası kózge túsetuǵın aǵıslardı retlewge múmkinshilik beredi. Baqlawshı tutanıwdı kórgen waqıtta knopkanı basadı hám usınıń nátiyjesinde qozǵalıwshı lentada

belgi túsirilgen. Tap sol lentada disktiń hár bir aylanıwı da esapqa alınǵan. Usınıń nátiyjesinde baqlawshınıń tutanıwdı baqlaǵanı belgilengen. Bunday jaǵdayda kózge túsetuǵın júdá kishi bolmaǵan aǵısta baqlawshı hár bir tutanıwdı belgileydi. K sinasın kirizizgende hám aǵıstıń quwatı júdá kishi bolǵanda baqlawshı barlıq tutanıwları belgilemeydi. Bul ayırım tutanıwlarıdaǵı fotonlardıń sanınıń fluktuacıyalarınń sebebinen júzege keledi: bir jaǵdayda fotonlardıń sanı kóriw sezimin payda etiw ushın jetkilikli, al ekinshi jaǵdaylarda olardıń sanı júdá az. Solay etip, jaqtılıq fluktuacıyalarınń bar ekenligi tikkeley baqlanadı.



310-súwret. S.I.Vavilovtıń jaqtılıq aǵısınıń fluktuacıyaların baqlaw boyınsha ótkergen tájiriybesiniń sxeması.

Kóp sanlı baqlawları sanlıq jaqtan qaytadan islew fluktuacıyaları statistikalıq esaplawlardıń nátiyjeleri menen jaqsı sáykes keledi.

Vavilovtıń usılı ayırım jaqtılıq dástesi menen bunnan keyin de bir qatar tájiriybelerdi ótkeriwge hám alınǵan nátiyjelerdi tolqınlıq teoriyanıń nátiyjeleri menen salıstırıp kóriwge múmkinshilik beredi. Tolqınlıq teoriya boyınsha eki kogerentli dáste barlıq waqıtta bir oraydan shıǵarılǵan, Biraq hár qıylı jolları ótken terbelislerden payda boladı (261-paragraf). Demek, tolqınlıq kóz-qaras boyınsha kogerentli dástelerdegi terbelisler bir birinen ǵárezsiz emes. Vavilov AB diski arqalı ótetuǵın dásteni Frenel biprizmasınıń (261-paragraf) járdeminde ekige bóldi (310-súwret). Olar eki baqlanatuǵın tutanıwlar oblastların berdi. Bul eki dásteniń fluktuacıyaları pútkilley bir birinen ǵárezsiz bolıp shıqtı. Biraq usı jaǵdayǵa qaramastan, eger bul dástelerdi qossa, olar interferenciyanıp, jaqtılı hám qarańǵı jolaqlardıń sistemasın beredi.

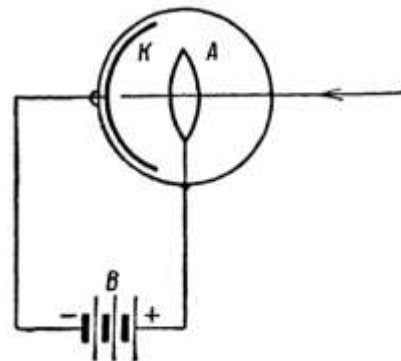
Baska tájiriybe Vollaston prizmasınıń járdeminde alınǵan eki dásteni salıstırıwǵa tiyisli (290-paragraf). Bul jaǵdayda eki dástedegi jaqtılıq bir birine perpendikulyar tegisliklerde sızıqlı polarizaciyanıń. Tolqınlıq kóz-qarastan Vollaston prizmasınıń járdeminde alınatuǵın sızıqlı polarizaciyanıń nurlar terbelislerdi qurawshılardı jayıwdıń nátiyjesinde alınadı. Demek, bul jaǵdayda eki dástedegi terbelisler de ǵárezsiz emes. Al Vavilov tájiriybeleri bolsa bul jaǵdayda eki dásteniń bir birinen ǵárezsiz fluktuacıyanatuǵınıń kórsetti.

Joqarıda keltirilgen tájiriybelerden jaqtılıqtıń korpuskulalıq qásiyetlerge iye ekenligin pútkilley ayqın kórinedi. Biraq, bul eski "aǵıw" teoriyasına qaytıwdı (250-paragraf) hám tolqınlıq kóz-qaraslardan tolıq bas tartıwdı ańǵartpaydı. Interferenciya hám difrakciya qubılısları tek dáwirli tolqınlıq processtiń járdeminde ǵana túsindiriliwi múmkin. Biziń 250-paragrafta atap ótkenimizdey, jaqtılıq bir waqıtta tolqınlıq hám korpuskulalıq qásiyetlerge iye boladı. Bul qarama-qarsılıqlardıń dialektikalıq birliginiń zor mısalı bolıp tabıladı.

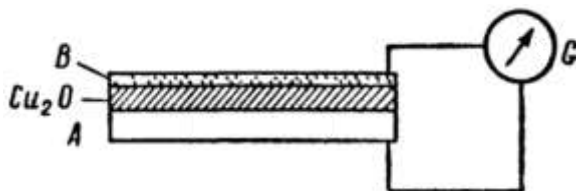
§ 336. Fotoeffekttiń ámeldegi qullanılauı. 306-paragrafta biz fotoelementlerdiń jaqtılıq aǵısların registraciylaw hám ólshew ushın paydalanıwǵa bolatuǵınıń kórsettik. Házirgi waqıtları fotoelementler basqa bir qatar maqsetler ushın da qullanıladı: jaqtılıq signalizaciyasında, televideniye, sesli kinoda h.t.b. Vakuumlıq fotoelementtiń ápiwayı tipi 311-súwrette kórsetilgen. Fotoelement úlken bolmaǵan hawası sorıp alınǵan shıyshe ballonnan turadı. Onıń bir yarımınıń ishki tárepi jaqtılıqtı sezgish qatlam menen jabılǵan. Fotoelementtiń qanday spektrallıq oblastı ushın arnalǵanlıǵına baylanıslı hár qıylı qatlamlar paydalanıladı: gúmislegen, kaliyli, ceziyli, surma-ceziyli h.t.b. Bul qatlam katodtıń xızmetin atqaradı. Anod ádette A saqıynası túrinde soǵıladı. Katod penen anodtıń arasında B batareyasınıń járdeminde potencıallar ayırması qozdırıladı. Jaqtılandırıw bolmaǵan jaǵdayda fotoelementtiń shınjırında toq

payda bolmaydı. K fotokatodına jaqtılıq kelip túskende KAB shınjırında toq payda boladı. Vakuumlıq fotoelementlerdiń sezgirliǵı $10-15 \text{ mka/lm}$ shamasına shekem jetedi. Toqtıń kúshi menen (toyınıw toǵınıń kúshi menen) jaqtılandırıwdıń quwatınıń arasında qatań túrdeǵi proporcionallıq orın aladı.

311-súwret.
Fotoelement.



Geypara jaǵdaylarda fotoelement úlken emes basımdaǵı qanday da bir inert gaz benen toltırıladı. Bul fotoelementtiń sezgirliǵınıń joqarılawına alıp keledi, sebebi katod penen anodtıń arasındaǵı jetkilikli potenciallar ayırmasında hár bir fotoelektron gazdıń atomın ionlastırıp, soǵan sáykes artıqmash elektronlardı payda ete aladı. Gaz benen toltırılǵan fotoelementlerdiń sezgirliǵı 100 mka/lm shamasına jetedi. Házirgi waqıtları joqarıda táriyiplengen sırtqı fotoeffekt penen bir qatarda ishki fotoeffekt dep atalatuǵın fotoeffekt keń túrde paydalanıladı. Bul effekt jaqtılıqtıń tásirinde kristaldıń yamasa yarım ótkizgishtiń ishindeǵı *elektronnıń bosanıwına alıp* kelinedi. Bosanǵan elektron deneniń ishinde qalıp onıń elektr ótkizgishligin joqarılata aladı. Jaqtılandırǵanda elektr ótkizgishliktiń kúshli ósiwin selen beredi. Selen fotoelementler bir lyumenge bir neshe júz mikroamperge teń júdá joqarı sezgirlikke iye. Jabıwshı qatlamǵa iye bolǵan qattı fotoelementler ayrıqsha qızıǵıwdı payda etedi. Mısalı zakisli fotoelement ("kuproks") mısaldıń xızmetin atqara aladı. Onıń sxeması 312-súwrette kórsetilgen. Elektrodlardıń biri bolıp xızmet etetuǵın A mıs plastinkasına Cu_2O mistıń zakisiniń juqa qatlamı, al joqarısında móldir bolıwı ushın júdá juqa bolǵan qanday da bir metaldıń (mısalı altınıń) qatlamı otırǵızıladı. Bul B qatlamı ekinshi elektrodtıń xızmetin atqaradı. Eger eki elektrodtı elektr shınjırı menen tutastırsa hám Cu_2O qatlamın móldir elektrod arqalı jaqtılandırsa, onda ásbapta mistan mistıń zakisi tárepine qaray toq payda boladı. Ásbaptıń jumısı mınaǵan alıp kelinedi: jaqtılıqtıń tásirinde Cu_2O qatlamında fotoelektronlar ajralıp shıǵadı. Cu menen Cu_2O arasındaǵı shegaralıq qatlam tuwrılawshı qásiyetke iye: ol elektronlarǵa tek Cu_2O tárepinen Cu ǵa qaray ótiwge múmkinshilik beredi. Nátiyjede jaqtılıqtıń tásirinde ajralıp shıqqan elektronlar qatlam arqalı tek bir baǵıtta qozǵala aladı hám shınjırda toqtı payda etedi.



312-súwret.
Qattı mısalı zakisli fotoelement.

Mısalı zakisli fotoelementler menen bir qatarda kúkirtli-gúmisli, selenli-qorǵasındı hám tellurli-qorǵasın fotoelementler qollanıladı. Jabıwshı qatlamǵa iye bolǵan qattı fotoelementlerdiń sezgirliǵı 1000 mka/lm shamasına jetedi. Qattı fotoelementlerdiń ayırımları hátte alıs infrakızıl oblastqa shekem sezgir. Selenli-qorǵasın hám tellurli-qorǵasın fotoelementler tolqın uzınlıǵı $5,5 \text{ mkm}$ ge shekemgi radiaciyanı tabıwǵa múmkinshilik beredi. Jabıwshı qatlamǵa iye

fotoelementlerdiń ózgesheligi olardıń sırttan elektr qozǵawshı kúshin bermegen jaǵdayda da shıńırda toqtı beriwinde (shıńırǵa batareyalardı qosıwdıń keregi joq). Sonlıqtan olar jaqtılıq energiyasını elektr energiyasına aylandıratuǵın túrlendirgishler bolıp tabıladı. Biraq, olardıń paydalı tásir koefficientiniń shaması 2 procentten úlken emes.

§ 337. Rentgen nurlarınıń shashırawı. Klassikalıq kóz-qaraslar boyınsha rentgen nurları atomlardagı elektronlardıń májbúriy terbelislerin júzege keltire alatuǵın elektromagnit tolqınlar bolıp tabıladı. Sonlıqtan rentgen nurlarınıń shashırawı da kózge kórinetuǵın nurlardıń klassikalıq shashırawı nızamına baǵınadı dep kútiwge boladı. Bul nızamlardan (284-paragraf) mınalar kelip shıǵadı:

- 1) shashırawdı tolqın uzınlıǵı λ ózgermeydi;
- 2) shashırawdıń indikatrissası

$$I = I_0(1 + \cos^2 \varphi) \quad (1)$$

ańlatpasınıń járdeminde ańıqlanadı. Bul teńlikte φ arqalı túsiwshi hám shashıragan nurlardıń arasındagı múyesh belgilengen. Eksperimentallıq tekserip kóriwler (1)-qatnastıń tek júdá qısqa bolmaǵan rentgen nurları ushın orınlanatuǵınlıǵın kórsetedi; qısqasha tolqınlar ushın (1)-qatnastan ádewir awıtqıwlar orın aladı. Usınıń menen birge qısqa tolqınlı rentgen nurları shashıraganda olardıń tolqın uzınlıǵı ózgeredi dep juwmaq shıǵarıwǵa boladı (jutıw koefficientiniń ózgerisi boyınsha). Usınıń menen bir qatarda k shashıraw koefficientiniń shashırawshı elektronlardıń sanınan kútilgen ǵárezlikten bir qansha awıtqıwlar da orın aladı. Rentgen nurlarınıń shashıraw koefficienti k zattıń kólem birligindegi shashıratıwshı elektronlardıń koncentraciyası n_e ge proporcional bolıwı kerek.

$$n_e = Zn_0$$

teńligi orınlı bolǵanlıqtan (Z arqalı atomdagı elektronlardıń sanı, n_0 arqalı kólem birligindegi atomlardıń sanı belgilengen)

$$k \cong Zn_0 \quad (2)$$

teńligin jazıwǵa boladı.

Kólem birligindegi atomlardıń sanı zattıń tıǵızlıǵı ρ , onıń atomlıq salmaǵı A hám Avagadro sanı menen

$$n_0 = \frac{N\rho}{A}$$

ańlatpası boyınsha baylanısqa.

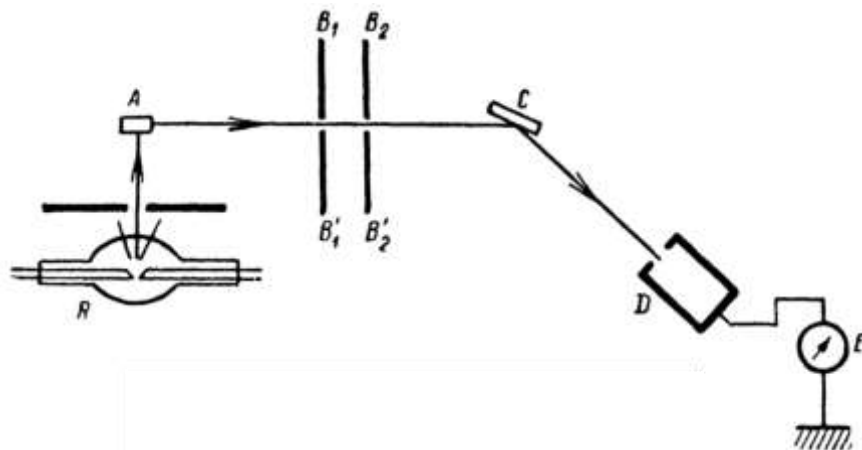
n_0 dıń bul mánisin (2) ge qoysaq, mınanı tabamız:

$$\frac{k}{\rho} \cong N \frac{Z}{A}. \quad (3)$$

Barlıq atomlar ushın $\frac{Z}{A}$ qatnası $\frac{1}{2}$ ge jaqın bolǵanlıqtan (368-paragrafqa qarańız), (3)-qatnastan $\frac{k}{\rho}$ shamasınıń barlıq zatlar hám barlıq tolqın uzınlıqları ushın shama menen turaqlı bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Bul juwmaqlırdıń eń sońǵısı orınlanbaydı: k/ρ qatnası tolqın uzınlıǵınıń úlkeyiwı menen ádewir úlkeyedi.

Rentgen nurlarınıń kútilgen nızamlıqlarǵa sezilerliktey baǵınbawı jańa eksperimentallıq baqlawlardıń ótkeriliwin talap etti. 1922-1923 jılları A.Kompton rentgen spektrografınıń járdeminde shashıragan rentgen nurlarınıń spektrallıq quramın izertledi. Kompton tájiriybesiniń sxeması 313-súwrette berilgen. Bul sxemada R - rentgen trubkası, A - shashıratıwshı zattıń bólegi, $B_1B'_1$ penen $B_2B'_2$ - shashıragın nurlardan jıńışke dásteni ayırıp alatuǵın diafragmalardıń sisteması. Bunnan keyin bul dáste C kristallı hám D ionizaciyalıq kamera bar rentgen spektrografına kelip túsedı. Eń dáslep *shashıragan nurda tolqın uzınlıǵı kelip túsiwshi nurlardıń tolqın uzınlıǵı λ ge teń nurlardıń da, sonıń menen birge $\lambda' > \lambda$ bolǵan tolqınlardıń da bar ekenligi kózge tústi*. Solay etip, ózgermeytuǵın tolqın uzınlıǵına iye klassikalıq shashıraw menen bir

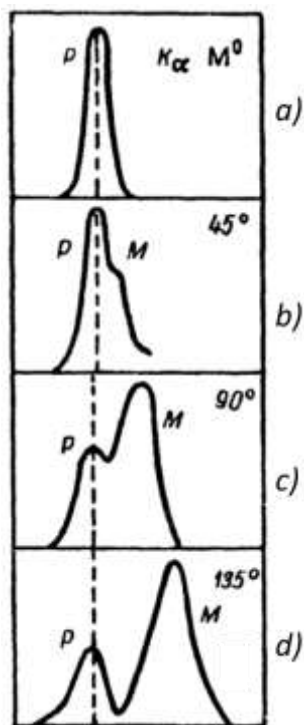
qatarda tolqın uzınlıǵı úlken tolqın uzınlıǵı tárepke qaray awısqa shashırar tolqınlardıń da bolatuǵınlıǵı anıqlandı. Shashırardıń bul jańa tipi Kompton qubılısı dep ataladı.



313-súwret. Kompton tájiriybesiniń sxeması.

Bunnan bılay ótkerilgen baqlawlar mınaday nızamlıqlardıń orınlanatuǵınlıǵın kórsetti:

- 1) nurlanıw kishi atomlıq salmaqqa iye zatlar ushın intensivli hám úlken atomlıq salmaqqa iye zatlar ushın ázzi;
- 2) shashırar múyeshiniń shaması úlkeygende komptonlıq shashırardıń intensivligi úlkeyedi (klassikalıq shashırardıń intensivligi shashırar múyeshiniń úlkeyiwi menen kishireyedi);
- 3) tolqın uzınlıǵınıń awısıwınıń shaması shashırar múyeshiniń shamasınan ġárezli, atap aytqanda onıń shaması shashırar múyeshi úlkeygende ósedi;
- 4) shashırardıń birdey múyeshlerinde awısıwdıń shaması barlıq zatlar ushın birdey.



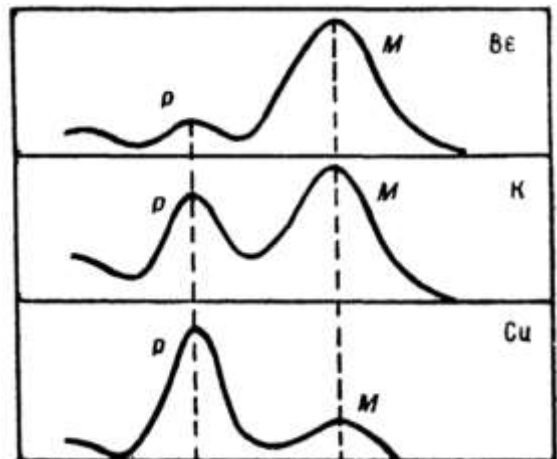
314-súwret.
Grafitten hár qıylı múyeshlerdegi rentgen nurlarınıń shashırarwı.

Bul nızamlıqlar 314-315 súwretlerde illyustraciyalanǵan. 314-súwrette rentgen nurlarınıń grafitten hár qıylı múyeshlerge shashırarwı kórsetilgen. Súwrettiń joqarǵı bóliminde molıbdenniń K_{α_1} sızıǵı dep atalatuǵın kontur súwretlengen. Onıń tolqın uzınlıǵı $\lambda = 0,7126 \text{ \AA}$; usı sızıqtıń jaqtılıǵı

menen grafittiń shashıratıwshı bólegi jaqtılandırıldı. 314-*b, c, d* súwretlerde grafitten 45° , 90° hám 135° múyeshterde shashıraǵan nurlardıń spektrallıq quramı kórsetilgen. Kórinip turǵanıday, múyeshtiń úlkeyiwi menen *M* awısqa qurawshısınıń intensivligi úlkeyedi; awısqa qurawshı *P* nıń intensivligi múyeshtiń ósiwi menen kemeyedi. 315-súwrette hár qıylı zatlarda birdey múyeshterde shashıraǵan nurlardıń spektrallıq quramı kórsetilgen. Dáslepki sızıq sıpatında tolqın uzınlıǵı $\lambda = 0,5627 \text{ \AA}$ bolǵan gúmistiń K_α sızıǵı xızmet etti. Jeńil zat bolǵan jaǵdayda (*Be*, atomlıq salmaǵı 8 ge teń) ózgermeytuǵın tolqın uzınlıǵına iye *P* sızıǵı júdá ázzi, al úlken múyeshter tárepke qaray awısqa *M* sızıǵı intensivli. Kaliy (atomlıq salmaǵı 39) *P* hám *M* sızıqları intensivligi boyınsha bir birinen az shamaǵa ayrıladı, mıs ushın (atomlıq salmaǵı 63) awısqa *M* sızıǵı ózgermeytuǵın tolqın uzınlıǵına sáykes keletuǵın *P* sızıǵınan kóp kishi.

Sızıqtıń awısıwınıń shamasınıń shashıratıwshı zattıń tábiyatınan ǵárezli emes bolıw shárti komptonlıq shashırax mexanizminiń atomlardıń individuallıq qásiyetlerinen ǵárezsiz ekenligin kórsetedi. Haqıyqatında da, eger Kompton qubılısın atomlar menen júdá ázzi baylanısqa elektronlardıń esabınan júzege keledi dep esaplasaq hám soǵan sáykes bul baylanıstı esapqa almasaq, onda onı túsindiriwdiń sáti tusedi. Bunday boljaw jeńil elementlerdiń awır elementlerge salıstırǵanda intensivli awısqa sızıqlardı beretuǵınlıǵına sáykes keledi. Jeńil elementlerde barlıq elektronlar ázzi baylanısqa, al awır atomlarda bolsa tek sırtqı elektronlar ázzi baylanısqa. Sonlıqtan awır elementlerde Kompton qubılısın júzege keltiretuǵın elektronlardıń salıstırmalı sanı jeńil elementlerge qaraǵanda kem.

315-súwret.
Hár qıylı zatlardıń rentgen nurların
shashıratıwı.



Eger 335-paragrafta kórsetilgen kóz-qarasta turatuǵın bolsaq, onda Kompton qubılısın sanlıq jaqtan tájiriyyede alınǵan maǵlıwmatlar menen tolıq sáykes keletuǵın etip túsindiriwge boladı: jaqtılıq energiyası $E_f = h\nu$ hám impulsı $P_f = \frac{h\nu}{c}$ bolǵan fotonlardıń aǵısı bolıp tabıladı. Bunday bóleksheler - fotonlardıń erkin elektronlar menen soqlıǵısıwında olar elektronlardan serpimli túrde tásirlesedi hám bul shashıraǵan nurlardıń payda bolıwına alıp keledi. Foton elektrongá kelip urılǵanda onıń energiyasınıń bir bólimi elektrongá beriledi. Sonlıqtan, shashıraǵan fotonnıń energiyası E'_f onıń dáslepki energiyasınan kishi boladı: $E'_f < E_f$. Shashıraǵan fotonnıń jıyılıǵı ν' onıń energiyası menen $h\nu' = E'_f$ qatnasınıń járdeminde baylanısqa. Bunnan $E'_f < E_f$ qatnasınan $\nu' < \nu$ yamasa $\lambda' > \lambda$ teńsizlikleri kelip shıǵadı. Bunnan Kompton qubılısında shashıraǵan nurlardıń tolqın uzınlıǵınıń kelip túsken nurlardıń tolqın uzınlıǵınan úlken bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı.

Fotonnıń elektron menen soqlıǵısıwı energiyanıń saqlanıw nızamı menen qozǵalıw muǵdarınıń saqlanıw nızamı orınlangan halda serpimli túrde boladı degen boljawda ótkerilgen esaplawlar mınaday nátiyjege alıp keledi:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2\alpha \sin^2 \varphi / 2. \quad (4)$$

Bul teńlikte $\alpha = h/m_0c$, al φ - shashıraw mýyeshi.

α shaması tek dúnyalıq konstantalar boyınsha ańlatılatuǵın bolǵanlıqtan (Plank turaqlısı h , elektronnıń tınıshlıqtaǵı massası m_0 hám jaqtılıqtıń tezligi c), onıń mánisi shashıratıwshı zattıń tábiyatınan ǵárezsiz Komptonlıq shashırawdıń sızıǵı kelip túsetuǵın nurdıń sızıǵına salıstırǵanda angstremlerdegi minaday shamaǵa jılǵıǵan ekenligi kelip shıǵadı:

$$\Delta\lambda = 0,0486 \sin^2 \varphi / 2. \quad (4a)$$

Jılǵıwdıń shaması $\varphi = \pi$ mýyeshinde shashıraǵan, yaǵnıy kelip túsiwshı nurlardıń baǵıtına kerı baǵıtta tarqalatuǵın shashıraǵan nurlar ushın maksimallıq mániske ($0,0486 \text{ \AA}$) jetedi. Tájiriybelerde alıńǵan maǵlıwmatlar júdá joqarı dálilikte (4a) formulasınıń durıs ekenligin tastıyıqlaydı. Kompton qubılısı fotonnıń erkin elektron menen serpimli soqlıǵısıwınıń nátiyjesinde júzege keledi degen boljaw tek kishireygen jiyilikke iye fotonnıń payda bolıwı kerek degen ǵana nátiyjege alıp kelmeydi. Soqlıǵısqanda fotonnıń energiyasınıń bir bólimi elektrongá beriledi hám usıǵan sáykes, elektron bazı bir qozǵalıw muǵdarın aladı. Solay etip, awısqa tolqın uzınlıǵı menen shashıraǵan nurlar menen bir qatarda tezletilgen elektronlar da payda boladı. Olardı tebiw elektronları dep ataydı.

Eger dáslepki fotonnıń energiyası $E_f = h\nu$ hám shashıraǵan fotonnıń energiyası $E'_f = h\nu'$ shamasına teń bolsa, onda energiyanıń saqlanıw nızamı boyınsha elektron alǵan energiya E_e niń mánisi

$$E_e = E_f - E'_f$$

shamasına teń boladı. Bunnan tebiw elektronınıń energiyası E_e niń dáslepki elektronnıń energiyası $E_f = h\nu$ niń qatnası ushın minanı tabamız:

$$\frac{E_e}{h\nu} = \frac{\nu - \nu'}{\nu} = \frac{\lambda' - \lambda}{\lambda'} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda + \Delta\lambda}.$$

Bul ańlatpaǵa $\Delta\lambda$ shamasınıń (4)-ańlatpa boyınsha mánisin qoysaq,

$$\frac{E_e}{h\nu} = \frac{2\alpha \sin^2 \varphi / 2}{\lambda + 2\alpha \sin^2 \varphi / 2} \quad (5)$$

ańlatpasın alamız. (5)-teńlikten shashırawdıń hám qıylı φ mýyeshlerine hár qıylı tebiw elektronlarınıń hár qıylı energiyları, usıǵan sáykes hár qıylı tezlikleri sáykes keledi.

Qozǵalıw muǵdarınıń saqlanıw nızamın paydalanıp, φ mýyeshi menen shashıraǵan fotonǵa sáykes keletuǵın tebiw elektronına sáykes keletuǵın mýyesh ψ ushın sáykes keletuǵın ańlatpanı tabıwǵa boladı (mayda shrift penen jazılǵan tekstke qarańız). 316-súwrette $h\nu'$ fotonlarınıń hám tebiw elektronları E_e ushın polyar diagramması berilgen. Strelkalardıń qasındaǵı birdey sanlar shashıraǵan fotonǵa hám sonıń menen bir waqıtta payda bolǵan tebiw elektronına sáykes keledi. Kórinip turǵanıday, "alǵa" qaray jiyiligi ózgermegen ν jiyilikke iye foton ushadı, oǵan $E_e = 0$ energiya, yaǵnıy tebiw elektronınıń bolmawı sáykes keledi. Eń tez tebiw elektronları "alǵa" qaray ushadı, olarǵa keyin qaray jiyiligi eń kóp shamaǵa ózgergen fotonlar sáykes keledi.

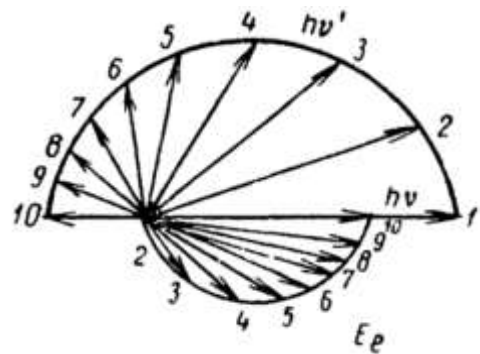
Tájiriybeler tebiw elektronlardıń bar ekenligin hám olardıń energiylar hám mýyeshler boyınsha tarqalıwın tastıyıqlaydı. D.V.Skobelcın tebiw elektronların úyreniw ushın magnit maydanına jaylastırılǵan Vilson kamerasın paydalandı (371-paragraf). Magnit maydanı tebiw elektronların barǵan hám sonlıqtan olar sheńberler túrindegi izlerdi qaldırǵan. Olardıń radiusları boyınsha elektronlardıń tezligi haqqında gáp etiwge boladı. Keyinirek Vilson kamerası sonshama jetilistirildi, nátiyjede fotonnıń elektrondaǵı shashırawınıń ayırım aktleri ushın teoriyalıq formulalardıń orınlanıwın tekserip kóriwge múmkinshilik berdi.

Tolqın uzınlıǵınıń úlkeyiwi menen ν jiyiligi kishireyedi, usıǵan sáykes fotonlardıń qozǵalıw muǵdarı bolǵan $P_f = \frac{h\nu}{c}$ shaması da kishireyedi. Usınıń menen birge elektrongá beriletuǵın qozǵalıw muǵdarı menen energiyanıń úlesiniń shaması da kemeyedi. Sonlıqtan tolqın uzınlıǵınıń sezilerliktey ózgerisi menen tebiw elektronlarınıń úlken tezlikleri júdá kishi tolqın uzınlıǵına iye

nurlanıwda (qısqa tolqınlı rentgen nurları) ǵana baqlanadı. Kózge kórinetuǵın nurlarda Komptonlıq shashırax baqlanbaydı.

Kompton qubılısına tiyisli bolǵan eksperimentallıq hám teoriyalıq maǵlıwmatlardıń bir birine sáykes keliwi tek fotonlıq teoriyanı tekserip kóriw ǵana emes, al ayırım elementar processler ushın energiya menen qozǵalısh muǵdarınıń saqlanıw nızamlarınıń orınlanatuǵınlıǵınıń dálili bolıp ta tabıladı. XX ásirdeń jigirmalanshı jılları jaqtılıqtıń zatlar menen óz-ara tásirlesiwinıń klassikalıq qubılısların túsindiriwdegi qıyınshılıqlarǵa baylanıslı bir qatar burjuaziya fizikler tárepinen elementar bólekshelerdeń óz-ara tásirlesiwinde energiya menen qozǵalısh muǵdarınıń saqlanıw nızamları ortasha, kóp sanlı tásirlesiw aktları ushın statistikalıq jaqtan orınlanadı degen kóz-qaras usınıldı. Olardıń kóz-qarasları ushın bir akttá energianıń saqlanıw nızamı menen qozǵalısh muǵdarınıń saqlanıw nızamı orınlanbaydı. Fotonlardıń elektronlardagı birlik shashırax aktlerin baqlaw boyınsha tuwrıdan-tuwrı ótkerilgen tájiriye beler bul pikirlerdi biykarladı hám saqlanıw nızamlarınıń hár bir elementar akttá orınlanatuǵınlıǵın kórsetti.

316-súwret.
Shashıraxan fotonlar hám tebiw elektronları
ushın polyar diagramma.



(4)-qatnastı keltirip shıǵarıw ushın foton menen elektronnıń óz-ara tásirlesiwi serpimli soqlıǵısıw nızamı boyınsha júredi dep boljaymız hám usı tiykarda energiya menen qozǵalısh muǵdarınıń saqlanıw nızamların jazamız. Tebiw elektronlarınń tezligi júdá úlken bolǵanlıqtan, biz mexanikanıń formulaların salıstırmalıq teoriyasındaǵıday etip jazamız (301-paragraf). Elektronnıń kinetikalıq energiyası menen qozǵalısh muǵdarı ushın mınaday ańlatpalarǵa iye bolamız:

$$E_e = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} = mc^2, \quad (6)$$

$$P_e = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \beta^2}} = mv. \quad (7)$$

Bul formulalarda $\beta = v/c$; c - jaqtılıqtıń boslıqtaǵı tezligi, v - elektronnıń tezligi, m - tezlik v ǵa teń bolǵan jaǵdaydaǵı massa. Tınıshlıqtaǵı elektronǵa $m_0 c^2$ shamasına teń energianı beriwimiz kerek. Bunnan energianıń saqlanıw nızamı boyınsha mınaǵan iye bolamız:

$$m_0 c^2 + h\nu = h\nu' + mc^2. \quad (8)$$

(7)-ańlatpa boyınsha, tınıshlıqtaǵı elektronnıń qozǵalısh muǵdarı nolǵe teń. Sonıń ushın qozǵalısh muǵdarınıń saqlanıw nızamı ushın vektorlıq túrde mınanı alamız:

$$\mathbf{P}_f = \mathbf{P}_f' + m\mathbf{v}. \quad (9)$$

(9)-vektorlıq qatnastan algebralıq qatnasqa ótiw ushın $\mathbf{P}_f$ vektorınıń tárepleriniń uzınlıǵı $\mathbf{P}_f'$ menen $m\mathbf{v}$ bolıp tabılatuǵın parallelogramnıń diagonal ekenliginen paydalanamız (317-súwret). φ menen ψ múyeshleri sáykes fotonnıń shashıraxı menen tebiw elektronınıń payda bolıwı júzege keletuǵın múyeshler bolıp tabıladı. 317-súwretten mınaǵan iye bolamız:

$$(mv)^2 = P_f^2 + P_f'^2 - 2P_f P_f' \cos \varphi.$$

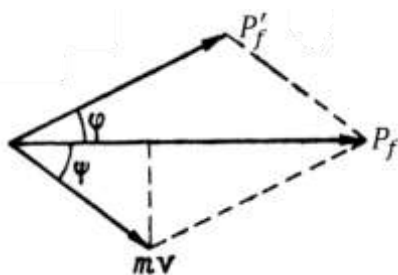
Bul ańlatpaǵa P_f menen P_f' tiń orınlarına olardıń $\frac{h\nu}{c}$ hám $\frac{h\nu'}{c}$ mánislerin qoyıp hám teńliktiń oń hám shep táreplerin c^2 qa kóbeytip, mınanı tabamız:

$$m^2 v^2 c^2 = h^2 \nu^2 + h^2 \nu'^2 - 2h^2 \nu \nu' \cos \varphi. \quad (10)$$

Energianıń saqlanıw nızamı bolǵan (8)-teńlikten

$$mc^2 = h\nu - h\nu' + m_0 c^2$$

teńligine iye bolamız.



317-súwret.

SHashırağan fotonnıń jıyligin esaplawğa.

Bul sońǵı teńliktiń oń hám shep táreplerin kvadratqa kóterip, mınanı alamız:

$$m^2 c^4 = h^2 v^2 + h^2 v'^2 - 2h^2 v v' + 2h(v - v')m_0 c^2 + m_0^2 c^4. \quad (11)$$

(11)-teńlikten (10)-teńlikti aǵzama-aǵza alıp, mınanı tabamız:

$$m^2 c^4 (1 - \beta^2) = -2h^2 v v' (1 - \cos \varphi) + 2h(v - v')m_0 c^2 + m_0^2 c^4.$$

Bul teńlikte $\beta = v/c$. Tınıshlıqtaǵı massa m_0 menen m massasınıń arasındaǵı qatnastan paydalanıp

$$m\sqrt{1 - \beta^2} = m_0$$

teńligin alamız hám onı

$$2h(v - v')m_0 c^2 = 2h^2 v v' (1 - \cos \varphi)$$

yamasa

$$\frac{c}{v'} - \frac{c}{v} = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \varphi) \quad (12)$$

túrinde jazamız. $1 - \cos \varphi$ di $2 \sin^2 \varphi/2$ arqalı ańlatıp hám $\frac{c}{v} = \lambda$ jáne $\frac{c}{v'} = \lambda'$ ekenligin ańǵarıp, (12)-teńlikten

$$\lambda' - \lambda = 2\alpha \sin^2 \varphi/2 \quad (13)$$

teńligine iye bolamız. Bul teńlikte $\alpha = h/m_0 c$. (13)-teńlik tiykarǵı teksttegi (4)-formulaǵa sáykes keledi.

Tebiw elektronınıń qozǵalıǵı baǵıtlanǵan ψ múyeshin anıqlaw ushın jáne de 317-súwretten paydalanamız. Bul súwretten

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{P_f' \sin \varphi}{P_f - P_f' \cos \varphi}$$

ańlatpası kelip shıǵadı. P_f penen P_f' shamalarınń ornına $\frac{hv}{c}$ hám $\frac{hv'}{c}$ shamaların qoyıp, $\operatorname{tg} \psi$ ushın jazılǵan ańlatpanı bılayınsha kóshirip jazamız:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{v' \sin \varphi}{v - v' \cos \varphi} = 2 \frac{\sin \varphi/2 \cos \varphi/2}{v/v' - \cos \varphi}. \quad (14)$$

Ekinshi tárepten (12)-teńliktiń tiykarında mınaǵan iye bolamız:

$$\begin{aligned} \frac{v}{v'} - \cos \varphi &= 1 - \cos \varphi + \frac{2\alpha v}{c} \sin^2 \frac{\varphi}{2} = \\ &= 2 \left(1 + \frac{\alpha v}{c} \right) \sin^2 \frac{\varphi}{2}. \end{aligned}$$

$\frac{v}{v'} - \cos \varphi$ shamasınıń bul mánisin (14) ke qoyıp

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{1}{\left(1 + \frac{\alpha v}{c} \right) \operatorname{tg} \varphi/2} \quad (15)$$

qatnasın alamız. (15)- qatnas shashıraǵan fotonnıń hár bir berilgen (φ berilgen) shaması boyınsha ψ múyeshiniń shamasın anıqlawǵa, yaǵnıy tebiw elektronınıń ushıw baǵıtın tabıwǵa múmkinshilik beredi. Tebiw elektronınıń energiyasın tiykarǵı teksttegi (5)-formula beredi.

§ 338. Fotoximiya. Jaqtılıqtıń tásirinde ótetuǵın ximiyalıq reakciyalardı *fotoximiyalıq reakciyalar* dep ataydı. Fotoximiyalıq reakciyaǵa misal sıpatında ammiak NH_3 tiń azot penen vodorodqa yamasa bromlı gúmis $AgBr$ niń gúmis penen bromnıń ajıralıw reakciyasın kórsetiwge boladı. Jaqtılıqtıń tásirinde quramalıraq bolǵan molekulalardıń payda bolıw reakciyaları da, misalı vodorod penen xlor molekulalarınń HCl molekulasınıń payda bolıw reakciyası júredi. Bul sońǵı reakciya sonday úlken tezlik penen júredi, reakciyada partlanıw orın aladı. Zatlardıń

polimerizaciyasına alıp kelinetuǵın fotoximiyalıq reaksiyalar da bar. Bunday jaǵdayda dáslepki zattıń atomlarınan kóp atomlı molekulalardıń payda bolıwı orın aladı (X_n tipindegi molekulalar). Fotoximiyalıq reaksiyalar biologiyada úlken orındı iyeleydi. Mısal sıpatında ósimliklerdiń jasıl bólimlerinde ugлекislotanıń ıdırawı júzege keledi. Bul qubılıs birinshi ret K.A.Timiryazev tárepinen anıqlandı.

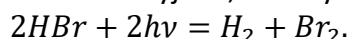
Fotoximiyalıq processler mınaday sanlıq nızamǵa baǵınadı: *fotoximiyalıq reaksiyada payda bolǵan zattıń massası jutılǵan jaqtılıq energiyasınıń muǵdarına proporcional*. Eger jutılǵan jaqtılıqtıń quwatın W arqalı, al jaqtılandırıw waqıtın t arqalı belgilesek, onda nızam bilayınsha jazıladı:

$$m = kWt. \quad (1)$$

Bul teńlikte k arqalı ótetuǵın fotoximiyalıq reaksiyanıń tábiyatınan ǵárezli bolǵan proporcionallıq koefficient belgilengen. San mánisi boyınsha k koefficienti jutılǵan jaqtılıq energiyasınıń bir birligine sáykes keletuǵın reaksiyalanǵan zattıń massasına teń.

Fotoximiyalıq process fotoximiyalıq aylanıstıń saldarınan payda bolǵan produktlerdiń ximiyalıq aktivliginiń saldarınan júzege kelgen ekinshi reaksiyalar menen birge júriwi de múmkin. (1)-nızam tek birinshi fotoximiyalıq processke tiyisli.

Birinshi fotoximiyalıq processlerdi úyreniw olardıń jaqtılıqtıń fotonlıq tábiyatına sáykes júretuǵınlıǵın kórsetedi: *hár bir jutılǵan $h\nu$ fotonǵa bir molekulanıń aylanısı sáykes keledi*. Bul nızam birinshi ret monoxromat jaqtılıqtıń tásirinde HBr bromlı vodorodtıń fotoximiyalıq ıdırawında tekserilip kórildi. Ólshewler jutılǵan jaqtılıqtıń hár bir $h\nu$ porciyasına bir molekulanıń ıdırawınıń sáykes keletuǵınlıǵın kórsetedi. Nátiyjede, reaksiya mınaday teńlemege sáykes júredi:



Bir molekulanıń aylanıwına bazı bir minimallıq A jumısı talap etiletuǵın bolǵanlıqtan, fotonnıń energiyası $h\nu$ mınaday shártti qanaatlandıırıwı kerek:

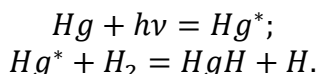
$$h\nu \geq A. \quad (2)$$

Bul (2)-teńlikten fotoximiyalıq processtıń uzın tolqınlı shegarası kelip shıǵadı: eger jaqtılıqtıń jiyiligi

$$\nu < \nu_0 = \frac{A}{h}$$

shártin qanaatlandıratuǵın bolsa, onda fotoximiyalıq reaksiya júrmeydi. Hár bir berilgen fotoximiyalıq reaksiya ushın ν_0 óziniń shamasına teń boladı. Fotoximiyalıq reaksiyalardıń kópshiligi tek ultrafiolet nurlardıń tásirinde júredi. (2)-shárt fotoximiyalıq reaksiyanıń júre alıwı ushın zárúr, biraq bul shárt ele jetkilikli shárt bolıp tabılmaydı: usınday jiyiliktegi jaqtılıqtıń molekula tárepinen jutılıwı zárúr. Eger berilgen jiyiliktegi jaqtılıq ushın móldir bolsa, onda bul jaqtılıq ximiyalıq aylanıstı júzege keltire almaydı.

Biraq, tájiriybe bazı bir jaǵdaylarda zat móldir bolǵan ν jiyilikler oblastında da jaqtılıqtı jutatuǵın zattı kirgizgende ("sensibilizator") fotoximiyalıq reaksiyanı júzege keltiriwge bolatuǵınlıǵın kórsetedi. Fotoximiyalıq reaksiyalardıń usınday túrlerin *sensibilizaciyalanǵan* dep ataydı. Sensibilizaciyalanǵan reaksiyanıń mexanizmi mınaǵan alıp klinedi: sensibilizatoradıń molekulası fotondı jutıp, ayırıqsha qozǵan halǵa keledi hám usınday halda ol bazı bir waqıttıń ishinde tura aladı. Usınday qozǵan halda baslanǵısh zattıń molekulası menen soqlıǵısıp, ol sol baslanǵısh molekulada aylanıstı boldıra aladı. Mısal sıpatında gaz tárizli eki atomlı vodorodtan sinap lampasınan shıqqan tolqın uzınlıǵı $\lambda = 2537 \text{ Å}$ shamasına teń jaqtılandırıwdıǵı atom túrindegi vodorodtıń payda bolıwın keltiremiz. Bunday tolqın uzınlıǵına iye jaqtılıq molekualıq vodorod tárepinen jutılmaydı. H_2 molekualıq vodorodqa sinap puwlarınń úlken bolmaǵan muǵdarın qosıp, tolqın uzınlıǵı $\lambda = 2537 \text{ Å}$ shamasına teń jaqtılıqtıń tásirinde sinaptıń qozǵan Hg^* atomların alamız. Bul qozǵan atomlar H_2 molekulalardıń menen soqlıǵısıwı sinaptıń gidratınıń hám atom tárizli vodorodtıń payda bolıwına alıp keledi. Barlıq reaksiya mınaday sxema boyınsha júredi:



Atom tárizli vodorodtın payda bolıwı kislorodtı qosıw menen tekserip kóríledi; bunday jaǵdayda payda bolǵanlıǵı ańsat anıqlanatuǵın vodorodtın perekisi H_2O_2 payda boladı.

Fotografiya fotoximiyalıq processke tiykarlanǵan. Házirgi waqıtlardaǵı fotografiyalıq processtıń jaqtılıqtı shiysheniń (fotoplastinka) yamasa celluloidlıq plankanıń (fotoplenka) betine jaǵılǵan sezgish emulsiyanıń járdeminde alıp barıladı. Emulsiya jelatindegi onıń menen aralaspaǵan bromlı gúmistiń mikroskopiyalıq kristallarınan turadı. Eń birinshi fotoximiyalıq process jaqtılıqtıń tásirinde bromlı gúmistiń júdá kishi bóleksheler túrindegi ıdırawına alıp kelinesi. Uzaq waqt jaqtılandırılǵanda bunday bólekshelerdiń sanınıń júdá úlken bolıwı múmkin. Sonıń nátiyjesinde emulsiya sezilerliktey qarawıladı. Jaqtılıqtıń ádettegidey uzaqlıǵında gúmistiń ajırılıp shıqqan bóleksheleriniń sanı úlken emes hám olar jaqtılıqtıń sezilerliktey jutılıwın bermeydi. Sonlıqtan birinshi fotoximiyalıq tásirdiń astında *jasırın súwret* dep atalatuǵın súwret payda boladı. Jasırın fotografiyalıq súwrettiń joqarında ayılǵan tábiyatı haqqındaǵı boljaw T.P.Kravic tárepinen islendi hám M.V. Savostyanovanıń jumlarında tastıyıqlandı.

Jaqtılıqtıń tásirinde jasırın súwret payda bolǵan fotoplastinka ekinshi ximiyalıq qayta islenedi hám bunday qayta islewdi *shıǵarıw* dep ataydı³¹. Sáykes ximiyalıq reaktivlerdiń tásirinde (shıǵarıwshınıń tásirinde) gúmistiń ayırım bóleksheleri bar bolǵan orınlardaǵı metallıq gúmistiń qayta tikleniwı júzege keledi. Nátiyjede metall gúmis tiykarınan jaqtılıqtıń tási bolǵan orınlarda bólinip shıǵadı. Usınday jollar menen negativ payda etiledi. Súwretti shıǵarıw juwmaqlanǵanda ıdıramaǵan bromlı gúmis giposulfidtiń ($Na_2S_2O_3$) eritpesiniń járdeminde fotoplenkadan yamasa fotoplastinkadan ajratıp alınadı.

Fotoximiyalıq process kóriw seziminiń tiykarında jatadı. 306-paragrafta biz setchatkanıń jaqtılıqtı sezgish elementleriniń eki túri bolǵan tayaqshalar menen kolbalardan turatuǵınlıǵın kórsettik. Tayaqshalar gewgimdegi kóriwdi, al kolbalar reńlerdi ajırata alatuǵın kúndizgi kóriwdi támiyenleydi. Tayaqshalardıń ushları kóriw purpurı dep atalatuǵın ayrıqsha pigment penen boyalǵan. Kóriw purpurı jaqtılıqtıń tásirinde ıdıraw qábiletligine iye. ıdıraw produktleri tayaqshalarǵa ximiyalıq tásir tiygizedi hám bunnan keyin bul tásir nervlik qozıw túrinde miyge beriledi. Kúshli jaqtılıqtıń tásirinde kóriw purpurı tolıǵı menen ıdıraydı hám nátiyjede tayaqshalar jaqtılıqtı qabil etiw qábiletligin joǵaltadı. Jaqtılandırılıw toqtaǵannan keyin kózdıń ishinde purpur qaytadan islep shıǵıladı hám tayaqshalar jaqtılıqtı sezgirliğin qaytadan tikleydi (ázzi jaqtılandırıwǵa kózdıń adaptaciyası).

Kúndizgi (reńli) kóriwdiń teoriyası usı waqıtlarǵa shekem jetkilikli dárejede islenip shıǵılmaǵan.

³¹ Rus tilindegi "proyavlenie" sózi qaraqalpaq tiline "shıǵarıw" dep awdarıldı (Awdarıwshılar).

SEGIZINSHI BÓLIM

ATOM FIZIKASI

XXX BAP

ATOMLAR MENEN MOLEKULALARDIŇ DÚZILISI

§ 339. Kirisiw. Kurstıń hár qıylı bólimlerinde bizge zatlardıń atomlıq qurılısı haqqındaǵı kóz-qaraslar menen paydalanıwǵa tuwrı keldi. Áyyemgi Greciya menen Rimde tuwılǵan atomlıq teoriya fizikanıń rawajlanıwınıń barlıq tariyxında materialistlik ilimiy baǵdarǵa sáykes keletuǵın progressivlik teoriya bolıp keldi. XVIII ásirdeń basında-aq zatlardıń sol waqıtlarǵa shekem túsiniqsiz bolıp kegenen kóp sanlı qásiyetleriniń mexanikanıń ulıwmalıq nızamlarınıń tiykarında atomlıq teoriya menen túsindiriletuǵınlıǵı kórsetildi. Atomlıq teoriya teplotod sıyaqlı salmaǵı joq gipotezalıq suyıqlıqlardı yamasa materiyaǵa hár qıylı "umtılawlar", sonıń ishinde orta ásirlerde qalıplesken "boslıqtan qorqıw" qásiyetlerin beriw zárurlıǵın joq etti. Ózi jasaǵan waqıtları zatlardıń atomlıq-kinetikalıq teoriyasın eń tolıq rawajlandırǵan M.V.Lomonosov jıllılıq qubılısları menen gazlerdiń ózlerine berilgen kólemlerdi tolıq toltırıwǵa tırıswların atomlardıń qozǵalısları menen túsindirdi. Fizika menen ximiyanıń bunnan bılay rawajlanıwı zatlardıń úzlikli strukturasını tolıq tastıyıqladı. Biraq, bunnan atomlardıń materiyanıń bazı bir "absolyut ápiwayı" hám bólinbeytuǵın elementi ekenligi kelip shıqqan joq. Biraq usı jaǵdaylarǵa qaramastan kóplegen alımlar haqıyqıy dúnyanıń barlıq kóp sanlı qásiyetlerin ózgermeytuǵın tek atomlar-bólekshelerdiń qosındısı dep túsindiriwge boladı dep esapladı hám usı boyınsha atomlarda materiyanıń eń sońǵı "mánisin" kórdi. Usınday kóz-qaraslar tájiriybelerden kelip shıqqan joq hám metafizikalıq xarakterge iye boladı. Bul metafizikalıq tendenciya atomlardıń quramalı qurılısı tabılǵannan keyin de saqlandı. Elektronlar ashılǵannan keyin materiyanıń "mánisin" elektr zaryadların alıp júriwshilerde kóriwge tırıstı. Usınıń menen bir qatarda idealizmniń wákilleriniń atomlardaǵı eń sońǵı "substancıyanı" kóriwdiń múmkin emes dep oyladı. Bul materializmnen bas tartıwdı ańǵartadı ...

XX ásirdegi ilimiy ashılıwlar materialistlik kóz-qaraslardıń durıs ekenligin tolıq tastıyıqladı. Házirgi waqıtları biz hár qıylı elementar bólekshelerdi bilemiz, olardıń ózleriniń qásiyetleri boyınsha klassikalıq mexanikanıń "bólekshelerinen" ózgeshe ekenligin de, olardıń bir birine aylana alatuǵınlıǵın da bilemiz.

Zatlardıń qurılısı oblastındaǵı fizikanıń jańa jetiskenlikleri bizdi qorshaǵan tábiyattıń obektiv qásiyetlerin uzaq waqıtlar dawamında úyreniwlerdiń, jańadan tabılǵan faktlerdi ulıwmalastırıwdıń nátiyjesi bolıp tabıladı. Elektronlar menen ionlardıń ashılıwı atomlardıń quramalı qurılısı haqqındaǵı mäseleniń birinshi ret bekkem empirikalıq tiykarın saldı. Kóp sanlı faktler atomlardıń quramalı elektrlik sistema bolıp tabılatuǵınlıǵın kórsetti. Bizdiń joqarıda kórgenimizdey, atomlardıń ishinde serpimli baylanısqa elektronlardıń bar ekenligin bassılıqqa alatuǵın Lorenc teoriyası denelerdegi jaqtılıqtıń tarqılıwı menen baylanıslı bolǵan kóp sanlı qubılıslardı túsindire aldı. Biraq oń zaryadları alıp júriwshiler haqqındaǵı másele uzaq waqıtlar dawamında sheshilmey keldi. Elektronlardıń atomlardıń ishindegi qozǵalıslarınıń haqıyqıy xarakteri belgisiz boldı. XX ásirdeń basında atomlardıń qurılısı haqqındaǵı hár qıylı bolǵan eki gipoteza usınıldı.

Olardıń birinshisi ólshemleri atomnıń barlıq ólshemleri boyınsha, yaǵnıy 10^{-8} sm shamasındaǵı radiusqa sferanıń sheklerinde turaqlı kólemlik tıǵızlıq penen tarqalǵan oń zaryadtan turadı dep boljadı. Teris zaryadlangan elektronlar usı sferanıń ishine batırılǵan hám

olar onıń elementar kólemleri menen Kulon nızamı boyınsha tásirlesedi. Eger usınday sferanıń ishine elektron batırılǵan dep boljasaq, ol sferanıń orayında jaylasadı hám kishi awısıwlarında orayǵa qaray awısıwdıń shamasına proporcional bolǵan kúsh penen qaytarıladı. Bir neshe elektronlar bar bolǵanda olar belgili bolǵan simmetriyaǵa iye figuranıń muyeshlerinde (tóbelerinde) jaylasadı hám ózleriniń teń salmaqlıq orınlarınan kishi awısıwlarında olar usı awısıwdıń shamasına proporcional bolǵan kúshtiń tásirinde keri qaray qaytarıladı. Solay etip, bar ekenligi Lorenc óziniń elektronlıq teoriyasında bolǵan kvaziserpimli kúshlerdiń bolatuǵınlıǵı túsindirildi.

Biraq bul model sózsiz jasalma xarakterge iye boldı. Sebebi ondaǵı oń hám teris zaryadlar hár qıylı tábiyatqa iye dep esaplandı: teris zaryadlar ayırım bóleksheler - elektronlar túrinde, al oń zaryadlar bolsa úlken kólemde zaryadtıń úziksiz tıǵızlıǵı menen tarqalǵan. Bunday jaǵdayda, Kulonlıq iyerilis kúshleriniń bar bolıwınıń sebebinen oń zaryadlardıń nelikten hár qıylı táreplerge qaray ushıp ketpeytuǵınlıǵın túsindiriw ushın elektrodinamikanıń talapları orın alatuǵın bolsa da olar bir biri menen tásirlespeydi yamasa Kulon kúshinen basqa onı kompensaciyalaytuǵın qanday da bir basqa kúshler bar dep boljawǵa tuwrı keldi.

Ekinshi gipoteza boyınsha atomǵa Quyash sistemasınıń qurılısına usaǵan qurılıs berildi: atomlardıń orayında awır oń zaryadlangan yadro jaylasadı, al onıń dógeresinde elektronlar aylanıp júredi. Yadronıń ólshemleri barlıq atomnıń ólshemlerine salıstırǵanda kishi. Bunday model *atomnıń yadrolıq modeli* dep ataladı.

Atomnıń yadrolıq modeli dáslep radioaktivli zatlar tárepinen shıǵarılatuǵın α -bólekshelerdiń juqa qattı plankalardaǵı shashırawı boyınsha ótkerilgen tájiriybelerde tastıyıqlandı. Bunnan keyin atomnıń yadrolıq modeli tómengi basımlardaǵı bir atomlı puwlar menen gazlerdiń sıızqlı spektrleriniń payda bolıwı menen strukturasın túsindiriwge múmkinshilik berdi. Atomlardıń yadrolıq modelinen kelip shıqqan halda molekullardıń qásiyetleri menen olar shıǵaratuǵın spektrlerdiń strukturasına tiyisli bolǵan kóp sanlı faktlerdi túsindiriwdiń sáti tústi. Solay etip, atomlardıń strukturası máseleleri spektrallıq sıızqlardıń shıǵarılıwı menen jutılıwınıń nazamları haqqındaǵı biziń bilimlerimizdiń rawajlanıwı menen tıǵız baylanısqa bolıp shıqtı.

Atom fizikasınıń bunnan keyingi etapı bolıp atom yadrolarınıń ózleriniń qásiyetlerin úyreniw bolıp tabıladı. Olardıń ápiwayıraq bolǵan bólekshelerden turatuǵınlıǵı anıqlandı hám tábiyiy jáne jasalma radioaktivlik qubılısında ótetuǵın yadrolardıń aylanısları processleri tereń úyrenildi.

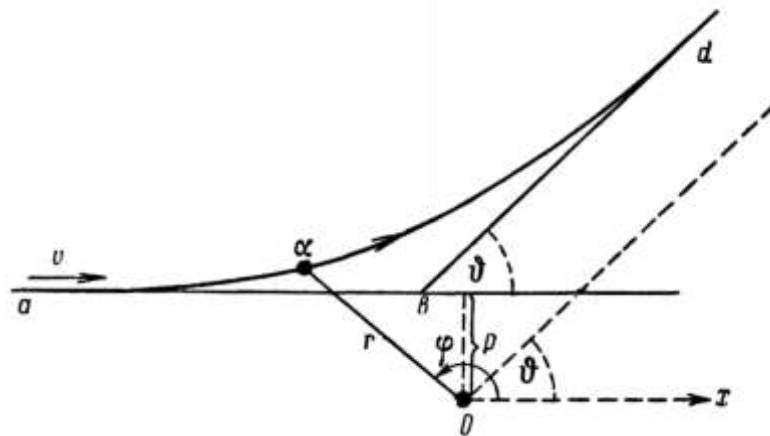
Atom fizikasınıń rawajlanıwına elimizdiń fizikleri úlken úles qostı. Óziniń dáwirli nızamın ashqan D.I.Mendeleev birinshi ret barlıq ximiyalıq elementlerdiń birden-bir tábiyatı haqqındaǵı mashqalanı shınlap qoydı. Keyin Mendeleevtiń dáwirlik sisteması bizlerdiń atomlardıń qurılısı haqqındaǵı barlıq bilimlerimizdiń rawajlanıwında fundamentallıq orındı iyeledi. D.S.Rojdestvenskiydiń, L.I.Mandelshtamniń, S.I.Vavilovtiń, olardıń oqıwshılarınıń hám islerin dawam ettiriwshilerdiń kóp sanlı jumısları atomlar menen molekullardıń, olardıń elektronlıq qabıqlarınıń qurılıslarınıń qurılısına baylanıslı bolǵan bir qatar áhmiyetli máselelerdi sheshiwge múmkinshilik berdi. Sovet fizikleri tárepinen atom yadrolarınıń qásiyetleri menen strukturasın úyreniw oblastında iri ilimiy ashılıwlar orın aldı. D.D.Ivanenko birinshi ret atom yadrolarınıń "awır" bólekshelerdiń eki sortınan - protonlar menen neytronlardan turatuǵınlıǵı haqqındaǵı gipotezanı usındı. I.V.Kurchatov yadrolıq izomeriya dep atalatuǵın izomeriyanı ashtı. A.I.Alixanov, A.I.Alixanyan, D.V.Skobelcın hám jáne de bir qatar sovet fizikleri kosmoslıq nurlardı úyreniwde hám bólekshelerdiń jańa túrleriniń payda bolıw sharayatların úyreniwde áhmiyetli nátiyjelerdi aldı. Sonıń menen birge, sovet fizikleriniń ótkergen izertlewleriniń nátiyjesinde yadrolıq aylanıslarda ajralıp shıǵatuǵın atom energiyasın paydalanıwda oǵada úlken tabıslarǵa erisildi.

Awır elementler bolǵan uran menen plutoniydiń járdeminde partlanıw reakciyasınıń alınıwınıń múmkinshiliginiń imperialistler tárepinen atom bombasın dóretiw ushın paydalanılǵanlıǵı belgili. 1949-jıl 25-sentyabr kúngi TASS tıń bergen xabarı boyınsha Sovetler Soyuzı atom quralınıń "sırların" álle qashan ashtı hám 1947-jılı usınday quralǵa iye boldı. Biraq,

atom quralına iye bolıw menen birge, Sovetler Soyuzı onıń qadaǵan etiliwine hám atom energiyasın tek paraxatshılıq maqsetlerinde paydalanıwǵa qaratılǵan jumıslardı izbe-iz ótkeredi.

1954-jılı Sovetler Soyuzında atomlıq janılıǵı isleytuǵın dúnyadaǵı birinshi elektrostanciya paydalanıwǵa berildi.

§ 340. Atomnıń yadrolıq modeli. Atomnıń yadrolıq modeli Rezerfordtıń alfa-bóleksheliriniń (qısqaşa α -bólekshe) shashırawı boyınsha ótkergen baqlawlarınıń nátiyjesinde tuwrıdan-tuwrı tastıyıqlandı. Bul bóleksheler qos oń zaryad $+2e$ ge iye bolatuǵın radioaktiv elementlerden úlken tezlikler menen shıǵarılatuǵın geliydiń ionları bolıp tabıladı (371-372 paragraflar). Rezerford α -bólekshelerdiń metallardıń juqa folgaları arqalı ótetuǵınlıǵın hám usınıń menen birge olardıń shashırawdıń nátiyjesinde qozǵalıslarınıń baǵıtın ózǵertetuǵınlıǵın baqladı. Bul awısıwlarıdı oń zaryadlangan α -bóleksheliriniń atomlardıń oń zaryadları menen iyterisiwiniń saldarınan júzege keledi dep esaplaw tábiyiy. Elektronlardıń massasınıń júdá kishi ekenligine baylanıslı, α -bólekshelerge elektronlar tárepinen tásir etetuǵın kúshler olardıń qozǵalı baǵıtların sezilerliktey ózǵerte almaydı.



318-súwret. Oń zaryad tárepinen α -bólekshesiniń qozǵalı baǵıtınıń ózgeriwi.

Shashırawdıń nátiyjesiniń atomnıń oń zaryadı jaylasatuǵın kólemniń ólshemlerinen kúshli ǵárezli ekenligin kórsetiwge boladı. Oń zaryadtıń tek kishi ólshemlerin de ǵana iyteriw kúshleriniń shaması α -bóleksheliriniń traektoriyaların úlken múyeshlerge burıw ushın jetkilikli bola aladı. Eger oń zaryad úlken kólemniń ishinde tarqalǵan bolsa, onda α -bólekshesiniń atomnıń qasındaǵı hár bir ótiwi onı úlken bolmaǵan múyeshke ǵana buradı. Bunday jaǵdayda α -bólekshesiniń shashırawı sezilerliktey bolmaydı.

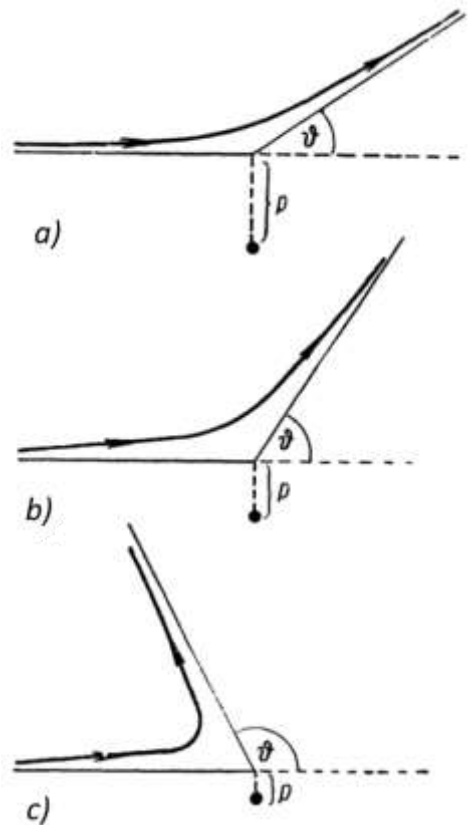
Meyli, α -bólekshe yadrodan úlken qashılıqta ab tuwrısınıń boyı menen v tezligi menen qozǵalatuǵın bolsın (318-súwret). p arqalı ab tuwrısı menen E shamasına teń oń zaryad jaylasqan atomnıń orayı O arasındadı eń kishi qashılıqtı belgileymiz. p shamasın "nıshanaǵa alıw" qashılıǵı dep atawǵa boladı. Sáykes esaplaw (mayda shrift penen jazılǵan tekstti qarańız) α -bólekshesi menen E zaryadınıń arasındadı Kulon tásirlesiwiniń bar bolıwınıń sebebinen α -bólekshe giperbola boyınsha qozǵaladı. α -bólekshesiniń traektoriyası awısatuǵın ϑ múyeshiniń shaması (giperbolanıń asimptotalarınıń arasındadı múyesh)

$$\operatorname{ctg} \frac{\vartheta}{2} = \frac{Mv^2}{2e \cdot E} \cdot p \quad (1)$$

teńliginiń járdeminde anıqlanadı. Bul teńlikte M arqalı α -bólekshesiniń massası belgilengen. Atomnıń massası α -bólekshesiniń massasına salıstırǵanda sheksiz úlken dep esaplaymız. (1)-formuladan nıshanaǵa alıw qashılıǵı p qansha kishi bolsa, awısıw múyeshi ϑ diń shamasınıń úlken bolatuǵınlıǵı kórinip tur. Hár qıylı nıshanaǵa alıw qashılıqlarındadı α -bólekshesiniń

traektoriyalariniń túri 319-a, b, c súwretlerde keltirilgen. Kishi p larda $\vartheta > \pi/2$, yaǵnıy soqlıǵısıwdıń nátiyjesinde α -bólekshesi artqa qaray qaytıwı múmkin.

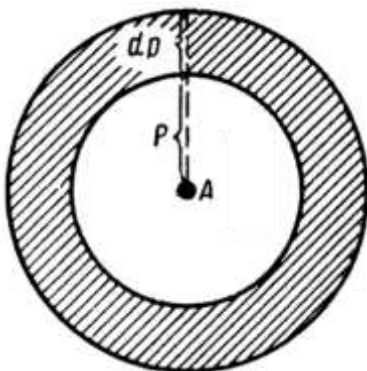
319-súwret.
 α -bóleksheniń traektoriyasınıń "nıshanaǵa alıw" qashıqlıǵı p dan ǵárezligi.



Metall folganiń japıraǵı arqalı α -bóleksheleriniń parallel dástesi ótedi dep boljayıq. Meyli, waqıt birliginiń ishinde dásteniń baǵıtına perpendikulyar bolǵan bettiń bir birligi arqalı n_0 bóleksheshe ótetuǵın bolsın. Waqıt birligindegi mánisi ϑ menen $\vartheta + d\vartheta$ shamalarınıń ishindegi múyeshke burılatuǵın (awısatuǵın) bólekshelerdiń sanın esaplaymız. Meyli, ϑ múyeshine awısıwǵa sáykes keletuǵın nıshanaǵa alıw qashıqlıǵın p arqalı, al $\vartheta + d\vartheta$ múyeshine awıtqıwǵa sáykes keletuǵın nıshanaǵa alıw qashıqlıǵın $p - dp$ arqalı belgileyik. Bunday jaǵdayda bir A atomınan biz izlep atırǵan múyeshke sol A atomınan oray etip alǵanda radiusı p hám keńligi dp etip alınǵan saqıynanıń beti arqalı barlıq bóleksheler awısadı (320-súwret). Álbette, usınday bólekshelerdiń sanı $n_0 dS$ ke teń, bul ańlatpada dS arqalı saqıynanıń maydanı belgilengen. Eger maydannıń bir birliginde N atom bolatuǵın bolsa, onda waqıt birligindegi ϑ menen $\vartheta + d\vartheta$ múyeshleriniń arasında awısqa α -bóleksheleriniń sanı mınaǵan teń:

$$dn = n_0 N dS. \quad (2)$$

Hár bir α -bólekshesi tek bir ret awısatuǵın bolǵan jaǵdayda ǵana bul qatnas durıs. Bul jaǵdaydıń júdá juqa folganı alǵanda orınlanatuǵınlıǵın atap ótemiz.



320-súwret.
Burılǵan α -bóleksheleriniń sanın esaplawǵa.

Saqıynanıń maydanı bolǵan dS shaması $2\pi p|dp|$ ge teń, nátiyjede (2)-ańlatpa mınaday túrge enedi

$$dn = 2\pi n_0 N p |dp|. \quad (3)$$

$p|dp|$ ańlatpasın tabıw ushın (1)-formuladan paydalanamız. Onnan

$$p^2 = \left(\frac{2eE}{Mv^2}\right)^2 \operatorname{ctg}^2 \frac{\vartheta}{2}.$$

Bul ańlatpanı differenciallap, mınaǵan iye bolamız:

$$pdp = -\frac{1}{2} \left(\frac{2eE}{Mv^2}\right)^2 \frac{\operatorname{ctg} \frac{\vartheta}{2}}{\sin^2 \frac{\vartheta}{2}} d\vartheta.$$

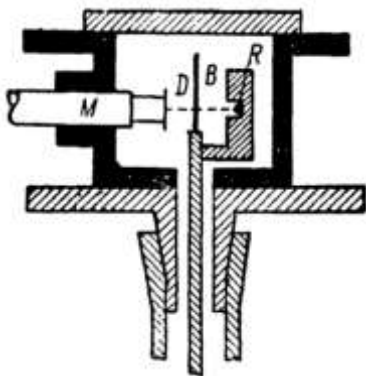
pdp ushın jazılǵan bul ańlatpanı (3)-ańlatpaǵa qoyıp, tómendegidey ańlatpanı tabamız:

$$dn = \pi n_0 N \left(\frac{2eE}{Mv^2}\right)^2 \frac{\operatorname{ctg} \frac{\vartheta}{2}}{\sin^2 \frac{\vartheta}{2}} d\vartheta$$

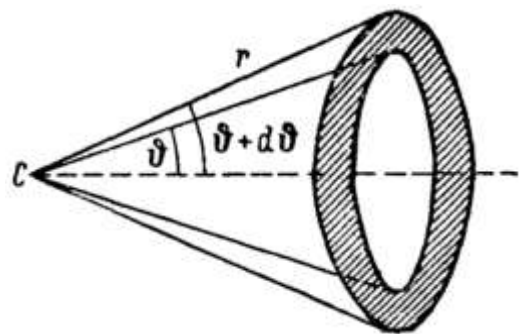
yamasa

$$dn = n_0 N \left(\frac{2eE}{Mv^2}\right)^2 \frac{2\pi \sin \vartheta}{\sin^4 \frac{\vartheta}{2}} d\vartheta. \quad (4)$$

(4)-formulanı paydalanıp, tájiriýbelerdiń nátiýjelerin teoriya menen salıstırıp kóriwge boladı. α -bólekshelerdiń shashırawı mınaday sxema boyınsha ótkerildi: qorǵasın ampulaǵa jaylastırılǵan radioaktiv preparattıń kishkene bólegi (321-súwret) B metall folgasınıń japıraǵına normal baǵıtta α -bóleksheleriniń jıńışke dástesi kelip túsedı. Folga arqalı ótkende α -bóleksheleri hár qıylı baǵıtlarda shıshıraydı. α -bólekshelerin baqlaw ushın olardıń fluorescenciýalanıwshı ekranda, mısalı, kúkirtli cink ekranında jıltıldılardı ("scincillyaciyalardı") payda ete alıw qábiletligi paydalanıladı. Hár bir ayırım α -bólekshesi ekranda kóz benen kóriw múmkin bolǵan jıltıldını payda etkendey úlken energiya menen qozǵaladı. Ekranga mikroskop arqalı qaraǵanda jıltıldılar boyınsha ekranga kelip túsken α -bóleksheleriniń sanın esaplawǵa boladı. D ekranı M mikroskopı menen birgelikte orayı shashıratıwshı B folgası sheńber boyınsha qozǵala aladı. Usınıń nátiýjesinde hám qıylı ϑ múýeshlerine shashıraǵan α -bóleksheleriniń sanın anıqlawǵa boladı.



321-súwret. α -bóleksheleriniń shashırawın baqlaw ushın arnalǵan tájiriýbeniń sxeması.



322-súwret. Ekranga kelip túsetuǵın α -bóleksheleriniń sanın esaplawǵa.

(4)-formula waqıt birliginde ϑ shamasınan $\vartheta + d\vartheta$ shamasına shekemgi múýeshlerdiń ishinde shashıratıwǵan bólekshelerdiń sanı dn di beredi. Basqa sózler menen aytqanda dn sanı tóbesindegi múýeshtiń mánisi 2ϑ hám $2(\vartheta + d\vartheta)$ shamasına teń konuslardıń arasında waqıt birliginde ushıp ótetuǵın α -bóleksheleriniń sanına teń. Eger biz bul konuslardıń tóbeleri C noqtatın

oray dep esaplap, onıń dógeresinde radiusı r bolǵan sferanı ótkersek, onda konuslar sferanıń betinde maydanı $2\pi r \sin \vartheta \cdot r d\vartheta = 2\pi r^2 \sin \vartheta d\vartheta$ shamasına teń bolǵan jolaqtı kesedi (322-súwrette shtrixlangan). dn dana bólekshelerdiń barlıǵı da usı jolaqtıń maydanına kelip túsedi. Demek, maydannıń bir birligine sanı

$$dn' = \frac{dn}{2\pi r^2 \sin \vartheta d\vartheta}$$

shamasına teń.

D ekranǵa waqıttıń bir birliginde kelip túsetuǵın α -bóleksheleriniń tap usınday sanınıń registraciyanıwı kerek. Sońǵı ańlatpadaǵı dn niń ornına onıń (4)-ańlatpa boyınsha anıqlanǵan sanın qoyıp, registraciyanıwı kerek bolǵan bólekshelerdiń sanı ushın

$$dn' = \frac{n_0 N}{r^2} \left(\frac{2eE}{Mv^2} \right)^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\vartheta}{2}} \quad (5)$$

formulasına iye bolamız. (5)-formuladan tájiriýbeniń berilgen sharayatlarında ϑ múyeshi ózgermeytuǵın jaǵdayda $dn' \sin^4 \frac{\vartheta}{2}$ kóbeymesiniń turaqlı bolıp qalıwınıń kerek ekenligi kelip shıǵadı. Baqlawlar teoriyanıń bul nátiýjelerin tolıq tastıyıqladı. XV kestedede altınnan soǵılǵan folganıń japıraǵanda hár qıylı ϑ múyeshlerde baqlanǵan scintillyaciýalardıń sanı bolǵan dn' shamalarınıń jáne $dn' \sin^4 \frac{\vartheta}{2}$ kóbeymesiniń mánisleri keltirilgen.

XV kestenen kórinip turǵanıday, scintillyaciýalardıń sanınıń bir neshe mırń ese ózgergenine qaramastan $dn' \sin^4 \frac{\vartheta}{2}$ kóbeymesiniń is júzinde turaqlı qalǵanlıǵı kórinip tur. Bul jaǵdaydan α -bólekshesiniń atomnıń oń zaryadı menen Kulon nızamı boyınsha tásirlesetuǵınlıǵın kórsetedi.

(5)-formula baǵıtın ózgertken (awısqa) α -bóleksheleriniń sanı boyınsha atomnıń oń zaryadı bolǵan E shamasınıń mánisin anıqlawǵa boladı. Sebebi sol (5)-formulaǵa kiretuǵın basqa barlıq shamalardı ólshewge boladı. Atomlar normal halda elektrlik jaqtan neýtral bolǵanlıqtan, oń zaryad E niń mánisi elektronlardıń pútin san eselengen sanına teń: $E = Z|e|$. Bul teńlikte Z - pútin san. Rezerfordtıń hám onıń xızmetkerleriniń ólshewleri Z shamasınıń shama menen atomlıq salmaǵınıń yarımına teń ekenligin kórsetti.

XV keste.

ϑ , grad	Scintillyaciýalardıń sanı	$dn' \sin^4 \frac{\vartheta}{2}$
150	33,1	28,8
120	51,9	29,0
105	69,5	27,5
75	211	29,1
60	477	29,8
45	1435	30,8
30	7800	35,0
15	132 000	38,4

Dáwirli sistemanıń basında elementlerdiń atomlıq salmaǵı Mendeleev kestesindegi olardıń nomerlerinen (qatar sanlarınan) derlik dál eki ese úlken. Mısalı, uglerod altınshı orında jaylasqa, al onıń atomlıq salmaǵı 12 ge teń; alyuminiy on úshinshı orında tur hám onıń atomlıq salmaǵı 27 ge teń; dáwirli kesteniń ortasında hám, ásirese aqırında atomlıq salmaqlardıń sanı bul qatnastı qanaatlandıratuǵın mánislerden úlken. Biraq, turpayı túrde aytqanda, barlıq elementlerdiń atomlıq salmaǵın olardıń qatar sınanan eki ese úlken dep esaplawǵa boladı. Bunnan Rezerfordtıń ólshewleriniń tiýkarında Z shaması (*elementtiń zaryadlıq sanı*) Mendeleev kestesindegi

elementtiń qatar sanına teń degen gipoteza payda boldı. Keyinirek bul gipoteza joqarı dálilikte tastıyıqlandı.

Atomnıń zaryadı $E = Z|e|$ ni bilip, (1)-formula boyınsha p "nışanaǵa alıw qashıqlıǵınıń" ϑ múyeshiniń qanday mánisine sáykes keletuǵınıń anıqlawǵa boladı. ϑ múyeshiniń mánisi 150^0 qa jetetuǵın awır elementler ushın p nıń mánisi 10^{-13} sm ge jetedi eken. Bul α bólekshesi menen atomnıń oraylarınń arasındaǵı qashıqlıq 10^{-13} sm bolǵan qashıqlıqlarda da óz-ara tásirlesiw kúshleriniń Kulon nızamına baǵınatuǵınıń ańǵartadı. Óz gezeginde, bunnan atomnıń oń zaryadlarınń ólshemleriniń 10^{-13} sm shamasınan úlken emes ekenligi kelip shıǵadı.

Barlıq atomnıń ólshemleri 10^{-8} sm bolǵanlıqtan, demek, tájiriybeler atomnıń yadrolıq modelin gúmansız tastıyıqlaydı: atomnıń oń zaryadı usı atomnıń kólemine salıstırǵanda júdá kishi kólemde toplanǵan.

Bul paragrafta alınǵan nátiyjelerdi juwmaqlap, mınaǵan iye bolamız: atomnıń orayında kishkene oń zaryadlanǵan yadro jaylasadı, usı yadroda atomnıń derlik barlıq massası toplanǵan; yadronıń zaryadı $E = Z|e|$ shamasına teń, bul teńlikte Z arqalı Mendeleevtiń dáwirlik sistemasındaǵı elementtiń qatar sanı belgilengen. Normal halda yadronıń dógereginde Z dana elektron aylanıp júredi.

Usı modelge sáykes, vodorod atomı eń ápiwayı atom bolıp tabıladı. Onda tek bir elektron bar. Vodorod atomınıń yadrosı barlıq yadrolardıń eń ápiwayısı. Ol *proton* atamasına iye boldı. Protonnıń zaryadı $+e$ ge teń. Protonnıń massası vodorod atomınıń $\frac{1835}{1836}$ bólimine teń, al elektronnıń massası vodorod atomınıń massasınıń $\frac{1}{1836}$ bólegine ǵana teń. Dáwirlik sistemadaǵı vodorodtan keyingi element - geliy bolıp tabıladı. Onıń atomı normal jaǵdayda eki elektronga iye. Geliy atomınıń yadrosı $+2e$ ge teń hám massası protonnıń massasınan shama menen tórt ese úlken. Alfa-bóleksheler geliydiń yadroları bolıp tabıladı.

Biraq, atomnıń yadrolıq modeliniń klassikalıq elektrodinamikanıń talaplarına sáykes kelmeytuǵınıń atap ótiw zárúr. Másele sonnan ibarat, yadronıń dógereginde aylanatuǵın elektron tezleniw menen qozǵaladı, demek, ol elektromagnitlik tolqınları nurlandıradı (332-paragraf) hám, nátiyjede, energiyasın joǵaltıwı kerek. Usınıń aqıbetinde elektronnıń qozǵalıǵı ornıqlı bolmaydı hám waqıttıń ótiwi menen onıń yadroǵa qulap túsiwi kerek. Haqıyqatında, atomlar júdá ornıqlı dúziliske iye bolǵanlıqtan, bunnan atomlardıń ishinde júzege keletuǵın processler ushın makroskopıyalıq processlerdi baqlawdıń nátiyjesinde ashılǵan klassikalıq elektrodinamikanıń nızamlarınıń orınlanbaytuǵınıń kelip shıǵadı. Atomlardıń qásiyetlerin, solardıń ishinde olardıń spektrleriniń dúzilislerin úyrengeńnen keyin ǵana atomnıń ishinde orınlanatuǵın nızamlardıń ózgesheliklerin tabıwdıń sáti tústi.

Awısıw múyeshi ϑ dıń mánisin esaplaw ushın 318-súwretke qaytıp kelemiz hám α -bólekshesi ushın r hám φ polyar koordinataların kirgizemiz. Bunday jaǵdayda α -bólekshesiniń potenciallyq W_p hám kinetikalıq W_k energiyaları bılayınsha jazıladı:

$$W_p = \frac{2eE}{r}, \quad W_k = \frac{M}{2} (\dot{r}^2 + r^2 \dot{\varphi}^2).$$

Toliq energiya W ushın

$$W = \frac{2eE}{r} + \frac{M}{2} (\dot{r}^2 + r^2 \dot{\varphi}^2) \quad (6)$$

ańlatpasın alamız.

Usınıń menen birge α -bólekshesi ushın qozǵalıǵı muǵdarınıń momenti ushın

$$P = Mr^2 \dot{\varphi} \quad (7)$$

ańlatpasın jazamız.

Usı sońǵı qatnastı paydalanıp, toliq energiya ushın jazılǵan ańlatpada tuwındıları alıstıramız. (7)-ańlatpadan azimut φ den waqıt boyınsha alınǵan tuwındı ushın mınaǵan iye bolamız:

$$\dot{\varphi} = \frac{P}{Mr^2}. \quad (8)$$

Radius-vektor r den waqıt boyınsha alıńǵan tuwındını bilayınsha jazamız:

$$\dot{r} = \frac{dr}{d\varphi} \dot{\varphi} = \frac{P}{Mr^2} \cdot \frac{dr}{d\varphi}. \quad (9)$$

(6)-teńlikke $\dot{\varphi}$ menen $\dot{r}$ diń orınlarına olardıń (8)- hám (9)-ańlatpalar boyınsha anıqlanǵan mánislerin qoyıp, minalardı alamız:

$$W = \frac{2eE}{r} + \frac{P^2}{2Mr^4} \left(\frac{dr}{d\varphi} \right)^2 + \frac{P^2}{2Mr^2}$$

yamasa

$$\frac{1}{r^4} \left(\frac{dr}{d\varphi} \right)^2 = \frac{2MW}{P^2} - \frac{4MeE}{P^2} \cdot \frac{1}{r} - \frac{1}{r^2}. \quad (10)$$

$\frac{1}{r}$ shamasın ρ arqalı belgileymiz, bunday jaǵdayda $\frac{d\rho}{d\varphi} = -\frac{1}{r^2} \cdot \frac{dr}{d\varphi}$ teńligi orınly boladı hám (10) formula minaday túrge iye boladı

$$\left(\frac{d\rho}{d\varphi} \right)^2 = \frac{2MW}{P^2} - \frac{4MeE}{P^2} \cdot \rho - \rho^2.$$

Bul ańlatpanı φ boyınsha jáne bir ret differenciallasaq, onda

$$2 \left(\frac{d\rho}{d\varphi} \right) \cdot \frac{d^2\rho}{d\varphi^2} = \frac{4MeE}{P^2} \cdot \frac{d\rho}{d\varphi} - 2\rho \frac{d\rho}{d\varphi}$$

teńligin alamız. $\frac{d\rho}{d\varphi} \neq 0$ bolǵanlıqtan sońǵı ańlatpa minaday teńlikke alıp keledi:

$$\frac{d^2\rho}{d\varphi^2} + \rho = -\frac{2MeE}{P^2}. \quad (11)$$

Mexanikadan jabıq sistema ushın qozǵalısh muǵdarınıń momenti P nıń turaqlı bolıp qalatuǵınıń belgili. Sonlıqtan

$$C = \frac{4MeE}{P^2} \quad (12)$$

shaması turaqlı shama bolıp tabıladı. Bul C turaqlısın (11)-ańlatpaǵa qoyıp, biz qarap atırǵan α - bólekshesiniń qozǵalıshın qanaatlendıratuǵın minaday differenciallıq teńlemenı alamız:

$$\frac{d^2\rho}{d\varphi^2} + \rho = C.$$

Orınlarına qoyıw jolı menen bul differenciallıq teńlemenıń sheshiminiń minaday funkciya bolıp tabılatuǵınıń ańsat tekserip kóriwge boladı:

$$\rho = C + A \cos \varphi + B \sin \varphi. \quad (13)$$

Bul ańlatpada A menen B arqalı konstantalar belgilengen. Bul konstantanıń mánislerin bilayınsha tabıwǵa boladı: $\varphi = \pi$ teńligi orınlanǵanda (318-súwret) α -bólekshesi koordinata bası O nıń shep tárepinde sheksiz úlken qashıqlıqta jaylasadı hám $\rho = \frac{1}{r} = 0$. Bunnan (13)-ańlatpa boyınsha $A = C$ teńligine iye bolamız. Demek, (13)-teńlik minaday túrge iye enedi:

$$\rho = C(1 + \cos \varphi) + B \sin \varphi. \quad (14)$$

Ekinshi tárepten $\varphi \rightarrow \pi$ de $r \sin \varphi$ shamasınıń mánisi p kesindisiniń uzınlıǵına teń shamaǵa umtıladı. Bunnan (14) boyınsha minanı alamız:

$$\frac{1}{p} = \lim_{\varphi \rightarrow \pi} \frac{\rho}{\sin \varphi} = \lim_{\varphi \rightarrow \pi} \left[\frac{C(1 + \cos \varphi)}{\sin \varphi} + B \right].$$

Usınıń menen birge

$$\lim_{\varphi \rightarrow \pi} \frac{1 + \cos \varphi}{\sin \varphi} = 0$$

teńligi orınly bolǵanlıqtan, joqarıdaǵı $\frac{1}{p}$ ushın jazılǵan ańlatpadan B ushın

$$B = \frac{1}{p}$$

teńligin alamız.

Bunnan keyin (14)-ańlatpa minaday túrge enedi:

$$\rho = C(1 + \cos \varphi) + \frac{1}{p} \sin \varphi. \quad (15)$$

Bul aňlatpa giperbolaniń teńlemesi bolıp tabıladı. Bul giperbolaniń bir asimptotası ab , al ekinshisi bd tuwrısı bolıp tabıladı. Asimptotalardıń arasındagı múyesh ϑ di tabamız. 318-súwretten α -bóleksheni O noqatınan oń tárepke qaray sheksizlikke shekem qıshıqlastırǵanda $\rho = \frac{1}{r}$ shaması nolge teń boladı, al φ múyeshiniń shaması ϑ múyeshiniń shamasına umtıladı. Sonlıqtan $\varphi = \vartheta$ teńligi orınlangan jaǵdayda mınaday teńlikti alamız:

$$C(1 + \cos \vartheta) + \frac{1}{p} \sin \vartheta = 0$$

yamasa

$$\frac{1}{Cp} = -\frac{1 + \cos \vartheta}{\sin \vartheta} = -\operatorname{ctg} \frac{\vartheta}{2}.$$

Sońǵı teńlikten α -bólekshesiniń traektoriyasınıń awısıwınıń

$$\operatorname{ctg} \frac{\vartheta}{2} = -\frac{1}{Cp}$$

teńliginiń járdeminde alınatuǵınlıǵın tabamız.

Bul teńliktegi C nıń ornına onıń (12) boyınsha mánisin qoyıp

$$\operatorname{ctg} \frac{\vartheta}{2} = \frac{P^2}{2MeEp}$$

aňlatpasın alamız. Eń aqırında $P = Mpv$ teńliginiń orınlı ekenligin ańǵarıp (v arqalı α -bólekshesiniń baslanǵısh tezligi belgilengen) tiykargı teksttegi (1)-formulaǵa sáykes keletuǵın

$$\operatorname{ctg} \frac{\vartheta}{2} = \frac{Mv^2}{2eE} p$$

teńligine iye bolamız.

§ 341. Atomlıq spektrlerdegi nızamlıqlar. Sızıqlı spektrlerdi izertlewdiń nátiyjesinde atomlardıń yaderlik modeli bunnan bılay tastıyıqlanıwın taptı. Eger atomlardıń ishindegi elektronlardı awır oń zaryadlangan yadrolardıń dógerinde dóńgelek yamasa ellips tárizli orbitalar boyınsha qozǵaladı dep esaplasa, onda spektrlerdegi sızıqlardıń tarqalıwı baǵınatuǵın nızamlıqlardı ádewir jaqsı túsindiriwge bolatuǵınlıǵı belgili boldı.

XIX ásirdiń ekinshi yarımında sızıqlı spektrlerdiń atomlar tárepine, al jolaqlı spektrlerdiń molekularlar tárepinen shıǵarılatuǵınlıǵı belgili boldı. Sonıń menen birge atomlıq spektrlerdegi sızıqlardıń tártipsiz jaylaspaytuǵınlıǵı hám kóp jaǵdaylarda belgili gruppalardı yamasa seriyalardı (geypara jaǵdaylarda sol gruppalardı seriyalar dep ataydı) payda etetuǵınlıǵı belgili boldı. Mısalı, vodorodtıń spektrindegı kózge kórinetuǵın hám jaqın ultrafiolet oblastlarda spektrallıq sızıqlardıń júdá ayqın kórinetuǵın seriyasınıń bar ekenligi belgili boldı. Bul seriyanı SHveycariyalı fiziktiń ismi menen Balmer seriyası dep ataydı. Ol bul seriyanıń sızıqlarınıń tolqın uzınlıqlarınıń ápiwayı bolǵan

$$\lambda = \lambda_0 \frac{n^2}{n^2 - 4} \quad (1)$$

formulasınıń járdeminde anıqlanatuǵınlıǵı belgili boldı. Bul formulada λ_0 - bazı bir turaqlı, al $n = 3, 4, 5 \dots$, yaǵnıy bir qatar izbe-iz pútin sanlardıń mánisin qabıl etedi. Eger spektrallıq sızıqlardı tolqın uzınlıqlarınıń ornına jiyilikler yamasa olarǵa proporcional bolǵan *tolqınlıq sanlar* menen táriyipleytuǵın bolsaq, onda Balmer formulasına ápiwayıraq túr beriwge boladı. Tolqınlıq san degenimizde 1 sm uzınlıqta jaylasatuǵın tolqın uzınlıqların, yaǵnıy

$$\nu = \frac{10^8}{\lambda_\nu}$$

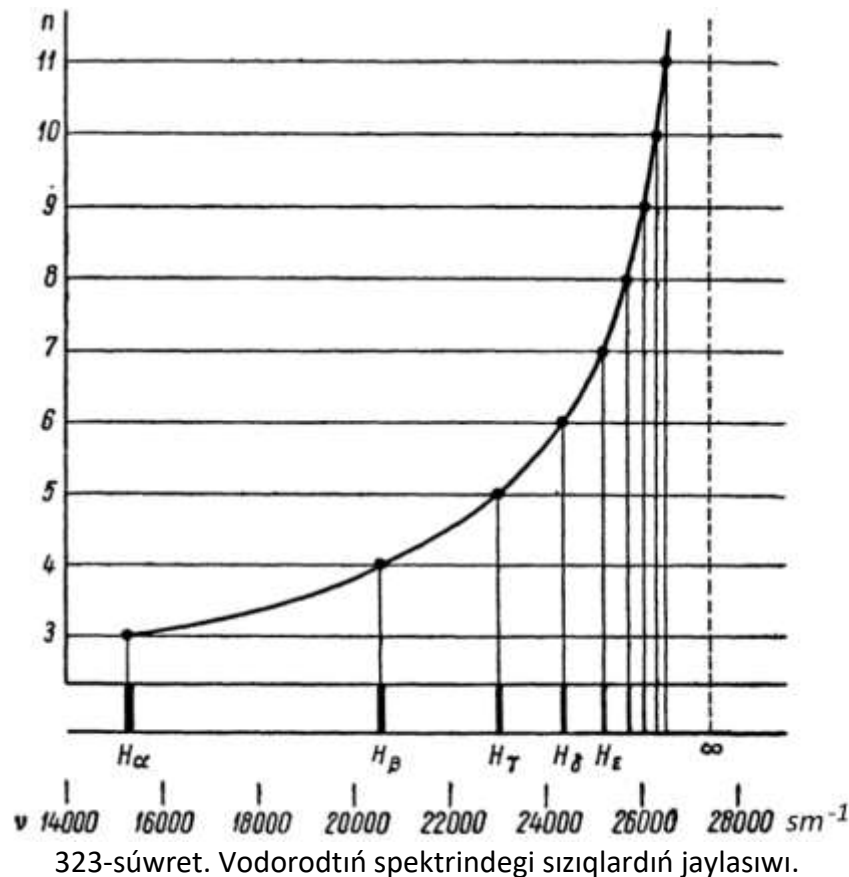
shamasın túsinemiz. Bul teńlikte λ_ν arqalı angstremlerde ańlatılǵan hám vakuumge tiyisli bolǵan tolqın uzınlıǵı belgilengen. Bul jaǵdayda (1)-formula mınaday túрге enedi:

$$\nu = A - \frac{R}{n^2}. \quad (2)$$

Bul teńlikte A menen R arqalı turaqlılar, al n - buringıday pútin sanlar bolıp tabıladı. (2)-formuladan n shaması úlkeygende sızıqlardıń bir birine tıǵız jaylasatuǵınlıǵı, sonıń menen birge

$\nu_{\infty} = A = 27\,419,4 \text{ sm}^{-1}$ yamasa $\lambda_{\infty} = 3646,13 \text{ Å}$ tolqın uzınlıqlarında sızıqlardıń barlıǵı bazı bir sheklik sızıqqa jaqınlasadı. 323-súwrettiń tómengi bóliminde tolqınlıq sanlar shkalasındaǵı vodorodtıń sızıqlarınıń jaylasıwı, al joqarǵı bóliminde ν diń pútin san bolǵan n nen ǵárezligi kórsetilgen. Kórinip turǵanıday, ν_{∞} tuwrısına asimptotalıq jaqınlasatuǵın bir tegis iymeklik alınadı.

(1)- hám (2)-formula boyınsha esaplaw jolı menen alınǵan tolqın uzınlıqlarınıń tájiriybelerde ólshewlerdiń saldarınan alınǵan tolqın uzınlıqlarına qanday dárejede jaqın ekenligi XVI keste de keltirilgen. Bul XVI keste de vodorodtıń birinshi altı sızıqları ushın tolqın uzınlıqlarınıń shamaları keltirilgen.



XVI keste de tolqın uzınlıqlarınıń esaplangan hám baqlangan mánisleriniń arasındaǵı ayırmanıń altınshı belgide bolatuǵınlıǵı hám baqlaw qátelikleriniń sheklerin shıqqaytuǵınlıǵı kórinip tur. Sonlıqtan Balmer formulasın fizikanıń eń dál orınlanatuǵın nızamlardıń qatarına kiredi. Onıń ózine tán ózgesheligi spektrallıq sızıqlardıń izbe-iz qatarınıń tolqın uzınlıqlarınıń pútin sanlardan ǵárezli ekenliginde.

Keyinirek Ridberg (2)-formuladaǵı A hám R shamalarınń arasında ápiwayı bolǵan hám dál orınlanatuǵın qatnastıń orın alatuǵınlıǵın ańǵardı:

$$A = \frac{R}{2^2}.$$

Solay etip, vodorodtıń Balmer seriyasınıń sızıqlarınıń tolqınlıq sanlarınń tek bir turaqlısı bar formula menen beriletuǵınlıǵın kóremiz:

$$\nu = \frac{R}{2^2} - \frac{R}{n^2}, \quad n = 3, 4, 5, \dots \quad (3)$$

R turaqlısı *Ridberg turaqlısı* dep ataladı. Onıń mánisi mınaday

$$R = 109\,677,6 \text{ sm}^{-1}.$$

Bunnan keyin Ridbergke tek vodorodtıń spektrinde ǵana emes, al basqa da elementlerdiń, eń dáslep siltili metallardıń spektrlerinde de nızamlı seriyalardıń bar ekenligin kórsetiwdiń sáti tústi.

Seriyalardaǵı sızıqlardıń jaylasıwların tallaw jolı menen Ridberg sızıqlardıń jiyilikleriniń (yamasa tolqınlıq sanlarınıń) n_1 menen n_2 lerdiń eki funkciyasınıń ayırmasınan turatuǵınlıǵın ashtı:

$$\nu = T_1(n_1) - T_2(n_2). \quad (4)$$

Hár bir berilgen seriya ushın $T_1(n_1)$ turaqlı, al $T_2(n_2)$ ózgermeli mániske iye. Óz aldına alınǵan $T_1(n_1)$ hám $T_2(n_2)$ funkciyaları *spektrallıq termiler* dep ataladı. (3)-formula menen salıstırıw vodorodtıń balmerlik sızıǵı ushın

$$T_1(n_1) = \frac{R}{2^2}, \quad T_2(n_2) = \frac{R}{n^2}$$

teńlikleri orın aladı.

XVI keste.

n	Sızıqtıń belgisi	Esaplanǵan	Baqılǵan
3	H_α	6562,80	6562,81
4	H_β	4861,38	4861,33
5	H_γ	4340,51	4340,47
6	H_δ	4101,78	4101,74
7	H_ε	3970,11	3970,07
8	H_ξ	3889,09	3889,06

Siltili metallardıń seriyalarında sırttan qaraǵanda ayırım seriyalar Balmer seriyasına usaydı. Bunıń durılıǵına litiydiń spektrindegi ayırım seriyalardı alısraqtan qaraw arqalı iseniwge boladı (324-súwret).

Usı jaǵdayǵa tiykarlanıp, Ridberg hár qıylı elementlerdiń spektrallıq termilerine vodorod ushın jazılǵan termilerdiń túrindey túr beriwge tırstı. Atap aytqanda ol term ushın

$$T(n) = \frac{R}{(n + \alpha)^2} \quad (5)$$

túrindegi ańlatpanı jazdı, R - burınǵı turaqlı, n - pútin san, al α bolsa durıs bólshekten turatuǵın bazı bir dúzetiw. Bir seriyanıń barlıq sızıqları ushın bul dúzetiwdiń shaması turaqlı bolıp shıǵadı.

Termiler dálirek mınaday formulanıń járdeminde kórsetiledi:

$$T(n) = \frac{R}{\left(n + \alpha + \frac{\beta}{n^2}\right)^2}. \quad (5a)$$

Bul formulada β arqalı α ge salıstırǵanda ádewir kishi bolǵan ekinshi dúzetiw bolıp tabıladı. $n \rightarrow \infty$ sheginde

$$T(n) = \frac{R}{n^2}$$

formulasına iye bolamız, yaǵnıy n pútin sanı úlkeygende barlıq termiler kem-kemnen "vodorod tárizli" termilerge aylanadı.

Ridberg tárepinen siltili metallarda hár qıylı bolǵan úsh seriyanıń bar bolatuǵınlıǵı tabıldı (324-súwrettegi litiydiń spektrine qarańız). Bul seriyalar mınaday atamalardı iye boldı: 1) bas seriya, 2) birinshi qosımsha seriya, 3) ekinshi qosımsha seriya. Bas seriya eń jaqtılı hám eń ańsat jollar menen alınatuǵın sızıqlardı iye; bas seriyanıń birinshi (aldırǵı) sızıǵı ulıwma berilgen elementtiń spektri ushın tán. Usınıń menen birge, bas seriyanıń sızıqları jutılıwdı da baqlanadı. Bul seriyalardıń hár biriniń ózgermeli termin jetkilikli dárejede dál túrde (5)-túrdegi formula menen beriwge boladı. Bunday jaǵdayda bas seriyanıń ózgermeli termi ushın α dúzetiwin p

arqalı, birinshi qosımsha seriyadağı dúzetiwdi d arqalı, ekinshi qosımsha seriyadağı dúzetiwdi s arqalı belgilew qabil etilgen³². Eki qosımsha seriyalardıń sıyıqları bir shekke umtıladı. Usınıń saldarınan barlıq úsh seriyanıń seriyalıq formulaları mınaday túrge enedi:

bas seriya

$$\nu = A - \frac{R}{(n+p)^2}, n = 2, 3, 4, \dots$$

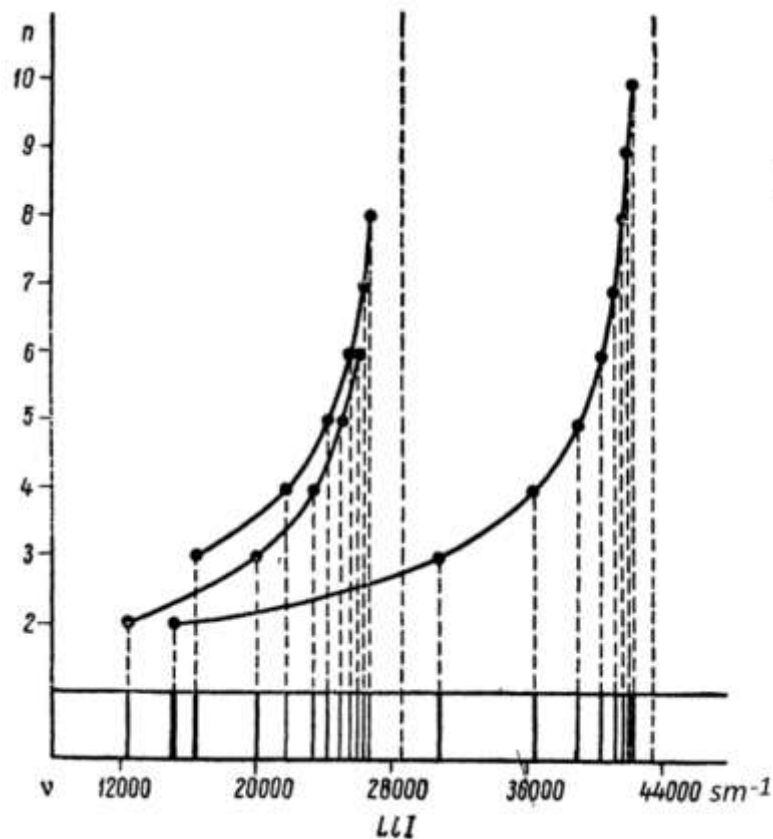
birinshi qosımsha

$$\nu = B - \frac{R}{(n+d)^2}, n = 3, 4, 5, \dots$$

ekinshi qosımsha

$$\nu = B - \frac{R}{(n+s)^2}, n = 2, 3, 4, \dots$$

Bul ańlatpalarda A arqalı bas seriyanıń shegi, al B arqalı qosımsha seriyalardıń ulıwmalıq shegi belgilengen. Anıqlaması boyınsha s, p, d shamaları durıs bólshekler bolıp tabıladı.



324-súwret. Litiydiń spektrindegi seriyalar.

Bunnan keyin Ridberg seriyalardıń shekleriniń arasındaǵı qatnastı taptı, atap aytqanda bas seriyanıń shegi

$$A = \frac{R}{(1+s)^2}, \quad (6)$$

al qosımsha seriyalardıń ulıwmalıq shegi

$$B = \frac{R}{(2+p)^2}$$

túrinde jazıladı.

³² Birinshi qosımsha seriyanıń sıyıqları kóbirek jayılgan, al ekinshi qosımsha seriyanıń sıyıqları keskinirek túrge iye boladı. Sonlıqtan bul seriyalardı "diffuziyalıq" hám "keskin" dep ataydı.

Keyinirek, spektrdiń infraqızıl oblastında siltili metallardıń jáne bir seriyasınıń bar ekenligi anıqlandı (Bergman seriyası). Onıń shegi $\frac{R}{(3+d)^2}$ shamasına teń.

Termlerdiń belgileniwlerin kirgizemiz. Bul belgilew boyınsha $\frac{R}{(3+d)^2}$ termin nX arqalı belgileybiz. Bunday jaǵdayda siltili metallardıń seriallıq formulaları mınaday túrge iye boladı: bas seriya:

$$\nu = 1S - nP, \quad n = 2, 3, 4, \dots$$

ekinshi qosımsha seriya:

$$\nu = 2P - nS, \quad n = 2, 3, 4, \dots$$

birinshi qosımsha seriya:

$$\nu = 2P - nD, \quad n = 3, 4, 5, \dots$$

Bergman seriyası

$$\nu = 3D - nF, \quad n = 4, 5, 6, \dots$$

Haqıyqatında, siltili metallarda sızıqlardıń barlıǵı dubletler bolıp tabıladı hám bul dubletler Li de júdá tar, al Na de bolsa keńirek. Elementtiń atomlıq salmaǵı qanshama úlken bolsa, bul dubletler sonshama keń boladı. Bul dubletlerdiń tábiyatına biz tómende toqtaymız.

Siltili metallardıń spektrlerinde sonday sızıqlar ushırasadı, olardıń tolqınlıq sanları joqarıda keltirilgen ańlatpalarǵa salıstırǵanda termlerdiń basqasha ayırması menen ańlatıladı. Mısalı:

$$\nu = 2S - nP, \quad n = 3, 4, 5, \dots$$

$$\nu = 3P - nS, \quad n = 3, 4, 5, \dots$$

Joqarıda ayılǵanlardıń barlıǵı juwmaqlap, empirikalıq nızamlıqlardı ulıwma túrde bılayınsha aytamız: qanday da bir elementtiń spektrin onıń sızıǵınıń tolqın uzunlıǵı λ yamasa tolqınlıq san ν menen táriyiplewdiń ornına pútin n sanlardıń funkciyası bolǵan spektrallıq termler T menen táriyiplewge boladı. Bunday jaǵdayda spektr az sanlardıń járdeminde táriyiplenedi.

(4)-teńlik boyınsha termlerdiń ayırmasın anıqlaw spektrdiń baqlanatuǵın sızıqlarınıń tolqınlıq sanı ν di beredi.

§ 342. Spektrallıq termlerdiń tábiyatı. Eń bastan baslap spektrallıq termlerdiń belgili bir fizikalıq mániske iye bolıwınıń kerek, al 341-paragraftaǵı (4)-qatnastıń spektrallıq sızıqlardıń shıǵarılıwınıń mexanizmi menen baylanıslı ekenligi ayqın boldı. Biraq, spektrallıq termlerdiń haqıyqıy tábiyatın Borǵa Ridbergtiń jumıslarınan otız jıldan aslam waqıttan keyin anıqlawdıń sáti tústi. Usınıń menen bir waqıtta Bor Ridbergtiń (4)-qatnasınıń fizikanıń tiykarǵı nızamlarınıń biri bolǵan nur shıǵarıw processı baǵınatuǵın nızamdı ańǵartatuǵın kórsetti.

Bor Plank tárepinen usınılǵan (332-paragraf) absolyut qara deneniń vibratorlarınıń energiyası úzliksiz túrde emes, al porciyalar menen shıǵaratuǵınlıǵı haqqındaǵı gipotezadan kelip shıqtı. Bul porciyalardıń shaması ϵ shıǵarılatuǵın nurlardıń jiyiligi ν den ǵárezli³³:

$$\epsilon = h\nu. \quad (1)$$

Bor Planktıń gipotezasın jaqtılıq shıǵarıp turǵan puwlar menen gazlerdiń atomlarına alıp keldi: nur shıǵarıwdıń elementar aktı energiyasını (1)-teńlik penen anıqlanatuǵın monoxromatlıq ν jiyiligindegi ϵ porciyasınıń joǵalıwınan ibarat.

Nurdi shıǵarmastan burınǵı atomnıń energiyasın W_2 , al nur shıǵargannan keyingi energiyasın W_1 arqalı belgileybiz. Bunday jaǵdayda $\epsilon = W_2 - W_1$ hám (1)-teńlik boyınsha:

$$W_2 - W_1 = h\nu$$

yamasa

$$\nu = \frac{W_2}{h} - \frac{W_1}{h} \quad (2)$$

teńliklerin alamız.

(2)-formulanı

³³ ν háribi menen jiyilikler de, tolqınlıq sanlar da belgilenedi.

$$\nu = T_1 - T_2$$

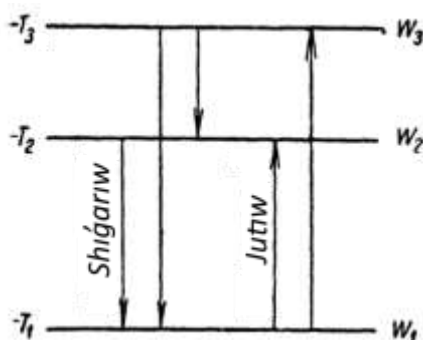
Ridberg qatnası menen salıstırıwdan serialıq termlderin atomnıń energiyasınıń mánisine bazı bir additivlik turaqlıǵa shekemgi dállikte proporcional ekenligin kórsetti. Tájiriye hár bir atomnıń termlderin belgili bolǵan qatarı menen táriyiplenetuǵınlıǵı kórsetetuǵın bolǵanlıqtan, Bor hár bir atomdı energiyanın belgili bolǵan W_i mánislerine sáykes keletuǵın ornıqlı hallar menen táriyiplenedi dep boladı. Bul hallar *stacionar hallar* dep ataladı. Stacionar halda atom nur shıǵarmaydı. Atom bir stacionar haldan ekinshisine ótkende nurlanıw orın aladı. Bunday jaǵdayda, Bordır (2)-jiyilikler qaǵıydası nurlanıwdır óziniń mexanizmin itibarǵa almastan hár qıylı stacionar hallardaǵı atomnıń energiyaları boyınsha olar shıǵaratuǵın jiyiliklerdi anıqlawǵa, yaǵnıy onıń spektrin anıqlawǵa múmkinshilik beredi.

Solay etip, hár bir termge atomnıń energiyasınıń belgili bolǵan mánisi sáykes keledi. Biz dáslep

$$T_i = -\frac{W_i}{h} \quad (3)$$

teńligi orınlanadı dep boljaymız³⁴. Bunday jaǵdayda Bordır (2)-jiyilikler qaǵıydası tikkeley Ridbergtiń qatnasına alıp keledi dep boljaymız [341-paragraftıń (4)-ańlatpası]. Atomnıń energiyası W_i niń algebralıq mánisi boyınsha eń kishi mánisine san mánisi boyınsha eń úlken term sáykes keledi. Energiyanıń mánislerin grafik túrinde kórsetemiz, sonıń menen eń kishi energiyaǵa eń tereń qáddi sáykes keledi dep esaplaymız (325-súwret); oǵan eń úlken term sáykes keletuǵın boladı. Berilgen sızıq payda bolatuǵın qáddilerdiń arasındǵı ótiwge sáykes keletuǵın sızıqlardıń shıǵarılıwın eki qáddini tutastıratuǵın strelkanıń járdeminde súwretleymiz.

Ádettegidey jaǵdaylarda atom energiyanın eń kishi mánisi sáykes keletuǵın stacionar halda turadı. Basqa sóz benen aytqanda: normal jaǵdayda atom eń tómengi qáddide jaylasadı. Usınday halda turǵan atom nurlandırmaydı. Eger, qanday da bir sırtqı energiyalıq tásir menen atom úlken energiyaǵa iye basqa stacionar halǵa ótkeriletuǵın bolsa (yaǵnıy joqarıraq qáddige kóterilgen bolsa), onda keri qaray ótiwdiń barısında ol (2)-formula menen beriletuǵın jiyilik penen belgili bolǵan sızıqtı shıǵaradı. Siltili metallarda eń tereńde 1S qáddi jaylasadı (326-súwret). Energiyası boyınsha oǵan eń jaqını 2P qáddi bolıp tabıladı, bul qáddige normal sharayat 1S ten atomdı ótkeriw eń ańsatı bolıp tabıladı. 2P qáddiden 1S qáddige keri ótiwge bas seriyanın $\nu = 1S - 2P$ bas sızıǵı sáykes keledi. Solay etip, bul sızıqtıń barlıq spektr ushın eń tán sızıq ekenligi túsindiriledi, bul sızıq basqalarına salıstırǵanda ańsat qozdırıladı. Spektrdegi bunnan keyingi sızıqlardı qozdırıw ushın atomǵa onı joqarıraq bolǵan energiya qáddilerine ótkeriw ushın kóbirek energiyanı beriwge tuwrı keledi.



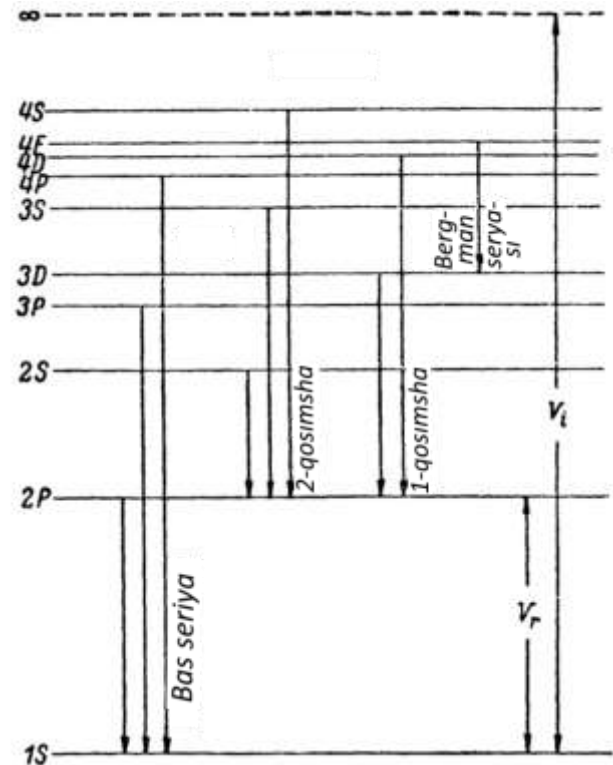
325-súwret.
Atomnıń energiyasınıń qáddileri.

³⁴ Keyinirek biz atomnıń energiyasınıń teris ekenligin kóremiz (potenciallıq energiyanın nolinshi mánisin sáykes túrde saylap alǵan jaǵdayda). Sonlıqtan (3)-formulanıń oń tárepi minus belgisi menen alıńǵan.

Siltili metallardıń spektrlerindegi 341-paragrafta kórsetilgen seriyalardı túsindiriw ushın atomlardagı energiya qáddileriniń arasındagı barlıq ótiwlerdiń barlıgınıń júzege kelmeydi, al olardıń ayırımları ǵana júzege keledi dep esaplaw kerek boladı. Ótiwler ushın sheklerdi, bazı bir *saylap alıw qaǵıydaların* qoyıw kerek. Bul saylap alıw qaǵıydaları mınaǵan alıp kelinedi: S termleri tek P termleri menen, P termleri tek S hám D termleri, D termi tek P hám F termleri menen h.t.b. "kombinaciyalanadı".

326-súwret.

Siltili metallardıń qáddileriniń sxeması.



Saylap alıw qaǵıydaları boyınsha 1S normal qáddige atom tek nP qáddilerinen ǵana óte aladı. Bunday jaǵdayda jiyilikler qaǵıydası boyınsha mınaday sızıqlar

$$\nu = 1S - nP, \quad n = 2, 3, 4, \dots,$$

yaǵnıy bas seriyanıń sızıqları shıǵarıladı. Bunday jaǵdayda 1S terminiń mánisi bas seriyanıń shegin anıqlaydı. 2P qáddine atom nD qáddinen de, joqarıraq bolǵan nS qáddinen de óte aladı. Bunday jaǵdayda mınaday sızıqlar

$$\nu = 2P - nD, \quad n = 3, 4, \dots,$$

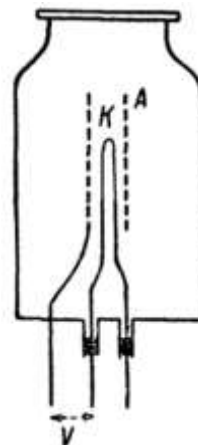
$$\nu = 2P - nS, \quad n = 3, 4, \dots,$$

yaǵnıy qosımsha seriyalardıń ekewiniń de sızıqları shıǵarıladı. 2P qáddi olardıń ulıwmalıq shegin beredi. Solay etip, qáddilerdiń sxeması qosımsha seriyalardıń ulıwmalıǵın túsindiredi.

Nurlanıw atomnıń energiyası kóp stacionar halınan energiyası kishi bolǵan stacionar halǵa ótiwiniń saldarınan júzege keledi. Al jutıw bolsa keri baǵıttaǵı ótiwler menen baylanıslı. Normal halda atom eń kishi energiyaǵa iye halda turatuǵın bolǵanlıqtan, atomnıń joqarıraq qáddilerden normal qáddige ótiwiniń saldarınan payda bolatuǵın spektrallıq sızıqlarınıń tolqın uzınlıqlarına sáykes keletuǵın jaqtılıqlardı ǵana juta alatuǵınlıǵı kelip shıǵadı (yaǵnıy bas seriyanıń sızıqlarınıń jiyiliklerindegi jaqtılıqtı). Joqarıda kórsetilip ótilgenindey, bul jaǵday tájiriybede haqıyqatında da tastıyqlanadı.

327-súwret.

Elektronlardıń urılıwı menen ótkerilgen
tájiriybeniń sxeması.



Qáddilerdiń turǵan orınların tájiriybelerde tikkeley tekserip kóriwge boladı. Bunday tájiriybelerdiń qatarına eń dáslep sxeması 327-súwrette kórsetilgen elektronlardıń urılıwı boyınsha ótkerilgen tájiriybe kiredi. Evakuaciyalangan metall ıdıstıń orayında cilindr túrindegi qızdırılǵan K katodı jaylastırılǵan. Usı katodtan shıqqan elektronlar katod penen cilindr túrindegi metall tordan islengen A anodınıń arasına túsirilgen maydanniń tásirinde tezlenedi. Katod penen anodtıń arasındaqı qashıqlıq ıdıstı toltırıp turǵan izertlenetuǵın puwdıń atomları menen soqlıǵıspaytuǵınday etip saylap alınadı. Usınıń saldarınan anodqa jetken elektronlardıń energiyası eV ǵa teń (V arqalı katod penen anodtıń arasındaqı potenciallar ayırması belgilengen). ıdıstıń diywallarınıń potencialı anodtıń potencialınday etip uslap turıladı. Usınıń saldarınan tor tárizli anodtıń sańlaqları arqalı ótip, bunnan keyin maydan bolmaǵan keńislikte turaqlı tezlik penen qozǵaladı. Usı keńislikte puwdıń atomları menen soqlıǵısıwlar júzege keledi. Bunday jaǵdaydaǵı jıltıdap jaqtılıqtıń shıǵıwın ıdıstıń joqarǵı bólimindegi ayna arqalı baqlawǵa boladı.

Elektronnıń energiyası eV kishi bolǵan jaǵdayda atomdı normal haldan energiyası boyınsha eń jaqın bolǵan halǵa ótkere almaydı hám soqlıǵısıw serpimli túrde boladı hám bunday jaǵdayda hesh qanday jılpıldı baqlanbaydı. Elektronnıń energiyası atomdı kelesi stacionar halǵa ótkeriwge jetkilikli bolsa, ol soqlıǵısıwda tolıǵı menen atomǵa beriledi (elektronnıń massası atomnıń massasınan kóp kishi bolǵanlıqtan). Joqarıda ayılǵanlarǵa sáykes, soqlıǵısıwdan keyin atom normal halǵa ótkende usı $\Delta W = eV$ energiyanı jiyiligi

$$\nu = \frac{\Delta W}{h} = \frac{eV}{h} \quad (4)$$

yamasa tolqın uzınlıǵı

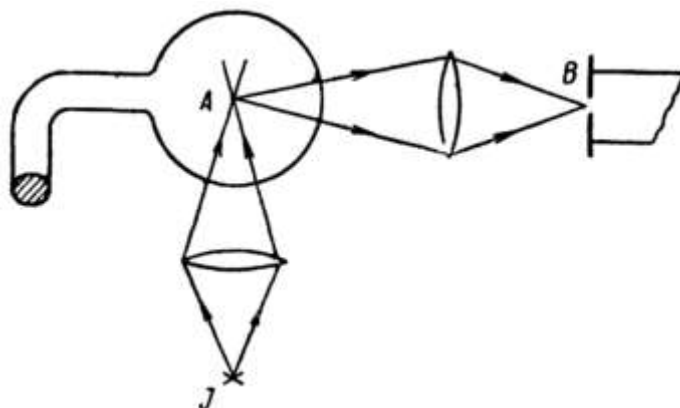
$$\lambda = \frac{ch}{eV}$$

shamasına teń nurlanıw túrinde qaytarıp beredi. Bul teńliklerde c - jaqtılıqtıń boslıqtaǵı tezligi. e , h hám c nıń san mánislerin qoyıp hám λ ni angstremlerde, al V nı voltlerde ańǵartsaq, tezletiwshi potencialdıń mánisi boyınsha shıǵarılatuǵın sızıqtıń tolqın uzınlıǵın anıqlawǵa bolatuǵın qatnastı alıwǵa boladı:

$$\lambda = \frac{12\,340}{V}. \quad (5)$$

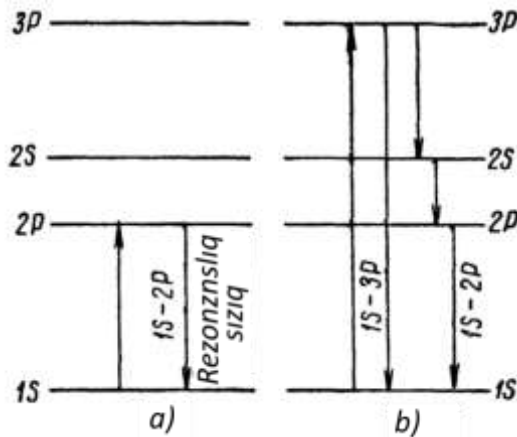
Joqarıda ayılǵanlardan qozdırıwshı elektronlardıń energiyası ástelik penen óskende W energiyanıń mánisi atomdı normal haldan jaqın qozǵan halǵa ótkeriw ushın jetkilikli bolǵansha jaqtılıqtıń shıǵıwınıń orın almaytuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Usı energiyaǵa sáykes keletuǵın tezletiwshi potencial V nıń mánisi *kritikalıq* dep ataladı. Tezletiwshi potencial V nıń mánisi kritikalıq potencialǵa teń bolǵan jaǵdayda tolqın uzınlıǵı (5)-qatnas penen anıqlanatuǵın tek bir sızıq shıǵarıla baslaydı. Bul sızıqtı hám oǵan sáykes keletuǵın potencialdı *rezonanslıq* dep ataydı. Elektronlardıń energiyasınıń bunnan bılay úlkeyiwi menen spektrdiń barlıq sızıqları birinen soń biri kórine baslaydı.

328-súwret.
Puwlardıń fluorescenciya boyınsha
ótkerilgen tájiriybeniń sxeması.



Qáddilerdiń sxemasınan kórinip turǵanıday (326-súwret), bas seriyanıń bas sızığı $\nu = 1S - 2P$ rezonanslıq sızıq bolıp tabıladı. Natriy bolǵan jaǵdayda bul D-sızıq dep atalatuǵın sarı sızıq bolıp tabıladı; oǵan sáykes keletuǵın rezonanslıq potencial 2,1 V ke teń. Haqıyqatında da, natriydiń puwları arqalı energiyası 2,1 eV ten kishi bolǵan elektronlardı ótkergende jaqtılıqtıń jılıpıdap shıǵıwı baqlanbaydı. Elektronlardıń energiyasınıń shaması 2,1 eV ke jetkende tek sarı sızıq ǵana baqlanadı. Kelip urılatuǵın elektronlardıń energiyasınıń ósiwi menen basqa sızıqlar da payda boladı. Tap usınday qubılıslar basqa da elementlerde baqlanadı.

Qáddilerdiń sxemasın tastıyıqlaytuǵın tájiriybelerdiń ekinshi toparı fluorescenciya menen ótkerilgen, solardıń ishinde rezonanslıq jaqtılıq shıǵarıw menen ótkeriletuǵın tájiriybeler bolıp tabıladı. Birinshi ret Vudtıń kórsetkenindey, jiyiligi natriydiń sarı sızığı menen sáykes keletuǵın jaqtılıq penen jaqtılandırǵanda natriydiń puwlarınń ózi sol $\nu = 1S - 2P$ sarı sızıqtı shıǵara baslaydı (rezonanslıq jaqtılıq shıǵarıw). Natriy puwlarınń fluorescenciya boyınsha ótkerilgen tájiriybeniń sxeması 328-súwrette kórsetilgen. Bul súwrette *A* - ishinde kishi basımdaǵı natriy puwları bar ıdıs; *J* - natriy jaqtılıǵınıń deregi. Baqlaw *AB* baǵıtında ótkeriledi. Fluorescenciya spektri spektrograftıń járdeminde izertlenedi. Energiya qáddileri kóz-qaraslarınan shıqqan halda bul qubılıstı natriy atomı jaqtılıqtı jutıp, normal $1S$ haldan qońsı $2P$ halǵa ótedi (329-a súwret). Keri baǵıtta $1S$ halǵa qaytıp kelgende ol $\nu = 1S - 2P$ jiyiligindegi sızıqtı, yaǵnıy jutqan sızıqtı nurlandıradı. Natriydiń puwların jiyiligi natriydiń bas seriyasınıń ekinshi sızığı $\nu = 1S - 3P$ ǵa sáykes keletuǵın ultrafiolet jaqtılıq penen jaqtılandırǵan jaǵdayda da puwdıń jaqtılıq shıǵarıwı baqlanadı (*fluorescenciya*). Biraq, bul jaǵdayda tek jutilǵan sızıqtıń ózi ǵana emes, al qaytadan $\nu = 1S - 2P$ sızıq ta shıǵarıladı. Bul fakt te ańsat túsindiriledi: $3P$ qáddinen atom $1S$ qáddine $\nu = 1S - 3P$ sızığın nurlandırıp tek tikkeley ótip ǵana qoymay (329-b suwret), aralıqtıń qáddiler, misalı $3P$ dan $2S$ ke, $2S$ ten $2P$ ǵa hám eń aqırında $2P$ dan $1S$ ke ótiwi múmkin; bul sońǵı ótiwde $\nu = 1S - 2P$ sarı sızığı nurlandırıladı; basqa eki ótiwlerge spektrdiń uzaq infrakızıl oblastında jatatuǵın $\nu = 1S - 3P$ hám $\nu = 1P - 2S$ sızıqları sáykes keledi. Vud ózi ótkergen tájiriybelerinde bul sızıqlardıń bar ekenligin ańǵarmaǵan.



329-súwret.
Atomlardıń fluorescentlik jaqtılıq shıǵarıwınıń
payda bolıwı.

Qáddilerdiń sxeması tap sonday etip bir atomlı gazler menen puwlardıń fluorescenciyasın tallawǵa múmkinshilik beredi. Bir qatar elementlerdiń (Hg, Sr, R) fluorescenciyasınıń spektrin úyreniw boyınsha usınday tájiriybelerdi A.N.Trenin tárepinen ótkerildi.

§ 343. Vodorod atomınıń hám oǵan uqsas bolǵan ionlardıń qurılısı. Biz joqarıda atomnıń energiya W_i diń belgili bolǵan energiyaları menen táriyiplenetuǵın bir qatar ornıqlı (stacionar) hallarda turatuǵınlıǵınıń tuwrıdan-tuwrı ótkerilgen tájiriybelerde tastıyıqlanatuǵınlıǵın kórdik. Usınıń menen birge bunday hallardıń bolıwı klassikalıq elektrodinamikanıń kóz-qarasları boyınsha múmkin emes (340-paragraf). Demek, atomnıń ishindegi processlerdiń qanday da bir basqa nızamlarǵa baǵınıwı kerek. Bun nızamlardı anıqlawǵa baǵdarlangan birinshi tırısıw 1912-jılı Bor tárepinen islendi. Usınıń menen birge Bor klassikalıq fizikanıń nızamlarınan tolıq bas tart pawǵa tırıstı. Biraq, bunnan keyin klassikalıq fizikanıń kóz-qarasların atomnıń ishinde júretuǵın processlerge pútkilley qollanıwǵa bolmaytuǵınlıǵı (348-paragraf) hám olardı kvantlıq mexikanıń kóz-qarasları menen almasırwıdıń zárúrligi ayqın boldı (362-paragraf). Bor hám bir qatar burjuaziya fizikleri bunnan atomlardıń ishinde júretuǵın processlerdiń obektivlik keńisliklik-waqtılıq táriyiplemesin beriwge bolmaydı degen maǵanadaǵı durıs bolmaǵan, idealistlik juwmaqlardı shıǵarıwǵa tırıstı. Haqıyqatında, másele biziń bilimlerimizdiń keńeyiwi, klassikalıq fizikaǵa belgili bolmaǵan jańa obektivlik nızamlıqlardı anıqlawdan ibarat. Atomlardıń ishinde júzege keletuǵın processlerdiń haqıyqıy nızamların tolıq emes ashqan Bordıń dáslepki teoriyasın paydalanıwıdıń shekleri boldı: teoriya eń ápiwayı atomlardıń, tiykarınan vodorod penen oǵan uqsas bolǵan ionlardıń tiykarǵı qásiyetlerin ǵana anıqlay aldı. Yadrolıq model kóz-qarası boyınsha vodorod atomı zaryadı $E = +e$ ge teń bolǵan yadrodan hám onıń dógeresinde aylanatuǵın zaryadı $-e$ ge teń bolǵan bir elektronnan turadı. Bor *yadronıń dógeresindegi elektronnıń barlıq qozǵalıslarınıń ishinde p qozǵalıslı muǵdarı $\hbar = h/2\pi$ shamasın ($\hbar$ arqalı Plank turaqlısı belgilengen) pútin sanǵa kóbeytkende sáykes keletuǵın qozǵalıslardıń stacionar bolatuǵınlıǵın boljadı:*

$$p = n\hbar. \quad (1)$$

Pútin san bolǵan n sanı 1, 2, 3, ... kvant sanı dep ataladı. Mánisi tek úzlikli bolǵan shamalardıń qatarına teń bolǵan energiya haqqında gáp etkende, onı "kvantlangan" dep ataydı.

Elektron qozǵalıstıń stacionar hallarınıń birinde jaylasqan bolsa, onda ol klassikalıq elektrodinamikanıń nızamlarına baǵınbaydı hám sonıń nátiyjesinde energiyanı (jaqtılıqtı) nurlandırmaydı. Jaqtılıqtı shıǵarılıwı tek bir stacionar haldan (W_i energiyanıń úlken mánisine iye) basqa stacionar halǵa ótkende (W_i energiyasınıń shaması kishi bolǵan) júzege keledi; bunday jaǵdayda, 342-paragraftaǵı (2)-formulaǵa sáykes jiyiligi

$$\nu_{ik} = \frac{W_k}{h} - \frac{W_i}{h} \quad (2)$$

shamasına teń bolǵan monoxromat jaqtılıq shıǵarıladı.

Bul gipotezalardıń durıs ekenligin tastıyıqlaytuǵın jaǵday (2)-formula menen anıqlanǵan v_{ik} shamalarınń tájiriyybede anıqlanǵan mánislerge dál sáykes keliwi bolıp tabıladı. Bunday jaǵdayda uqsaslıq tek vodorod atomı ushın emes, al vodorodqa uqsas bolǵan barlıq ionlar ushın da, yaǵnıy bir elektronınan basqa barlıq elektronlarınan ayrılgan ionlarda orın aladı.

Vodorod atomın da, oǵan uqsas bolǵan ionlardı birgelikte qaraw ushın zaryadı $E = Ze$ shamasına teń yadrodan hám bir elektronnan turatuǵın atomlıq sistemanı qaraymız. Vodorod ushın $Z = 1$, bir ret ionlastırılǵan geliy ushın (He^+) $Z = 2$, eki ret ionlastırılǵan litiy ushın (Li^{++}) $Z = 3$ h.t.b. Dáslep yadronıń massasın elektronnıń massası m ge salıstırǵanda sheksiz úlken dep esaplaymız.

Yadro menen elektronnıń arasındadı óz-ara tásirlesiw kúshi kulonlıq kúsh bolıp tabıladı:

$$f = -\frac{Ze^2}{r^2}.$$

Bul formulada r arqalı yadro menen elektronnıń arasındadı qashıqlıq belgilengen. Usı kúshtiń tásirinde elektron yadronıń dógeresinde keplerlik ellips túrindegi, dara jaǵdayda dóńgelek túrindegi orbita boyınsha qozǵaladı. Dáslep dóńgelek orbitalarda irkilemiz.

Kulonlıq maydandadı elektronnıń potentsiallıq energiyası mınaǵan teń:

$$W_p = -\frac{Ze^2}{r}.$$

Kinetikalıq energiya bolsa

$$W_k = \frac{mv^2}{2}$$

shamasına teń. Toliq energiya bolǵan

$$W = W_p + W_k$$

shaması mınaǵan teń:

$$W = -\frac{Ze^2}{r} + \frac{mv^2}{2}.$$

Kulon kúshi bolǵan $f = -\frac{Ze^2}{r^2}$ kúshi orayǵa umtılwshı kúsh bolıp tabıladı. Dóńgelek orbita ushın onıń mánisi $\frac{mv^2}{2}$ qa teń. Bunnan

$$\frac{Ze^2}{r} = mv^2 \quad (4)$$

teńligine iye bolamız.

Usı qatnastı paydalanıp, tolıq energiya ushın jazılǵan (3)-teńlikti bılayınsha kóshirip jazamız:

$$W = -\frac{Ze^2}{2r}. \quad (5)$$

(1)-teńliktegi Bordıń kvantlıq shárti stacionar orbitalardıń radiusların anıqlawǵa múmkinshilik beredi. Dóńgelek orbita ushın qozǵalıǵ muǵdarınıń momenti p mınaǵan teń:

$$p = mvr. \quad (6)$$

(4)- hám (6)-teńliklerden dóńgelek orbitalardıń radiusları ushın

$$r = \frac{p^2}{me^2Z}$$

ańlatpasın alamız. Bul teńlikke p nıń ornına onıń (1)-teńlik boyınsha mánisin qoysaq, onda

$$r = n^2 \frac{\hbar^2}{me^2} \cdot \frac{1}{Z} \quad (7)$$

ańlatpasına iye bolamız.

$$a_0 = \frac{\hbar^2}{me^2}$$

shaması vodorod atomındadı birinshi, yaǵnıy yadroǵa eń jaqın bolǵan dóńgelek orbitanıń radiusı bolıp tabıladı. Bul teńlikke $\hbar$, m hám e niń ornına olardıń mánislerin qoysaq, onda $a_0 = 0,529 \cdot 10^{-8}$

⁸ *sm* shamasın alamız. Bunnan Bordiń gipotezası tiykarında alıńǵan vodorod atomınıń ólshemleriniń gazlerdiń kinetikalıq teoriyasınan alınatuǵın ólshemlerge teń ekenligi kórinip tur. Vodorod atomındaǵı hám oǵan uqsas bolǵan atomlardaǵı qalǵan atomlardıń radiusların a_0 arqalı ańlatıwǵa boladı:

$$r = n^2 \frac{a_0}{Z}. \quad (7a)$$

Tolıq energiya ushın (5)- hám (7)-qatnaslardıń tiykarında mınaǵan iye bolamız:

$$W = - \frac{me^4 Z^2}{2\hbar^2 n^2}. \quad (8)$$

Endi

$$R = \frac{me^4}{4\pi\hbar^3 c} \quad (9)$$

turaqlısın kirgizemiz. Bul turaqlıda c arqalı jaqtılıqtıń boslıqtaǵı tezligi belgilengen. Bunday jaǵdayda tolıq energiya

$$W = - \frac{RhcZ^2}{n^2} \quad (8a)$$

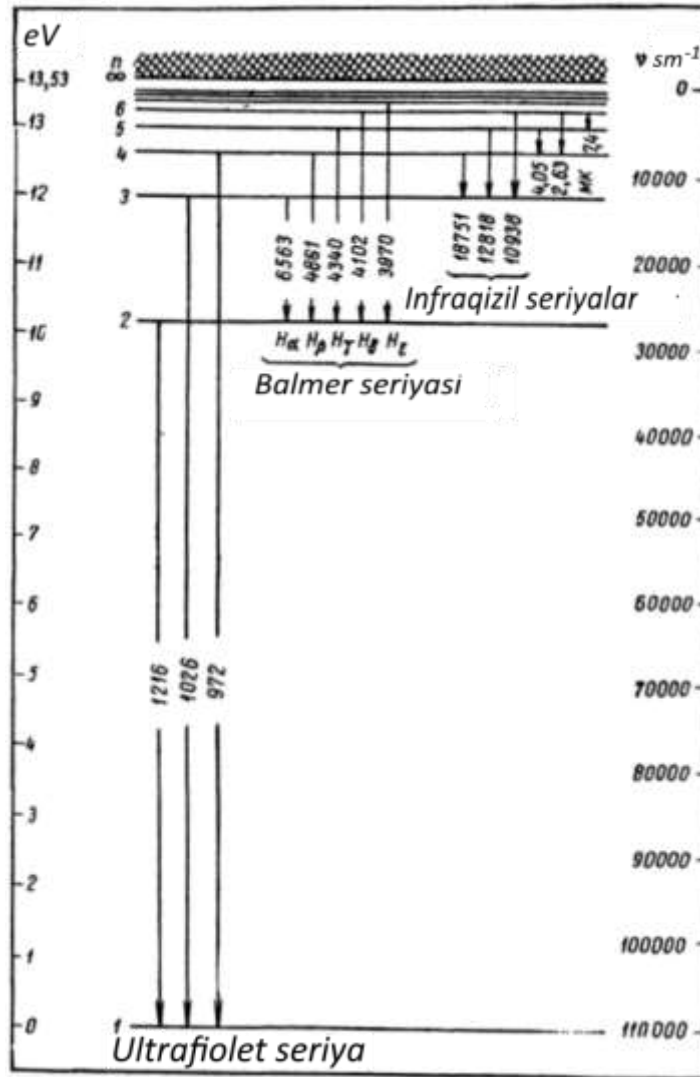
túrine enedi. (8a) ańlatpasın 342-paragraftaǵı termler menen stacionar hallardıń energiyası menen baylanıstı sáwlelendiretuǵın (3)-formula menen salıstırıp, term ushın mınaday teńlikti tabamız:

$$T = \frac{RcZ^2}{n^2}. \quad (10)$$

Eger termdi tolqınlıq sanlarda ańlatsaq hám olardı ν arqalı belgilesek, onda

$$\nu = \frac{RZ^2}{n^2} \quad (10a)$$

ańlatpasına iye bolamız. $Z = 1$ bolǵan jaǵdayda bul ańlatpa vodorod tárizli termlerdiń empirikalıq mánislerine dál sáykes keledi [341-paragraftaǵı (3)-formulaǵa qarańız]. R shamasınıń mánisi Ridberg turaqlısınıń mánisine teń. Onıń (9)-teńlik boyınsha Plank turaqlısı menen jaqtılıqtıń tezligi menen anıqlanǵan san mánisi empirikalıq mánis penen jaqsı sáykes keledi.



330-súwret. Vodorodtın qáddileriniń sxeması.

Ulıwma jaǵdayda yadro menen bir elektronnan turatuǵın atomlıq sistema úlken n_k kvant sanı menen táriyiplenetuǵın stacionar haldan kishi n_i kvant sanı menen táriyiplenetuǵın stacionar halǵa ótkende Bor qaǵıydasına sáykes jıylıǵınıń mánisi

$$\nu_{ik} = \frac{W_k}{h} - \frac{W_i}{h} = \frac{me^4 Z^2}{4\pi\hbar^2} \left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_k^2} \right)$$

shamasına teń bolǵan sızıqtı shıǵaradı. Eger tolqınlıq sanǵa ótetuǵın bolsaq, onda

$$\nu = RZ^2 \left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_k^2} \right) \quad (11)$$

ańlatpasına iye bolamız.

$Z = 1$ hám $n_i = 2$ teńlikleri orınlangan jaǵdayda alınǵan formula Balmerdiń vodorodlıq formulasına dál sáykes keledi. Solay etip, Balmer seriyası vodorod atomı joqarı stacionar hallardan ekinshi stacionar halǵa ótkende shıǵarıladı eken (330-súwret). Birinshi stacionar halǵa (normal stacionar halǵa) ótkende sızıqlardıń mınaday seriyası shıǵarıladı:

$$\nu = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 2, 3, 4, \dots$$

Spektrdiń alıstaǵı ultrafiolet oblastında jatqan vodorod sızıqlarınıń bul seriyası usı seriyanıń bar ekenligin teoriyalıq jollar menen bolǵannan keyin Layman tárepinen ótkerilgen eksperimentlerde tabıldı. Onıń bas sızıǵı $\lambda = 1216 \text{ Å}$ tolqın uzınlıǵına sáykes keledi.

Úshinshi stacionar halğa ótkende spektrdiń infraqızıl oblastında jatatuǵın eriya shıǵarıladı:

$$\nu = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 4, 5, 6, \dots$$

Al tórtinshi hám besinshi hallarǵa ótkende alıstaǵı infraqızıl seriyalar shıǵarıladı:

$$\nu = R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad \nu = R \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

Bul sızıqlardıń baqlanǵan tolqın uzınlıqları XVII keste de berilgen.

XVII keste

n	$R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$R \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right)$
4	18 761 Å	-	-
5	12 818,3 Å	4,052 mkm	-
6	10 938,2 Å	2,63 mkm	7,463 mkm

Solay etip, atomlıq vodorodtıń spektriniń barlıǵı $Z = 1$ bolǵan jaǵdayda (11)-Balmer formulası menen tolıq qamtıp alınadı. Tap sol formula $Z = 2$ bolǵan jaǵdayda ionlastırılǵan geliydiń spektrin beredi. Spektroskopiya da neytral atomdı rim cıfrası I menen, bir ret ionlastırılǵan óń iondı II, eki ret ionlastırılǵan óń iondı III h.t.b. arqalı belgileydi. Usı belgilewdi kirgizip, He II seriyaların

$$\nu = 4R \left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_k^2} \right)$$

túrine iye bolatuǵınlıǵın kóremiz. Pri $n_i = 1, n_k = n = 2, 3, 4, \dots$ bolǵan jaǵdayda spektrdiń shetki ultrafiolet oblastında jatqan seriya alınadı:

$$\nu = 4R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

Bul seriyanıń birinshi eki sızıqlarınıń tolqın uzınlıqları $\lambda = 303,78$ hám $\lambda = 256,55$ Å ge teń. $n_i = 2, n_k = n = 3, 4, 5, \dots$ bolǵan jaǵdayda

$$\nu = 4R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

seriyası alınadı. Onı

$$\nu = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{\left(\frac{n}{2}\right)^2} \right)$$

túrinde de jazıwǵa boladı. Bunnan jup n lerde onıń vodorodtıń ultrafiolet seriyası menen sáykes keletuǵın sızıqlardı beretuǵınlıǵı kelip shıǵadı. $n = 3, 5, 7, \dots$ teńlikleri orınlangan jaǵdaylarda vodorodtıń sáykes $\lambda = 1640,51$ Å, $\lambda = 1084,99$ Å tolqın uzınlıqlarınıń arasında jaylasatuǵın sızıqlar alınadı h.t.b. Usınıń menen birge

$$\nu = 4R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right) = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{\left(\frac{n}{2}\right)^2} \right)$$

sızıqları ushın da tap sonday jaǵday orın aladı. Onıń sızıqlarınıń hár birewinen keyingi sızık vodorodtıń balmerlik sızıǵına sáykes keledi. Bul seriya Bor teoriiyası payda bolmadan burın bazı bir juldızlardıń hám dumanlıqlardıń spektrlerinde baqlandı hám olardı qáte túrde vodorodqa tiyisli dep esapladı. Keyinirek, ol taza geliydiń jaqtılıq shıǵarıwında laboratoriyalıq sharayatlarda da alındı. Bunday jaǵdayda ólshewler geliydiń sızıqlarınıń vodorodlıq sızıqlarǵa dál sáykes kelmeytuǵınlıǵın kórsetti. Bul jaǵday XVIII keste de kórinip tur.

XVIII keste.

He II	6560,13	5411,55	4859,34	4541,61	4338,69	4199,85	4100,00
H I	6562,81	-	4861,33	-	4340,47	-	4101,74

Tap usınday jaǵday ekinshi sıızığı $\lambda = 1215,180 \text{ \AA}$ shamasına teń $\nu = 4R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right)$ seriyasına da tiyisli. Al, sonıń menen bir waqıtta vodorodtıń ultrafiiolet seriyasınıń birinshi sıızığıńıń tolqın uzınlığı $\lambda = 1215,683 \text{ \AA}$ ge teń.

Eger Ridberg turaqlısınıń san mánisi bir ret Balmerdiń vodorodlıq seriyasınıń tolqın uzınlıqlarınıń empirikalıq mánisleri boyınsha, al ekinshi ret ionlastırılǵan geliydiń tolqın uzınlıqlarınıń empirikalıq mánisleri boyınsha anıqlanatuǵın bolsa, onda hár qıylı mánisler alınadı:

$$R_H = 109\,677,6 \text{ sm}^{-1}; R_{He} = 109\,722,3 \text{ sm}^{-1};$$

Olardıń qatnası mınaǵan teń:

$$\frac{R_H}{R_{He}} = 0,999593.$$

Bul qatnas Bor teoriiyası tárepinen tikkeley túsindiriledi. Haqıyqatında da, joqarıda keltirilgen esaplawlarda yadronı qozǵalmaydı dep esapladıq. Bunday jaǵdayda yadronıń massasınıń onıń dógeresinde aylanıp júrgen elektronıń massasına salıstırǵanda sheksiz úlken bolıwı kerek. Sonlıqtan yadronıń yadro menen elektronıń ulıwmalıq salmaq orayınıń dógeresindegi qozǵalısnıń itibarǵa alıw kerek boladı. Sáykes esaplawlar yadronıń qozǵalısnıń energiyasınıń hám Ridberg turaqlısınıń mánislerine tásir etetuǵınlıǵın kórsetedi. Yadronıń qozǵalısnıń esapqa alǵanda Ridberg turaqlısı ushın mınaday ańlatpa alınadı:

$$R = \frac{R_\infty}{1 + \frac{m}{M}} \quad (12)$$

Bul ańlatpada M - yadronıń massası, m - elektronıń massası, R_∞ - yadro qozǵalmaydı dep esaplangan jaǵdaydaǵı, yaǵnıy (9)-formula boyınsha anıqlanatuǵın Ridberg turaqlısı. Usı qatnastı paydalanǵanda tájiriýbelerdiń nátiýjelerine tolıq sáykes keletuǵın

$$\frac{R_H}{R_{He}} = \frac{1 + \frac{m}{M_{He}}}{1 + \frac{m}{M_H}} = \frac{1 + \frac{1}{4 \cdot 1836}}{1 + \frac{1}{1836}} = 0,999696$$

shamasın alamız.

Usıǵan sáykes keletuǵın atomlıq salmaǵı 2 ge teń bolǵan vodorodtıń izotopındaǵı (deýteriydegi) awısıwdıń ádettegi vodorodtıń sıızıqlarına qatnası boyınsha da anıqlanadı.

XIX keste.

Belgisi	α	β	γ	δ
H^1	6562,846	4861,322	4340,458	4101,731
D^2	6561,063	4759,992	4339,277	4100,621
$\Delta\lambda_{baql}$	1,783	1,330	1,181	1,110
$\Delta\lambda_{esapl}$	1,783	1,326	1,185	1,119

XIX kestede vodorodtıń awır izotopı ushın esaplangan tolqın uzınlıqları menen V.I.Chernyaev tárepinen úlken difrakciyalıq pánjereniń járdeminde ólshewdiń nátiýjesinde alınǵan shamalar salıstırılǵan. Joqarǵı eki qatarda ádettegi vodorodtıń (H^1) hám onıń awır izotopınıń (deýteriydiń, D^2); úshinshi qatarda olardıń arasındaǵı ayırma, al tórtinshi qatarda (12)-qatnastıń tiykarında esaplawdıń nátiýjesinde alınǵan shamalardıń arasındaǵı ayırma keltirilgen.

Tábiyiy aralaspada vodorodtıń awır izotopı D^2 jeńil vodorodqa shama menen 1:5000 qatnasınday bolıp aralasqan. Sonlıqtan tábiyiy vodorodtıń spektrin baqlaǵanda D^2 niń sıızıqları júdá ázzi hám olardıń tek júdá úlken ekspoziciyalarda ǵana baqlanıwı múmkin. D^2 niń sıızıqların

baqlaw ushın ádette vodorodıń, mısalı súwdıń elektroliziniń nátiyjesinde awır izotop penen jasalma túrde bayıtılǵan aralaspasın paydalanadı. Tap sonday awısıw deyteriydiń (D^2) hám tritiydiń (atomlıq salmaǵı 3 ke teń bolǵan vodorodtıń izotopı, T^3) sızıqlarınıń arasında baqlanadı.

Li III, Be IV, ... lardıń spektrleri $Z = 3, 4, \dots$ bolǵan jaǵdaylar ushın Balmerdiń (11)-ulıwmalasqan formulası menen óz ishine aladı. Olardıń sızıqları spektrdiń uzaq ultrafiolet oblastına jılısqan. Li III, Be IV, B V hám C VI ushın bas seriyanıń sızıqlarınıń jiyilikleri

$$\nu = RZ^2 \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (13)$$

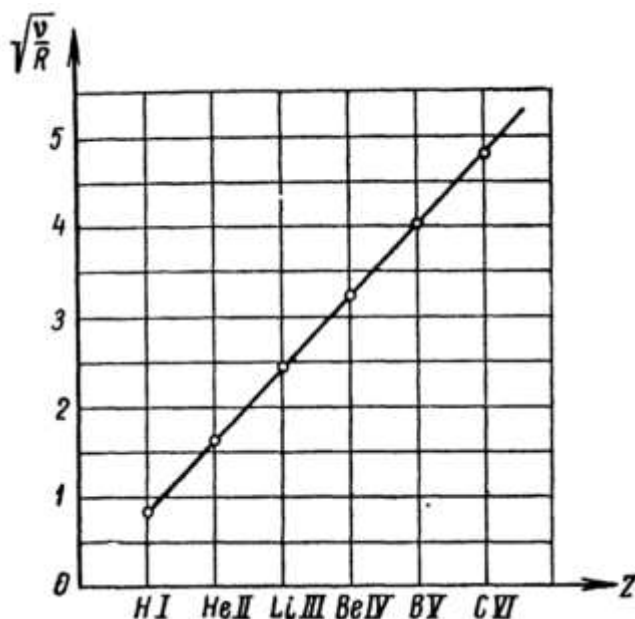
formulasınıń járdeminde beriledi. H I, He II, Li III, Be IV, B V, C VI qatarı izoelektronlıq dep ataladı, sebebi yadronıń dógereginde aylanatuǵın elektronlardıń sanı onıń barlıq aǵzaları ushın birdey. Kórsetilgen ionlardıń yadrolarınıń massalarınıń hár qıylı bolǵanlıǵı sebepli olar ushın Ridberg turaqlısınıń mánisleri hár qıylı; Li III hám Be IV ushın olar: $R_{Li} = 109\,728,6$, $R_{Be} = 109\,730,5$ shamalarına teń. Kórinip turǵanıday, R diń arasındaǵı ayırma úlken emes hám biz olardı bunnan bılay R_∞ shamasına teń dep esaplaymız. Bunday jaǵdayda (13)-formula izoelektronlıq qatardıń baslarındǵı sızıqlar ushın:

$$\nu = RZ^2 \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right) = \frac{3}{4} RZ^2$$

teńligin beredi. Bunnan

$$\sqrt{\frac{\nu}{R}} = \sqrt{\frac{3}{4}} \cdot Z \quad (14)$$

formulasın alamız. Tap usı ǵárezlikke usaǵan ǵárezlikti izoelektronlıq qatardıń bir birine usaǵan sızıqların salıstırǵanda da (yaǵnıy berilgen n_k hám n_i kvant sanları menen táriyiplenetuǵın qáddilerdiń arasındaǵı ótiwlerde payda bolatuǵın) alıwǵa boladı. Bul *ǵárezliklerden izoelektronlıq qatardıń bir birine uqsas sızıqlarınıń jiyiliklerinen alınǵan kvadrat túbirdiń zaryadlıq san Z ke proporcional ótetuǵınlıǵın kórsetedi*. 331-súwrette $\sqrt{\nu/Z}$ shamasınıń Z ten grafikalıq ǵárezligi kórsetilgen. Bul ǵárezlik tuwrı sızıq penen kórsetiledi. Bul qatnastı *Mozli nızamı* dep ataydı³⁵.



331-súwret.
Izoelektronlıq qatar elementleri ushın
 $\sqrt{\frac{\nu}{R}}$ shamalarınıń zaryadlıq san Z ten
ǵárezligi.

³⁵ Genri Gvin Djefris Mozli (ingliz tilinde Henry Moseley; 1887-jılı 23-noyabr kúni tuwılǵan hám 1915-jılı 10-avgust kúni Osman imperiyasındaǵı Gallipol yarım atawında Ekinshi Jer júzi urısınıń sawashlarınıń birinde 28 jasında qaytı bolǵan britaniyalı fizik, rentgen spektroskopiyasınıń tiykarın salıwshılardıń biri. Geypara kitaplarda Mozli diń ornına Mozeli sózi de qollanıladı (Awdarıwshılar).

Vodorod atomının modeli onıń kritikalıq potenciallyarın da anıqlawǵa múmkinshilik beredi. Misalı, birinshi ultrafiolet seriyanı qozdıruw ushın, yaǵnıy

$$\nu = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right), \quad \lambda = 1216 \text{ \AA}$$

sızıǵın qozdıruw ushın vodorod atomındaǵı elektrondı $n = 2$ orbitasına ótkeriw kerek. Onıń ushın 342-paragraftaǵı (5)-formula boyınsha

$$V_1 = \frac{12\,340}{1216} = 10,5 \text{ eV}$$

tezletiwshi potencial kerek boladı.

Elektrondı atomnıń normal orbitasınan sheksizlikke alıslatıw ushın, yaǵnıy atomnıń ionizaciya ushın san mánisi normal orbitanıń energiyasına teń bolǵan jumıstı orınlaw kerek:

$$|W| = \frac{Rhc}{1^2} = 2,15 \cdot 10^{-11} \text{ erg}$$

yamasa elektronvoltlerde

$$|W| = 13,53 \text{ eV}$$

shamasındaǵı jumıstı islew kerek.

Sáykes potencialdı *ionizaciyalıq potencial* dep ataydı. Termler energiyalarǵa proporcional bolǵanlıqtan, *ionizaciyalıq potencial eń tereńdegi termnıń mánisi boyınsha anıqlanadı*. Ionizaciyalıq potenciallyardı ólshewdiń usılları II tomdaǵı 188-paragrafta qaraldı.

Ádettegi jaǵdaylarda vodorod eki atomnan turatuǵın bolǵanlıqtan, kritikalıq potenciallyardı eksperimentlerde tekserip kóriw qıyınlasadı. Sonlıqtan, dáslep molekulalardı atomlarǵa bóliw hám onnan keyin olardıń jaqtılıqtı shıǵarıwı ushın qozdıruw kerek boladı. Bunı júdá joqarı temperaturalarda dissociaciyalangan vodorod penen eksperimentler ótkeriw jolı menen islewge boladı. Usınday jollar menen alınǵan qozdıruw potenciallyarı menen ionizaciya potencialı teoriyalıq alınǵan mánislerge jetkilikli dárejede sáykes keledi.

Atomnıń ionizaciya tek elektronlardıń urılıwınıń ǵana esabınan emes, al jaqtılıqtıń jutılıwınıń esabınan da júzege keledi. Atom tárizli vodorod ushın jutılıw sızıǵı ultrafiolet seriyasınıń sızıqları $\nu = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ bolıp tabıladı. Usı sızıqlardıń birine sáykes keletuǵın jaqtılıqtı jutqanda atom normal haldan sızıqtıń jiyiligi qansha úlken bolsa, sonshama joqarı halǵa ótkeriledi. Jutılǵan jaqtılıqtıń jiyiligi ν_i seriyanıń shegi $R/1^2$ qa sáykes keletuǵın ν_∞ jiyiliginen úlken bolǵan jaǵdayda elektron atomnan pútkilley julıp alınadı, bunday jaǵdayda artıqmash energiya oǵan tezlik beriw ushın jumsaladı. Jaqtılıqtıń tásirinde elektronnıń atomnan julıp alınıw processı fotoionizaciya dep ataladı; oǵan seriyanıń shegi bolǵan ν_∞ shamasınıń sheklerinensırtta jaylasatuǵın jutıwdıń tutas spektri sáykes keledi. Usıǵan sáykes, 330-súwrette $n = \infty$ qáddiden joqarıda jaylasqan shtrixlangan jolaq energiyanıń múmkin bolǵan energiyalarınń úzliksiz oblastı jaylasadı.

He II, Li III, Be IV, B V, C VI ionlarınń tap sonday bolǵan potenciallyarı, yaǵnıy olardan eń sońǵı elektrondı jutıp alıw jumısları (basqaları julıp alınǵan dep esaplanadı) olardıń eń tereń termi bolǵan RZ^2 shamasınıń mánisi boyınsha anıqlanadı.

§ 344. Ellips tárizli orbitalar. Ulıwma jaǵdayda yadronıń *kulonlıq maydanında* qozǵalatuǵın elektron *ellips tárizli* orbita boyınsha qozǵaladı. Bunday jaǵdayda 343-paragraftaǵı (1)-Bor shárti múmkin bolǵan barlıq ellipslerdiń ishindegi qaysısınıń atomnıń stacionar halına sáykes keletuǵınlıǵın anıqlaw ushın jetkilikli emes.

Stacionar hallardı qanaatlandıratuǵın shártler ulıwma túrde Zommerfeld tárepinen berildi hám onıń mánisi mınadan ibarat: eger i erkinlik dárejesine iye mexanikalıq sistema q_i ulıwmalastırılǵan koordinatalar hám olarǵa sáykes keletuǵın

$$p_i = \frac{dW_k}{dq_i}$$

ulıwmalastırılğan impulsler menen táriyiplenetuǵın bolsa (W_k - sistemanıń kinetikalıq energiyası, $\dot{q}_i$ - koordinatadan waqıt boyınsha alınğan tuwındı), onda

$$\oint p_i dq_i = n_i h \quad (1)$$

shártin qanaatlandıratuǵın hallar stacionar bola aladı. Bul teńlikte h - Plank turaqlısı, n_i - pútin *kvant sanı*. Bul shártlerdi *kvantlıq shártler* dep ataydı.

(1)-kvantlıq shártlerdegi integrallaw q_i ózgeriwshisiniń barlıq ózgeriw oblastına tarqatıladı.

(1)-kvantlıq shártlerdiń tiykarında ótkerilgen esaplawlar tek ápiwayı atomlıq sistemalar ushın tájiriybeler menen sáykes keletuǵın nátiyjelerdi beredi. Quramalıraq bolğan jaǵdaylarda (1)-shártler orınlanbaydı hám esaplawlardı házirgi zaman kvantlıq mexanikasınıń tiykarında ótkeriw kerek boladı. Biraq, usınday jaǵdaylardıń orın alıwına qaramastan, biz (1)-kvantlıq shártlerdiń qollanıwında toqtap ótemiz. Sebebi olar bizlerdiń atomlar haqqındaǵı bilimlerimizdiń rawajlanıwında úlken orındı iyeledi.

Dóngelek orbita bolğan jaǵdayda (1)-shártler Bordıń burınǵı bir shártine alıp kelinedi. Haqıyqatında da, berilgen radiusta hám orbitanıń berilgen tegisliginde sheńber boyınsha qozǵalı bir erkinlik dárejesine iye bolğan qozǵalı bolıp tabıladı. Bunday jaǵdayda birden-bir koordinata sıpatında $\varphi = 0$ den $\varphi = 2\pi$ ge shekemgi sheklerde ózgeretuǵın φ azimuttıń alınıwı múmkin. Bul koordinataǵa sáykes keletuǵın ulıwmalastırılğan impuls elektronnıń qozǵalı muǵdarınıń momenti bolıp tabıladı; ol óziniń turaqlı mánisin saqlaydı $p_\varphi = p = \text{const}$. Bunday jaǵdayda (1)-shártler mınaǵan alıp kelinedi:

$$\int_0^{2\pi} p \cdot d\varphi = nh$$

yamasa

$$2\pi p = nh$$

hám bunnan

$$p = n \left(\frac{h}{2\pi} \right) = n\hbar$$

ańlatpasına iye bolamız.

Ellips tárizli orbita bolğan jaǵdayda yadro ellipstiń fokuslarınıń birinde jaylasadı.

Tegis ellips tárizli orbita eki erkinlik dárejesine iye qozǵalı bolıp tabıladı. Bunday qozǵalıstı táriyiplew ushın biz r hám φ polyar koordinatalarınan paydalanamız. Sonlıqtan, (1)-shártler boyınsha

$$\int_0^{2\pi} p_\varphi \cdot d\varphi = n_\varphi h, \quad \int_0^{2\pi} p_r \cdot d\varphi = n_r h \quad (2)$$

shártlerin qanaatlandıratuǵın ellipsler stacionarlıq boladı. Pútin bolğan n_φ hám n_r sanları *azimutallıq* hám *radiallıq kvantlıq sanlar* dep ataladı.

(2)-teńliklerdegi birinshi integral qozǵalı muǵdarınıń momenti $p_\varphi = p$ turaqlı bolǵanlıqtan dóngelek orbita bolğan jaǵdaydaǵıday

$$p = n_\varphi \left(\frac{h}{2\pi} \right) = n_\varphi \hbar$$

teńligine iye bolamız.

Ekinshi integralda integrallaw r diń ózgeriwiniń barlıq oblastına, yaǵnıy perigeliydegi r_{min} nen afeliydegi r_{max} shamasına shekemgi ózgeriw oblastına hám perigeliyge qaytqanda r_{min} ge shekemgi oblastqa tarqalıwı kerek. Sáykes esaplawlar ekinshi kvantlıq shárttiń nátiyjesinde ellipstiń ekscentrisiteti e ge belgili bir shektiń qoyılatuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Bul shektiń mánisiniń

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} = \frac{n_r + n_\varphi}{n_\varphi}$$

teńligin qanaatlandırıwı kerek.

Zommerfeldtiń shártleri aqır-ayaǵında (3)- hám (4)-teńlikler orınlanatuǵın ellips tárizli orbitalar stacionar orbitalar bolıp tabıladı.

Radiallıq hám azimutallıq kvantlıq sanlar n_r menen n_φ diń qosındısı $n_r + n_\varphi$ shamasın *bas kvant sanı* dep ataydı. Bas kvant sanın n arqalı belgilep

$$n_r + n_\varphi = n \quad (5)$$

teńligin alamız. Bunday jaǵdayda (4)-shárt mınaday túrge enedi:

$$1 - \varepsilon^2 = \frac{n_\varphi^2}{n^2}. \quad (4a)$$

Cáykes esaplaw elektronnıń stacionar qozǵalıısına sáykes keletuǵın ellips tárizli orbitalardıń úlken yarım kósheri ushın mınaday ańlatpanı alamız:

$$a = n^2 \frac{\hbar^2}{me^2 Z}. \quad (6)$$

Bul teńlikte n arqalı bas kvant sanı belgilengen. Bul ańlatpanı 343-paragraftaǵı (7)-ańlatpa menen salıstırıp mınanı kóremiz: ellipslerdiń úlken yarım kósherleri sáykes dóńgelek orbitalardıń radiuslarına sáykes keledi. Dóńgelek orbita boyınsha qozǵalıstaǵı birden-bir kvant sanı n niń orında azimutallıq hám radiallıq (bas kvant sanı) sanlarınıń qosındısı tur. Kishi b yarım kósheri kvant sanlarınıń ekewinen de óz aldına ǵárezli. Haqıykatında da,

$$b = a\sqrt{1 - \varepsilon^2}$$

teńliginiń orınlı ekenligin itabargá alsaq, onda $1 - \varepsilon^2$ shamasınıń ornına onıń (4a) ańlatpasındaǵı mánisin qoysaq, onda

$$b = n_\varphi n \frac{\hbar^2}{me^2 Z}, \quad \frac{b}{a} = \frac{n_\varphi}{n} \quad (7)$$

teńliklerine iye bolamız. Stacionar ellips tárizli orbitalar boyınsha qozǵalıstaǵı energiya ushın ańlatpa mınaday boladı:

$$W = \frac{me^4 Z^2}{2\hbar^2 n^2}. \quad (8)$$

Bul teńlikten W niń stacionar dóńgelek orbita boyınsha qozǵalıstaǵı formula menen beriletuǵınlıǵın kóremiz. Tek burınǵı kvant sanınıń ornında bas kvant sanı tur. Solay etip, orbitanıń ekscentrisitetiniń bolıwı stacionar hallardıń energiyalarınıń mánislerin ózertpeydi eken. Usınıń menen birge vodorodtıń hám oǵan uqsas bolǵan ionlardıń spektrine tiyisli bolǵan ápiwayı dóńgelek orbitalar ushın alınǵan juwmaqlar ózleriniń kúshinde qaladı. Tek W energiyanıń múmkin bolǵan energiyasınıń hár bir mánisine elektronnıń hár qıylı qozǵalı muǵdarınıń momentlerine juwap beretuǵın bir emes, al bir neshe orbita sáykes keledi. Sebebi hár bir bas kvant sanı n de azimutal kvant sanı hár qıylı mánislerge iye bola aladı. Usınday hallardı *azǵınǵan hallar* dep ataydı. Azimutallıq kvant sanınıń $n_\varphi = 0$ mánisine yadro arqalı ótetuǵın tuwrı sızıq sáykes keledi; elektronnıń usınday tuwrı boyınsha qozǵalısinıń orın alıwın múmkin emes dep esaplap, biz n_φ shamasın birden baslap pútin sanlardı qabıl etedi degen juwmaqqı kelemiz; bunday

$n = n_r + n_\varphi$ teńliginiń orınlı bolıwına baylanıslı, n niń berilgen mánisinde azimutallıq hám radiallıq kvant sanlarınıń mınaǵan teń ekenligine iye bolamız:

$$n_\varphi = 1, 2, \dots, n, \quad n_r = (n - 1), (n - 2), \dots, 0. \quad (9)$$

Bunnan *bas kvant sanı n niń berilgen mánisinde geometriyalıq jaqtan hár qıylı bolǵan n dana orbitanıń bolıwınıń múmkin ekenligi kelip shıǵadı*; olardıń barlıǵına energiyanıń bir W mánisi hám birdey úlken yarım kósher a sáykes keledi. (4)-teńlik olarda ekscentrisitetler e hám, soǵan sáykes, kishi yarım kósherler b hár qıylı.

$n_r = 0$, $n_\varphi = n$ mánislerine dóńgelek, $n_r = n - 1$, $n_\varphi = 0$ mánislerine eń sozılǵan ellips sáykes keledi.

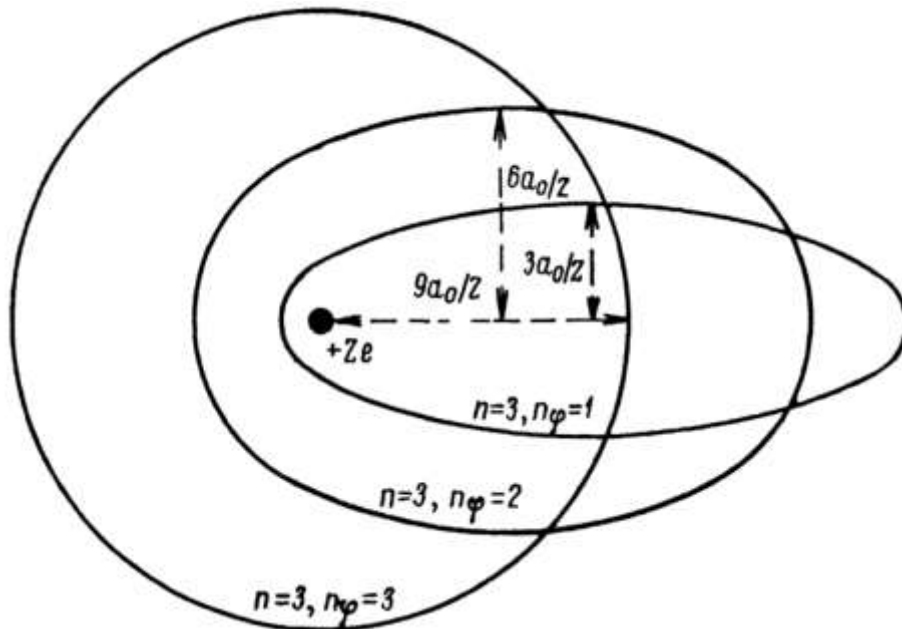
332-súwrette $n = 3$ ke sáykes keletuǵın orbitalar kórsetilgen. Bul jaǵdayda úsh múmkinshiliktiń orın alıwı múmkin:

a) $n_\varphi = 3, n_r = 0, a = b = \frac{9a_0}{Z}$ (dóngelek);

b) $n_\varphi = 2, n_r = 1, a = \frac{9a_0}{Z}, b = \frac{2}{3}a$ (ekscentrisiteti $\varepsilon = \frac{\sqrt{5}}{3}$ ke teń ellips);

c) $n_\varphi = 1, n_r = 2, a = \frac{9a_0}{Z}, b = \frac{1}{3}a$ (ekscentrisiteti $\varepsilon = \frac{\sqrt{8}}{3}$ ke teń ellips).

Sırttan hesh qanday tásirler bolmaǵan jaǵdayda bir kvant sanı menen hár qıylı ellipsler boyınsha qozǵalısta elektron birdey energiyaǵa iye boladı. Eger qanday da bir sırtqı tásir, mısalı, sırtqı elektr maydanı bar bolǵan jaǵdayda, birdey energiyaǵa sáykes keletuǵın, biraq, hár qıylı geometriyalıq formaǵa iye bolǵan orbitalar hár qıylı ózgerislerge ushıraydı. Bul jaǵday spektrdegi ózgerislerde kórinedi. Tap usınday jaǵday atomnıń ishindegi tásirlesiwlerdiń saldarınan da júzege keledi. Yadronıń dógeresinde bir neshe elektronlar aylanatuǵın atomlarda usınday kúshler bar boladı. Bunday jaǵdayda hár bir elektron ushın hár qıylı geometriyalıq formalarǵa iye ellips tárizli orbitalarǵa basqa elektronlar tárepinen hár qıylı kúshler túsiriledi. Biz tómende bul sebeptiń siltili metallarda hár qıylı seriyalardıń bolatuǵınlıǵı túsindiretuǵınlıǵın kóremiz.



332-súwret. Elektronnıń bas kvant sanı n niń $n = 3$ mánisine sáykes keletuǵın hár qıylı orbitaları.

Zommerfeld vodorod ushın da, oǵan uqsas bolǵan ionlar ushın da birdey kvant sanı menen hár qıylı ellipsler menen qozǵalǵanda energiyalardıń qatań túrde birdey bolmaytuǵınlıǵın kórsetti. Onıń sebebi salıstırmalıq principi boyınsha elektronnıń massasınıń tezlikten ǵárezligi menen baylanıslı; eger m_0 arqalı tınıshlıqtaǵı elektronnıń massası, al m arqalı v tezligi menen qozǵalatuǵın elektronnıń massası belgilengen bolsa, onda salıstırmalıq principi boyınsha (301-paragraf):

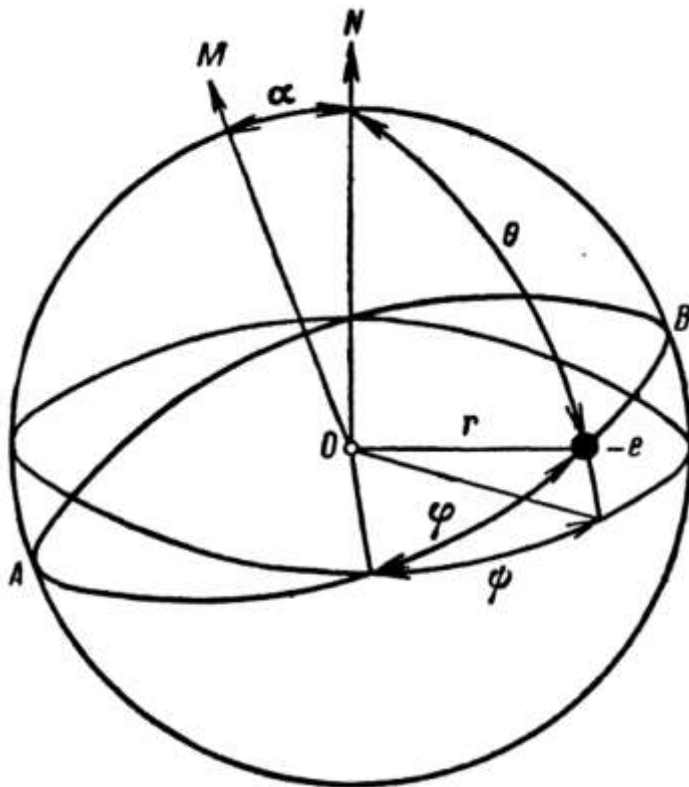
$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

teńligi orınlı boladı. Bul teńlikte $\beta = v/c$, c - jaqtılıqtıń boslıqtaǵı tezligi. Ellips qanshama sozılǵan bolsa, onda perigeliye ol yadroǵa sonshama jaqın keledi hám elektronnıń tezligi úlken boladı; bunday jaǵdayda massanıń tezlikten ǵárezliginen kelip shıǵatuǵın dúzetiwdiń shaması sonshama úlken boladı. Bul dúzetiw energiyanıń bazı bir ózgerisin payda etedi³⁶.

³⁶ SHın mánisinde energiyanıń ózgerisin $W = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}$ dúzetiwı tikkeley támiyenleydi (Awdarıwshılar).

Zommerfeld bul ózgerisler menen vodorodtıń hám ionlastırılǵan geliydiń sıızqlarınıń juqa strukturası dep atalatuǵın strukturasını túsindiriwge tıristı. Másele sonnan ibarat, joqarı ajırata alıwshılıq qábiletligine iye asbap penen baqlaǵanda bul elementlerdiń sıızqları bir birine jaqın jaylasqan bir neshe qurawshılardan turadı. Biraq, bunday túsindiriw haqıyqatlıqqa tolıq sáykes kelmeydi.

§ 345. Keńisliktegi kvantlanıw; atomlardıń magnit momentleri. Yadronıń kulonlıq maydanınıń tásirinde elektron tegis ellips tárizli orbita boyınsha qozǵaladı. Biraq orbitanı sonday túrtkiniń bolıwı múmkin, mısalı sırtqı magnit maydanı menen, bunday jaǵdaylarda orbitalar tegis bolıwdan qaladı. Bunday jaǵdayda elektronnıń qozǵalısqı úsh erkinlik dárejesine iye bolǵan qozǵalısqı aylanadı hám stacionar orbitalar 344-paragraftaǵı (1)- úsh kvantlıq shártlerdi qanaatlandırıwı kerek.



333-súwret.
Orbitanıń keńisliklik kvantlanıwı.

Ápiwayı jaǵdaydı qaraymız: sırtqı magnit maydanı hálisiz bolsın hám usınıń menen birge orbitanıń ózgeriske ushırawı da kishi. Bunday jaǵdayda orbita burınǵısınsha ellips bolıp qala beredi. Biraq bul ellips jatqan tegislik sırttan túsirilgen tásiridin, yaǵnıy sırtqı magnit maydanınıń baǵıtına salıstırǵanda belgili múyeshke burılǵan boladı. Sferalıq r, ϑ, ψ koordinataların kirgizemiz (333-súwret); meyli, ON - sırtqı magnit maydanınıń baǵıtı, OM elektronlıq AB orbitaǵa túsirilgen normal hám bul normal menen ON niń arasındaǵı múyesh α bolsın. Usınıń menen birge orbita tegisliginen baslap esaplanatuǵın φ azimutın kirgizemiz. Biz ózgeriske ushıratılmaǵan ellipslik qozǵalıstı qarap atırmız. Sonlıqtan qozǵalısqı muǵdarınıń momenti p mınaday qatnastı qanaatlandıradı:

$$p = n_{\varphi} \hbar. \quad (1)$$

Bul teńlikte n_{φ} arqalı azimutallıq kvantlıq san belgilengen. Ekinshi tárepten, sferalıq koordinatalarda

$$\begin{aligned} \int p_r dr &= n_r \hbar, \\ \int p_{\vartheta} dr &= n_{\vartheta} \hbar, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\int p_{\psi} dr = n_{\psi} \hbar$$

kvantlıq shártleriniń orınlanıwı kerek. Bul ańlatpalarda p_{ψ} arqalı ψ azimutına sáykes keletuǵın ekvatorlıq tegislikte esaplangan ulıwmalastırılǵan impuls, al, álbette, p_{ψ} - qozǵalıǵı muǵdarınıń momenti p nıń sırtqı magnit maydanı ON ge túsirilgen proekciyası:

$$p_{\psi} = p \cos \alpha. \quad (3)$$

Qozǵalıstır barısında qozǵalıǵı muǵdarınıń momenti p turaqlı bolǵanlıqtan, onıń sırtqı magnit maydanınıń baǵıtına túsirilgen p_{ψ} proekciyası da turaqlı boladı. Bunnan, (2) degi kvantlıq shártlerdiń eń aqırǵısı mınanı beredi:

$$p_{\psi} = n_{\psi} \left(\frac{h}{2\pi} \right) = n_{\psi} \hbar. \quad (4)$$

(1)-, (3)- hám (4)-ańlatpalardı salıstırıp, mınanı tabamız:

$$n_{\psi} = n_{\varphi} \cos \alpha.$$

n_{ψ} kvant sanın m arqalı belgilew qabıl etilgen. Bunday jaǵdayda tómendegilerdi alamız:

$$\cos \alpha = \frac{n_{\psi}}{n_{\varphi}}, \quad (5)$$

$$p_{\psi} = \frac{m}{n_{\varphi}} p. \quad (5a)$$

$|\cos \alpha| \leq 1$ ańlatpası orınlı bolǵanlıqtan pútin san bolǵan m mınaday mánislerdi qabıl ete aladı:

$$m = n_{\varphi}, n_{\varphi} - 1, \dots, 0, \dots, n_{\varphi}. \quad (6)$$

Solay etip, biz qarap atırǵan jaǵdayda $\cos \alpha$ shaması hár qıylı bolǵan $2n_{\varphi} + 1$ mániske iye boladı. Usıǵan sáykes m nıń berilgen mánisinde $2n_{\varphi} + 1$ hár qıylı mánislerdi qabıl etedi. Al usı jaǵdayǵa baylanıslı, qozǵalıǵı muǵdarınıń momenti p sırttan túsirilgen baǵıtqa salıstırǵanda $2n_{\varphi} + 1$ hár qıylı bolǵan halda jaylasadı. Kvantlıq mexanikada júdá ázzi sırtqı maydan ushın alınǵan usı juwmaqtır ulıwma jaǵday ushın da, qálegen kernewliktegi maydan ushın da durıs bolatuǵınlıǵı kórsetiledi.

Qozǵalıǵı muǵdarınıń momenti vektorı $\mathbf{p}$ sırttan túsirilgen tásirdiń baǵıtına salıstırǵanda onıń usı baǵıtqa túsirilgen proekciyası $|p_{\psi}|$ nıń shaması pútin san eselengen $\hbar$ qa teń bolatuǵında α múyeshlerinde jaylasadı, yaǵnıy

$$p_{\psi} = m\hbar. \quad (4a)$$

Bul teńlikte m nıń múmkin bolǵan mánisleri (6)-teńliktiń járdeminde anıqlanadı.

334-súwret $p = 1\hbar, 2\hbar, 3\hbar$ bolǵan jaǵdaylarǵa tiyisli. Joqarıda ayılǵanlar boyınsha $\mathbf{p}$ vektorı sırtqı magnit maydanınıń baǵıtına salıstırǵanda birinshi jaǵdayda úsh, ekinshi jaǵdayda bes hám úshinshi jaǵdayda jeti hár qıylı jaǵdaylarda tura aladı. Sırtqı maydanınıń baǵıtına túsirilgen onıń proekciyalrı sáykes $0, \pm\hbar; 0, \pm\hbar, \pm2\hbar$; hám $0, \pm\hbar, \pm2\hbar, \pm3\hbar$ mánislerine iye boladı.

Klassikalıq elektrodinamika boyınsha, qozǵalatuǵın elektron toq sıyaqlı qorshaǵan keńislikte magnit maydanın payda etedi. Payda bolǵan magnit maydanı momenti

$$\mu = \frac{1}{c} \cdot \frac{e}{\tau} A$$

shamasına teń bolǵan magnittiń maydanında (II tom, 201-paragraf). Bul teńlikte A - elektronınıń orbitası sheklep turǵan bettiń maydanı, τ - aylanıw dáwiri.

Ellips ushın

$$A = \int_0^{2\pi} \frac{r^2}{2} d\varphi = \int_0^{\tau} \frac{p}{2m} dt = \frac{\tau}{2m} p.$$

Bunnan

$$\mu = \frac{e}{2mc} p \quad (7)$$

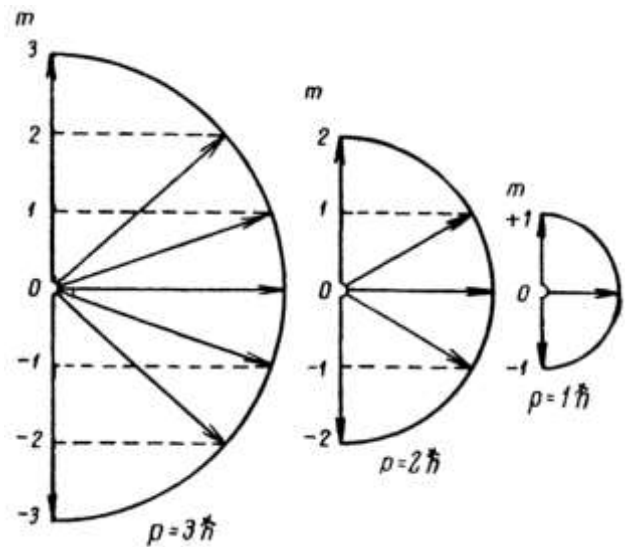
teńligine iye bolamız.

μ magnit momenti qozǵalıǵı muǵdarınıń mexanikalıq momenti $\mathbf{p}$ menen baǵıtlas bolǵanlıqtan, (7)-teńlikti vektorlıq túrde kóshirip jazıwǵa boladı:

$$\boldsymbol{\mu} = \frac{1}{2c} \left(\frac{e}{m} \right) \mathbf{p} \quad (7a)$$

Elektronnıń ellips tárizli orbita boyınsha qozǵalıǵındaǵı magnit hám mexanikalıq momentleriniń arasındaǵı bul qatnas ulıwmalıq bolıp tabıladı hám ápiwayı ellipslerden ózgeshe bolǵan orbitalar ushın da durıs nátiyjeni beredi.

334-súwret.
Sırttan túsirilgen baǵıtqa salıstırǵandaǵı p momentiniń múmkin bolǵan orientaciyaları.



(7)-ańlatpaǵa p nıń ornına onıń

$$p = n_{\varphi} \hbar$$

mánisin qoyıp mınanı alamız:

$$\mu = n_{\varphi} \frac{\hbar}{2c} \cdot \frac{e}{m}. \quad (8)$$

(8)-teńlikten stacionar orbita boyınsha qozǵalǵanda elektronnıń magnit momentleriniń turaqlı bolǵan

$$\mu_{\varphi} = \frac{\hbar}{2c} \cdot \frac{e}{m}$$

shamasınan pútin san ese ózgeshe bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Bul shamalı *Bor magnetonı* dep ataydı. Oǵan e , $\hbar$ hám m shamalarınıń mánislerin qoysaq, onda

$$\mu_{\varphi} = 0,918 \cdot 10^{-20} \text{ erg/gs}$$

shamasına iye bolamız.

Elektronnıń orbitalıq qozǵalıǵınıń magnit momenti mexanikalıq momentke parallel bolǵanlıqtan, keńisliklik kvantlanıw qaǵıydaları onıń ushın da tarqaladı: sırtqı magnit maydanında μ magnit momenti sırtqı maydanniń baǵıtına belgili bolǵan α múyeshleri menen jaylasa aladı, bul múyeshlerdiń mánisleriniń qatarı (5)-shártti qanaatlandıradı.

Atomlarda magnit momentleriniń bolatuǵınlıǵı menen keńisliklik kvantlanıw qubılısı atomlıq dásteniń sırtqı bir tekli bolmaǵan magnit maydanındaǵı awısıwı boyınsha ótkerilgen SHtern hám Gerlax tájiriybelerinde tastıyıqlandı (II tom, 201-paragraf). Bir tekli emes magnit maydanı arqalı ótkende atomlıq dáste atomlardıń magnit momenti μ ge, usı μ menen magnit maydanınıń kernewligi $\mathbf{H}$ tıń arasındaǵı múyesh α den ǵárezli bolǵan shamaǵa awısadı. Eger α múyeshi bir neshe mániske iye bolatuǵın bolsa, onda dáste sonshama dana qurawshılarga bólinedi. Solay etip, dáste bólingen qurawshılardıń sanı boyınsha α múyeshiniń múmkin bolǵan mánislerin tabıwǵa boladı; awısıwdıń shaması boyınsha magnit momenti μ dıń shaması anıqlanadı. SHtern hám

Gerlax tájiriybeleri α nıń teoriya talap etken mánislerdiń úzlikli qatarın payda etetuǵınlıǵın tastıyıqladı. Sonıń menen birge atomlardıń magnit momentiniń shaması Bor magnetonı μ_0 menen barabar bolıp shıqtı. Biraq, bir qatar jaǵdaylarda teoriya menen tájiriybeniń arasında qarama-qarsılıq kelip shıqtı.

Azimutal kvant sanı n_φ diń berilgen mánisi menen táriyiplenetuǵın atom ushın (6)-ańlatpa boyınsha sırtqı magnit maydanınıń baǵıtına salıstırǵanda $2n_\varphi + 1$ dana orientaciyanıń júzege keliwi múmkin, yaǵnıy usınday atomlardıń dástesiniń $2n_\varphi + 1$ qurawshıǵa bóliniwi tiyis. n_φ shaması pútin bolǵanlıqtan, onıń qálegen mánisinde dásteniń taq sanlı qurawshılardıń bóliniwi hám qurawshılardıń arasında qozǵalısnıń baǵıtın ózertpegen atomlarǵa ($m = 0$) saykes keletuǵın dásteniń de bolıwı kerek. Haqıyqatında, bir qatar jaǵdaylarda dáste qurawshılardıń jup sanına ajıraladı hám bunday jaǵdayda ortadaǵı awıspaǵan qurawshı joq bolıp shıǵadı. Mısalı, gúmis atomlarınıń dástesi eki dástege ajıralǵan; olardıń arasındaǵı qashılıq bir Bor magnetonı μ_0 ge teń bolǵan gúmis atomlarınıń magnit momentine sáykes keledi. Basqa jaǵdaylarda atomlardıń magnit momentleri Bor magnetonı μ_0 diń mánisinen bólshek san eselengen shamasına teń bolıp shıqqan. Tájiriybelardıń usınday nátiyjelerin atomnıń magnit momentleri elektronlardıń tek orbitalıq qozǵalısnı menen anıqlanadı dep túsindiriwge bolmaydı. Biz tómende hár bir elektronnıń menshikli magnit momentine iye bolatuǵınlıǵın da kóremiz (348-paragraf).

§ 346. Spekrge sırtqı magnit hám elektr maydanlarınıń tási. Atomlardagı magnit momentler menen keńisliklik kvantlanıwdıń bolıwı spekrge sırtqı magnit maydanınıń tási boyınsha tastıyıqlanadı. Sırtqı magnit maydanı atomdagı elektronlıq orbitalardı ózgeriske ushıratadı, usınıń nátiyjesinde energiyası W ge teń bolǵan hár bir stacionar hal qosımsha ΔW energiyaǵa iye boladı. Biz tómende usı qosımsha energiyanıń spektrallıq sızıqlardıń bir neshe qurawshılardıń bóliniwine alıp keletuǵınlıǵın kóremiz.

345-paragrafta ayılǵanlar boyınsha n_φ kvant sanı menen táriyiplenetuǵın atomnıń

$$\mu = n_\varphi \mu_0 \quad (1)$$

magnit momentine iye bolatuǵınlıǵın bilemiz. Bul teńlikte $\mu_0 = \frac{\hbar}{2c} \cdot \frac{e}{m}$ - Bor magnetonı bolıp tabıladı. Kernewligi H qa teń bolǵan sırtqı magnit maydanı bar bolǵan jaǵdayda atomnıń μ magnit momenti H qa salıstırǵanda

$$\cos \alpha = \frac{m}{n_\varphi} \quad (2)$$

shártin qanaatlantıratuǵın α muyeshi menen jaylasadı. Bul teńlikte $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm n_\varphi$. m kvant sanı ádette *magnit kvant sanı* dep ataladı.

Magnit momenti μ ge teń bolǵan sistema sırtqı H magnit maydanında

$$\Delta W = -\mu H \cos \alpha \quad (3)$$

shamasına teń energiyaǵa iye boladı (II tom, 201-paragraf).

Bul formulaǵa μ menen α nıń orınlarına olardıń (1)- hám (2)-teńlikler boyınsha mánislerin qoyıp hám μ_0 diń ornına Bor magnetonınıń san mánisin qoyıp, mınanı alamız:

$$\Delta W = -m\mu_0 H \quad (3a)$$

n_φ diń berilgen mánisinde m shaması $0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm n_\varphi$ mánislerin qabıl ete alatuǵın bolǵanlıqtan, (3a) formuladan hár bir dáslepki qáddiniń magnit maydanında $2n_\varphi + 1$ qáddige ajıralatuǵınlıǵı hám olardıń bir birinen $\Delta W_0 = \mu_0 H$ qashılıǵında jaylasatuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Bul hár qıylı bolǵan kishi qáddiler sırtqı magnit maydanına salıstırǵandaǵı elektronlıq orbitalardıń múmkin bolǵan orientaciýalarına sáykes keledi. Bir qáddiniń bir neshe qáddige bóliniwine baylanıslı spektrallıq sızıqlar da bir biri menen tıǵız jaylasqan qurawshılardıń bólinedi. Haqıyqatında da, meyli, dáslepki ν_0 jiyiligine iye bolatuǵın bazı bir sızıq atomnıń energiyası W_2 bolǵan qáddinen energiyası W_1 bolǵan qáddige ótiwiniń saldarınan payda bolǵan bolsın. Bunday jaǵdayda

$$\nu_0 = \frac{W_2}{h} - \frac{W_1}{h} \quad (4)$$

teńligi orınlanadı.

Magnit maydanı bar bolǵan jaǵdayda W energiyalardıń hár biri (3a) formula menen ańǵartılatuǵın qosımsha ΔW mániske iye boladı. Bunday jaǵdayda ν_0 jiyiliginiń ornına

$$\nu_0 + \Delta\nu = \frac{W_2 + \Delta W_2}{h} - \frac{W_1 + \Delta W_1}{h}$$

teńligi menen anıqlanatuǵın $\nu_0 + \Delta\nu$ jiyiligi shıǵarıladı. Bul formulanı (4)-ańlatpa menen salıstırıp, mınanı tabamız:

$$\Delta\nu = \frac{\Delta W_2}{h} - \frac{\Delta W_1}{h}$$

yamasa, ΔW_1 menen ΔW_2 lerdiń ornına olardıń (3a) boyınsha mánislerin qoyıp,

$$\Delta\nu = (m_2 - m_1) \frac{\mu_0}{h} H$$

ańlatpasına iye bolamız.

$\frac{\mu_0}{h} = \frac{1}{4\pi c} \cdot \frac{e}{m}$ teńliginiń orınlı ekenligin ańǵarıp, sońǵı formulanı

$$\Delta\nu = \Delta m \cdot \frac{1}{4\pi c} \cdot \frac{e}{m} H \quad (5)$$

túrinde jazamız. Bul teńlikte Δm arqalı magnit kvant sanlarınıń ayırması $\Delta m = m_2 - m_1$, al e arqalı elektronnıń zaryadınıń san mánisi belgilengen. Bul magnit kvant sanları m_1 hám m_2 niń hár qaysısı sáykes $0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm n_{\varphi_1}$ hám $0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm n_{\varphi_2}$ mánislerin qabıl ete aladı. Bul jerde n_{φ_1} hám n_{φ_2} arqalı atomnıń sırttan tásir túsirilmegen jaǵdaydaǵı eki stacionar hallardı táriyipleytuǵın azimutal kvant sanları belgilengen. Sonlıqtan Δm bir qatar hár qıylı mánislerge iye bola aladı. Kvantlıq mexanikada Δm ayırmasınıń formallıq jaqtan barlıq múmkin bolǵan barlıq mánisleriniń ishinde tek kóp bolmaǵan mánisleriniń júzege keletuǵınlıǵı dálillenedi: payda bolǵan jańa qáddilerdiń arasında saylap alıw qaǵıydasına baǵınatuǵın ótiwler ǵana baǵınadı, usı qaǵıyda boyınsha m shaması tek ± 1 ge ǵana ózgeredi yamasa turaqlı bolıp qaladı (m_1 menen m_2 ler nolge teń bolmaǵan jaǵdaylarda):

$$\Delta m = 0, \pm 1. \quad (6)$$

(6)-saylap alıw qaǵıydası jaqtılıqtıń deregin magnit maydanına jaylastırǵan jaǵdayda spektrallıq sızıqlardıń úsh qurawshıǵa ajralatuǵınlıǵına alıp keledi. Olardıń ortasındaǵı ($\Delta m = 0$) awıspaǵan bolıp qaladı, al shettegileri ($\Delta m = \pm 1$) (5)-formula boyınsha

$$\Delta\nu = \pm \frac{1}{4\pi c} \cdot \frac{e}{m} H \quad (5a)$$

yamasa tolqın uzınlıǵı shkalasında

$$\Delta\lambda = \pm \frac{1}{4\pi c^2} \cdot \frac{e}{m} \lambda^2 H \quad (5,)$$

shamasına awısaadı. Sızıqlardıń awısıwı magnit maydanınıń kernewligi H qa proporcional.

$\frac{1}{4\pi c^2} \cdot \frac{e}{m}$ kóbeytiwshisiniń mánisi

$$\frac{1}{4\pi c^2} \cdot \frac{e}{m} = 4,674 \cdot 10^{-5} \text{ sm}^{-1} \cdot \text{gs}^{-1}$$

shamasına teń, bunnan spektrallıq sızıqlardıń is júzinde alınıwı múmkin bolǵan magnit maydanlarındaǵı qurawshılarǵa ajırılıwınıń kishi ekenligin bildiredi. Tolqın uzınlıǵı $\lambda = 5000 \text{ Å}$ bolǵan sızıq ushın $H = 20\,000 \text{ gs}$ magnit maydanındaǵı ajırılıw shama menen $\pm 0,23 \text{ Å}$ ge teń.

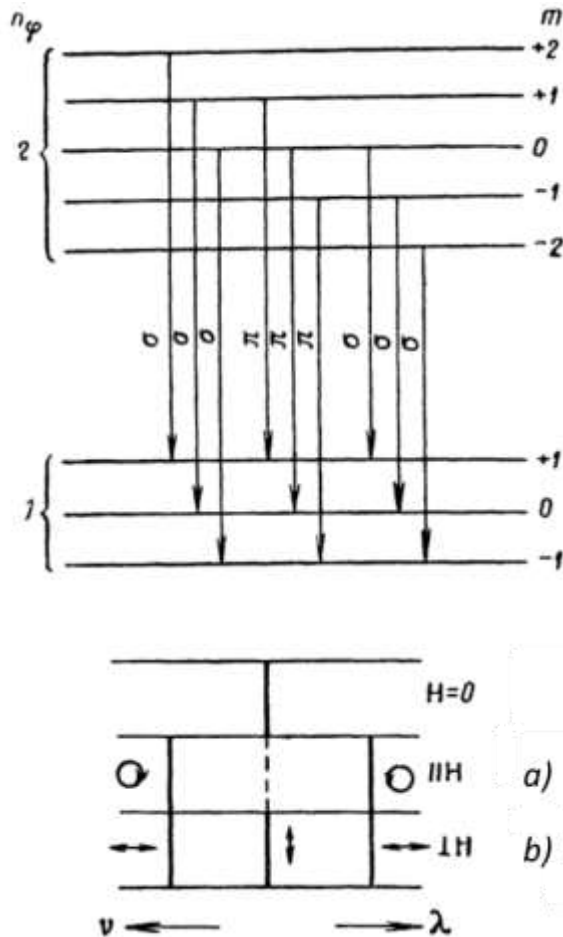
Magnit maydanında spektrallıq sızıqtıń qurawshılarǵa ajırılıwınıń saldarınan payda bolǵan qurawshılar polarizaciyalanǵan. $\Delta m = 0$ bolǵan jaǵdayda tuwrı sızıqlı polarizaciyalanǵan sızıqtıń shıǵarılatuǵınlıǵın, elektr vektorınıń terbelisleriniń maydanniń baǵıtında ekenligin teoriya kórsetedi hám tájiriyebe tastıyıqlaydı (π -qurawshısı dep atalatuǵın qurawshı). $\Delta m = \pm 1$ bolǵan jaǵdayda dóńgelek boyınsha polarizaciyalanǵan sızıqlar shıǵarıladı, ondaǵı elektr vektorınıń

terbelisleri H tırn bağıtına perpendikulyar tegislikte júzege keledi (σ -qurawshılar dep atalatuğın qurawshılar). Eger derekten shıqqan jaqtılıq magnit kernewligi H tırn bağıtında tarqalatuğın bolsa, onda jiyiligi $\nu + \Delta\nu$ ($\Delta m = +1$) shamasına teń bolğan qurawshı saat strelkasınıń qozğalı bağıtında polarizaciyalanğan, al saat strelkasınıń qozğalı bağıtına qarama qarsı bağıtta $\nu - \Delta\nu$ ($\Delta m = -1$) qurawshısı polarizaciyalanğan³⁷. Maydannıń bağıtında baqlağanda ortadağı awıspağan qurawshı jaqtılıq tolqınlarınń kóldeneń bolıwına baylanıslı joğaladı. $n_{\varphi_1} = 1$ hám $n_{\varphi_2} = 2$ bolğan dara jağdayğa sáykes keletuğın 335-súwrettiń joqarğı bóliminde π - hám σ -qurawshılarınıń payda bolıwı kórsetilgen; hár bir qurawshı hár qıylı bolğan úsh ótiwde payda boladı.

Magnit maydanındağı spektrallıq sızıqlardıń bir neshe sızıqlarğa ajıralıwı qubılısı 1895-jılı atomlardıń qurılısınıń kvantlıq teoriiyası payda bolmastań burın Zeeman tárepinen tabıldı. Onı *Zeeman qubılısı* dep ataydı³⁸. Zeeman qubılısın baqlawdıń sxeması 336-súwrette keltirilgen. Bul súwrette J - elektromagnittiń polyuslarınıń arasına jaylastırılğan jaqtılıqtıń deregi, S_p - spektrograftıń sańlağı. Payda bolğan qurawshılardıń óz aldına kórinıwı ushın spektrograftıń jetkilikli dárejede úlken ajratıw kúshine iye bolıwı kerek. Magnit maydanınıń kernewligi H tırn bağıtında perpendikulyar bağıtta ótkeriletuğın baqlawlarda (336-súwrette kórsetilgendey) dóńgelek terbelisler tuwrı sızılı terbelisler túrinde proekciyalanadı. Sonlıqtan, spektrallıq sızılıq úsh qurawshıға ajıraladı: ortasındağı, ondağı elektr vektorınıń terbelisleri H maydanınıń boyında; shetkileri, ondağı terbelisler H tırn bağıtına perpendikulyar (335-b súwret). Magnit maydanınıń kernewligi H tırn boyında tarqalatuğın nurlanıwdı baqlağanda (336-súwrettegi Ja bağıtında; baqlaw ushın elektromagnittiń ózegi tesiledi), bunday jağdayda, joqarıda ayılğanday, ortadağı qurawshı joğaladı, qalğan ekewi dóńgelek boyınsha polarizaciyalanğan: spektrdiń fiolet oblastına awısqan qurawshı saat strelkasınıń qozğalı bağıtında hám qızılğa qaray awısqanı - saat strelkasınıń qozğalıw bağıtına qarama-qarsı bağıtta.

³⁷ Terbelislerdi magnit maydanınıń sızıqlarınıń bağıtında qarağan jağdayda. Basqa sóz benen aytqanda, $\nu + \Delta\nu$ qurawshısında elektr vektorınıń dóńgelek terbelisleri burğınıń tutqasınıń aylanıw bağıtında júzege keledi (eger onıń ilgerilemeli qozğalı H vektorınıń bağıtında bolatuğın bolsa).

³⁸ Házirgi waqıtları bul qubılıstı ádette Zeeman effekti dep ataydı (Awdarıwshılar).



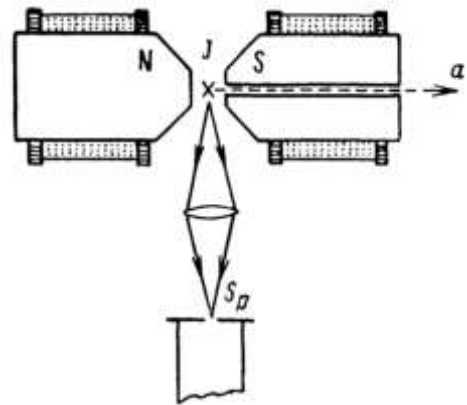
335-сүwрет.
Magnit maydanında spektrallıq sızılardıń qurawshılardıǵa ajıralıwı.

Vodorod hám oǵan uqsas bolǵan ionlar ushın olardıń sızılardıńnıń juǵa strukturasına itibar bermesek (349-paragraf), onda tájiriye menen teoriyanıń nátiyjeleri bir birine tolıq sáykes keledi. Haqıyqatında da, sızılqar joqarıda ayılǵanday bolıp polarizaciyalanǵan úsh qurawshıǵa ajıraladı; sızılardıń arasındaǵı qashıqlıq (1)-formula boyınsha anıqlanǵan atomnıń magnit momentine sáykes keledi. Basqa elementler ushın júdá az jaǵdaylarda ǵana spektrallıq sızılqar bir birinen qashıqlıǵı (5a) formulaǵa sáykes keletuǵın tek úsh qurawshıǵa ajıraladı. Kópshilik jaǵdaylarda sızılqar kóp sanlı qurawshılardıǵa ajıraladı. Bunday ajıralıwdı Zeemannıń quramalı (yamasa "anomallıq") qubılısı dep ataydı. Bul qubılıstıń sebebi tómende qaraladı (349-paragraf).

Elektr maydanınıń tásirindegi spektrallıq sızılardıń ajıralıwı 1913-jılı SHTark tárepinen ashıldı hám onı SHTark qubılısı dep ataydı³⁹. SHTark qubılısın baqlaw ádewir úlken eksperimentallıq qıyınshılıqlardı payda etedi. Sebebi jaqtılıq shıǵaratuǵın puw yamasa gaz jetkilikli dárejede joqarı elektr ótkizgishlikke iye. Nátiyjede jaqtılıq shıǵarıp turǵan puw menen gazde úlken E kernewlikti alıw júdá qıyın. Usınday qıyınshılıqtan shıǵıw ushın baqlawlar jaqtılıq shıǵarıp turǵan atomlardıń baǵıtlanǵan dástesinde júrgiziledi ("kanallıq nurlarda"). Onıń ushın K katodında (337-súwret) bir qatar tar a kanalları tesiledi. Katod K menen anod A arasında payda bolatuǵın oń ionlar katodqa qaray tezletiledi hám olardıń ayırımları a sańlaqları arqalı ótedi. Katodtıń artında jaylasqan trubkanıń bóliminen gaz nasostıń járdeminde úziksiz túrde sorıp alınadı. Usınıń saldarınan a kanalları arqalı uship ótken bólekshelerdiń erkin jolınıń uzınlıǵı jetkilikli dárejede úlken hám olar "kanallıq nurlardı" payda etip tuwrı sızılqı qozǵaladı. Bul nurǵa qosılǵan qozǵan atomlar normal halǵa ótkende (tiykarǵı halǵa ótkende) jaqtılıq shıǵaradı. Nurdıń jolında b plastinkasınıń járdeminde elektr maydanı payda etiledi. Maydannıń kernewligin 100 000 V/sm shamasına jetkeriwdiń sáti túsedı.

³⁹ Házirgi waqıtları kóbinese "SHTark effekti" ataması qullanıladı (Awdarıwshılar).

Kvantlıq teoriya payda bolaman degenshe SHtark qubılısı túsindirilmey keldi. Klassikalıq elektronlıq teoriya sırtqı elektr maydanında spektrallıq sızıqlar bir neshe sızıqqa ajıralmaydı, al tek maydannıń kernewligi E niń kvadratına proporcional jılısadı dep túsindiredi.



336-súwret.

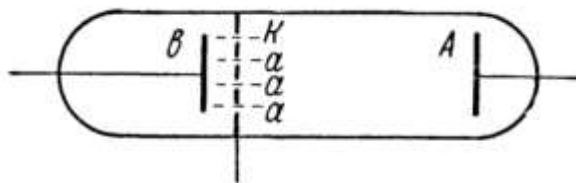
Zeeman qubılısın baqlawdıń sxeması.

Bor teoriyasınıń kóz-qarası boyınsha sırtqı elektr maydanı elektronnıń orbitasına tásir etedi. Bul tásirdiń xarakteri mınadan ibarat: birinshi jaqınlasıwda ellips tárizli orbitanıń úlken yarım kósheri ózgerissiz qaladı hám orbitanıń salmaq orayı maydannıń bağıtına perpendikulyar bağıttaǵı tegislikte garmonikalıq ellipslik terbeliske ushıraydı. Nátiyjede vodorod ushın da hám oǵan uqsas bolǵan ionlar ushın da sızıqlardıń ajıralıwı alınadı, sonıń menen birge ayırım qurawshılar sızıqtıń dáslepki ornına salıstırǵanda

$$\Delta\nu = \frac{3\hbar}{4\pi Z e m} E(n_1 k_1 - n_2 k_2) \quad (7)$$

shamasına jılısqan boladı. Bul teńlikte n_1 menen n_2 arqalı dáslepki sızıqtıń payda bolıwı ushın ótiwler júzege keletuǵın eki qáddiniń bas kvant sanları. k_1 hám k_2 shamaları $|k| < n$ shártin qanaatlandıratuǵın oń hám teris mánislerdi qabıl ete aladı. Zeeman qubılısındaǵıday, qurawshılar polarizaciyalanǵan. Ajıralıwdıń shaması maydannıń kernewligi E niń birinshi dárejesine proporcional.

(7)-formuladan ajıralıwdıń bas kvant sanı n_1 menen n_2 nıń mánislerinen ǵárezli ekenligi kórinip tur: bas kvant sanları n niń mánisi qansha úlken bolsa, sızıq sonshama kóp qurawshılarga ajıraladı hám qurawshılar bir birinen keń jaylastırılǵan. Usı ózgesheligi menen SHtark qubılısı ajıralıw bas kvant sanınıń mánisinen ǵárezsiz bolǵan Zeeman qubılısınan ayrılıp turadı. Vodorodtıń hám ionlastırılǵan geliydiń sızıqlarında (7)-formulanıń durıs ekenligi jaqsı kórinedi.



337-súwret.

SHtark qubılısın baqlawdıń sxeması.

Sızıqlardıń jılısıwına alıp kelinetuǵın SHtarktıń kvadratlıq qubılısı ($\sim E^2$) bazı bir elementlerdiń sızıqlarında baqlanadı; onıń shaması (7)-formula menen anıqlanatuǵın ajıralıwdan kishi. Mısalı, natriydiń sarı sızıqlarınıń ayırım qurawshılarga ajıralıwı pútkilliy júzege kelmeydi, biraq E^2 qa proporcional bolǵan hálisiz awısıwdı beredi.

§ 347. Siltili metallardıń spektrleri. Siltili metallardıń ayırım seriyalarınıń Balmerdiń vodorodlıq seriyası menen uqsaslıǵı siltili metallardıń spektriniń valentli elektron dep atalatuǵın eń sırtqı elektronnıń bir orbitadan ekinshisine ótkende shıǵarıladı dep oylawǵa májbúrleydi. Sırtqı elektron yadro menen qalǵan elektronlardıń maydanında yamasa (usınday etip aytıw qabıl

etilgen) *atomnıń qaldıǵınıń* maydanında qozǵaladı. Úlken qashıqlıqlarda atomnıń qaldıǵınıń maydanı jetkilikli dárejede noqatlıq zaryadtıń maydanına usaydı. Birinshi ret D.S. Rojdestvenskiydiń kórsetkenindey, siltili atomlardıń alıstaǵı orbitaları vodorodtıń orbitalarına uqsas bolıwı kerek; siltili metallardıń "alıstaǵı" termleriniń vodorodtıń sáykes termlerine derlik dál keletuǵınlıǵı faktın kórsetetuǵın empirikalıq faktler bul juwmaqtıń durıs ekenligin tastıyıqlaydı.

Elektronnıń orbitası atomlıq qaldıqqa qanshama jaqın kelse, onda vodorod atomına salıstırǵanda kóbirek mayısqa boladı. Biraq, eger atomlıq qaldıqtıń maydanı sharlıq simmetriyaǵa iye bolsa, onda orbitalar tegis bolıp qala beredi hám burınǵıday eki kvantlıq shártlerdi qanaatlandırıwı kerek:

$$\oint p_{\varphi} d\varphi = n_{\varphi} \hbar, \quad \oint p_r dr = n_r \hbar.$$

D.S.Rojdestvenskiy siltili metallardıń termleriniń vodorodtıń termleri menen salıstırıp, siltili metallardıń orbitalarınıń sanınıń vodorodtıń múmkin bolǵan orbitalardıń sanına teń ekenligin kórsetti. Biraq, siltili metallarda bir bas kvant sanı n ge, biraq hár qıylı azimutallıq n_{φ} kvant sanlarına, yaǵnıy hár qıylı geometriyalıq formaǵa iye orbitalar hár qıylı dárejede tásiirlengen hám, soǵan sáykes, olarǵa sáykes keletuǵın energiyalar bir birinen sezilerliktey ayırmaǵa iye. Al vodorodta bolsa (344-paragraf) birdey n ge sáykes keletuǵın barlıq orbitalarǵa birdey energiya sáykes keledi. Eger vodorod atomınıń elektronnıń hár qıylı stacionar qozǵalıısına sáykes keletuǵın energiyası

$$W = -\frac{Rhc}{n^2}$$

formulası menen beriledi. Bul formulada bas kvant sanı $n = n_{\varphi} + n_r$. Bunday jaǵdayda siltili metaldıń atomınıń energiyası Ridberg formulası menen beriledi:

$$W = -\frac{Rhc}{(n + \alpha)^2} = -\frac{Rhc}{n^{*2}}.$$

Bul teńliktegi α - azimutal kvant sanı n_{φ} den gárezli bolǵan teris dúzetiwi, $n^* = n + \alpha$ shaması *effektivlik kvant sanı* dep ataladı; onıń mánisi energiyanıń mánisi boyınsha, al energiyanıń mánisi bolsa óz gezeginde termnıń san mánisi boyınsha anıqlanadı.

Elektronlıq orbita atomlıq qaldıqqa qanshama jaqınlasa, α dúzetiwi de absolyut shaması boyınsha úlken boladı. Kúshli tásiirlengen orbitalar ushın α dúzetiwiń mánisi san shaması boyınsha 1 den úlken bolıwı hám haqıyqıy kvant sanı n niń effektivlik kvant sanı n^* nen ádewir úlken ayırmaǵa iye bolıwı múmkin.

Siltili metallardıń termleriniń empirikalıq jollar menen tabılǵan termlerinen (341-súwret) bir kvant sanı menen táriyiplenetuǵın bir neshe termlerdiń bolatuǵınlıǵı kórinip tur (mısalı 4S, 4R, 4D, 4F termler). Joqarıda ayılǵan jaǵdaylardan bul termlerdiń bir bas kvantlıq sanına hám hár qıylı n_{φ} azimutallıq kvant sanlarına juwap beretuǵınlıǵı ayqın. Atomdaǵı nS, nR, nD, nF termlerine sáykes keletuǵın hallardı tap sonday simvollar menen, biraq kishi latin háripleri ns, np, nd, nf menen belgileymiz. D.S.Rojdestvenskiy siltili metallardıń termleriniń vodorodtıń termleri menen salıstırıp ns hallarına $n_{\varphi} = 1$ diń, np hallarına $n_{\varphi} = 1$ niń h.t.b. sáykes keletuǵınlıǵı kórsetti. Bunnan biz múmkin bolǵan hallardıń sxemasın, sonıń menen birge siltili metaldaǵı múmkin bolǵan termlerdi ala alamız (XXI keste).

Kvantlıq mexanika boyınsha atomnıń hallarınıń arasında n_{φ} kvant sanınıń tek ± 1 shamasına ózgeretuǵın ótiwlerdiń bar ekenligine baylanıslı bul sxema ayqın túrde tastıyıqlanadı:

$$\Delta n_{\varphi} = \pm 1. \quad (2)$$

(2)-saylap alıw qaǵıydası nS termininiń tek nP termleri menen, nP termininiń tek nS hám nD termi menen kombinaciyalanatuǵınlıǵı tekkeley túsindire aladı. Bul kombinaciylarǵa azimutal kvant sanınıń ± 1 ge ózgerisi sáykes keledi. Basqa kombinaciylardıń barlıǵı "qadaǵan etilgen".

Sebebi, olarğa n_φ shamasınıń 1 den úlken shamaǵa ózgerisi yamasa turaqlı bolıp qalıwı sáykes keledi.

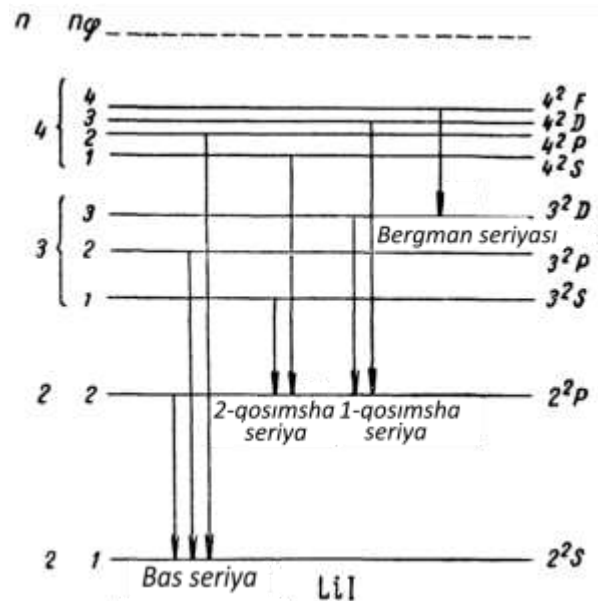
XXI keste.

$\begin{matrix} n_\varphi \\ n \end{matrix}$	1	2	3	4
1	1s	-	-	-
2	2s	2p	-	-
3	3s	3p	3d	-
4	4s	4p	4d	4f

Kvant sanınıń birdey mánislerine sáykes keletuǵın bir qatar orbitalarda, mısalı, 4s, 4r, 4d, 4f orbitalarda 4f orbitası dóńgelek bolıp tabıladı, al 4s - eń sozılǵan ellips. Usıǵan sáykes, 4s orbita kóbirek tásirge ushıraǵan, al 4f orbitaǵa bolsa atomnıń qaldıǵına kiretuǵın elektronlar tárepinen júdá kishi tásir tiyedi. Bunnan siltili metaldıń 4S, 4R, 4D, 4F termleriniń qatarında n^* effektivlik kvant sanı 4F termide $n = 4$ shamasınan eń kishi ózgeshelikke, al 4S termide eń úlken ózgeshelikke iye.

Bul aytılganlardıń barlıǵı siltili metallardıń qáddileriniń dáligin joqarılatıwǵa hám olarǵa atomnıń hár qıylı stacionar halların beriwge múmkinshilik beredi. Hár bir n kvant sanına azimutal kvant sanınıń $n_\varphi = 1, 2, 3, \dots, n$ mánislerine sáykes keletuǵın hár qıylı bolǵan n qáddi sáykes keledi. Qáddilerdiń arasındaqı $\Delta n_\varphi = \pm 1$ teńligi orınlanatuǵın ótiwlerdiń bolıwı múmkin. 341-paragrafta biz barlıq siltili metallar ushın effektivlik kvant sanı $n^* = n + \alpha$ eń tereń bolǵan S termleri ushın 1 menen 2 niń arasında jaylasqan mániske iye bolatuǵınlıǵın kórsetken edik. Endi biz kúshli tásirengen orbitalar ushın bas kvant sanlarınıń n^* kvant sanınan ádewir úlken bola alatuǵınlıǵın, soǵan sáykes onıń pútin mánisine sáykes kelmeytuǵınlıǵın kórsettik. Keyinirek biz litiydiń eń tereń S-termi ushın $n = 2$, al natriydiń eń tereń S-termi ushın $n = 3$ h.t.b. ekenligin kóremiz. 338-súwrette litiydiń qáddileriniń sxeması berilgen. Bul sxemada hár bir qáddiniń qasında sáykes bas (n) hám azimutallıq (n_φ) kvant sanlarınıń mánisleri keltirilgen. Strelkalar 341-paragrafta keltirilgen empirikalıq materiallarǵa sáykes ayırım seriyalardıń payda bolıwın túsindiredi. 326-súwret penen ayırma sonnan ibarat, bul súwrette termlerdiń (1S, 2P h.t.b.) qasındaǵı sanlar effektivlik kvant sanı n_φ diń pútin bólimin ańǵartadı, al 338-súwrette bolsa n bas kvant sanlarınıń haqıyqıy mánisin beredi.

338-súwret.
Litiydiń qáddileriniń sxeması.



§ 348. Bor teoriyasınıń qıyınshılıqları; elektronnıń spini haqqındaǵı gipoteza. Bunnan aldırǵı paragraflarda keltirilgen material Bordıń joqarıda keltirilgen ideyalarınń oǵada jemisli ekenligine gúmán payda etpeydi. Stacionar hallar menen jıyılıqlar qaǵıydası házirgi zaman atom fizikasınıń tiykargı kóz-qaraslarınń qatarına kiredi. Biraq, usınday jaǵdaylardıń orın alıwına qaramastan biz Bor teoriyasınıń bunnan bılay rawajlanıwınıń principiallıq xarakterge iye bolǵan úlken qıyınshılıqlarǵa ushıraytuǵınlıǵın kórdik. Bul principiallıq logikalıq qıyınshılıqlardıń birinshi gezekte mınalar menen baylanıslı ekenligin kórsetemiz: 344-paragraftaǵı (1)-kvantlanıw qaǵıydası bir mánisli emes, onıń beretuǵın nátiyjesi ulıwmalastırılǵan koordinatalardıń saylap alınıwınan ǵárezli; stacionar hallardıń energiyası qanday ulıwmalastırılǵan koordinatalardıń saylap alınıwınan ǵárezsiz, biraq stacionar orbitalardıń forması - hár qıylı. Usınıń menen bir qatarda Bor teoriyası jetkiliksiz: ol stacionar hallardıń energiyaları menen shıǵarılatuǵın sızıqlardıń jıyılıqların anıqlaydı, usınıń menen birge olardıń intensivligi, polyarizaciyası hám kogerentligi haqqında hesh nárse ayta almaydı.

Jaqtılıqtıń jutılıwı menen baylanıslı bolǵan dispersiya qubılısı da Bor teoriyasınıń shekleriniń sırtında qaladı. Bor teoriyası siltili metallardıń spektrleriniń dubletlik xarakterge iye ekenligin hám qalǵan elementlerdiń spektrlerindegi quramalıraq bolǵan, multipletlik xakteri dep atalatuǵın xarakterin túsindiriwde úlken qıyınshılıqlarǵa ushırasadı.

Eger biz siltili metallardıń atomlıq qaldıǵınıń maydanı sharlıq simmetriyaǵa iye bolatuǵın bolsa, onda valentli elektronnıń stacionar orbitalarınıń sanı vodorodtaǵı stacionar orbitalardıń sanına teń bolatuǵınlıǵın kórdik. Biraq bul jaǵday sızıqlardıń dubletlik xarakterge iye bolatuǵınlıǵın túsindiriw ushın jetkiliksiz. Eger S termlerinen basqa termlerdiń barlıǵı qos hám olardıń arasındaǵı ótiwlerdi bazı bir qosımsha saylap alıw qaǵıydası menen regulirovklanadı dep esaplasaq, onda formallıq jaqtan dubletlikti túsindiriwge boladı. Sızıqları onnan da quramalı bolǵan gruppalardı payda etetuǵın basqa elementlerde qáddilerdi úshlik, tórtlik h.t.b. dep esaplawǵa tuwrı keledi. Spektrlerdiń quramalı strukturasın atomlıq qaldıqlardı sharlıq simmetriyaǵa iye emes dep esaplaw tiykarında túsindiriwge tıristı. Bunday jaǵdayda, qálegen orbita ushın 344-paragraftaǵı (1)-kvant shártleri tek radius-vektor r menen azimut φ ge ǵana emes, al úshinshi koordinata, misalı keńlik ϑ ushın da kirgiziwge tuwrı keledi (biz bunı sırttan tásir etetuǵın maydan bar bolǵan jaǵday ushın islegen edik). Bul úshinshi keńisliklik kvantlanıwdıń mınaday nátiyjege alıp keliwi kerek: sırtqı elektronnıń orbitasınıń tegisligi atomlıq qaldıqtıń maydanına salıstırǵanda belgili bolǵan úzlikli múyeshlerdi jasawı kerek. Atomlıq qaldıqtıń simmetriyası bolmaǵanda keńiklikte hár qıylı bolıp orientaciyalanǵan orbitalar hár qanday dárejede mayısadı hám, soǵan sáykes,

olarga energiyanıń hár qıylı mánisleri sáykes keledi. Biraq siltili metallardaǵı atomlıq qaldıqtır simmetriyalı xarakterı keskin qoyılǵan bir qatar pikirlerde tastıyqlanadı: bir elektronın joǵaltqan siltili metall inert gazge usaydı. Bul siltili metallardıń ionlarınıń spektrleriniń sáykes inert gazlerdiń spektrleri menen tolıq uqsaslıǵı boyınsha tastıyqlanadı. Inert gazlerdiń fizikalıq-ximiyalıq qásiyetleri olardıń nolden ózgeshe bolatuǵın elektrlik hám magnitlik momentleri bolmaytuǵın elektronlıq qabıqlarınıń simmetriyalı ekenligine gúman payda etpeydi.

Atomlardıń magnit momentlerin túsindiriwge tırıswlar da kishi bolmaǵan qıyınshılıqlar menen ushırasadı. Biziń 345-paragrafta kórsetip ótkenimizdey, kóp atomlardıń magnit momentleriniń shamaları Bor magnetonınan pútin san eselengen mánisine teń emes. Biraq, bir neshe elektronları bar atomlarǵa Bor teoriyasın ulıwmalastırıw barlıq atomlardıń magnit momentleri Bor magnetonınan pútin san ese úlken bolıwınıń kerek ekenligin kórsetedi.

Atomlardıń magnitlik anomaliyaları menen baylanıslı bolǵan qıyınshılıqlardı elektronlarda menshikli mexanikalıq hám magnit momentleri boladı dep esaplaw jolı menen bazı bir dárejede saplastırıwǵa boladı eken. Bul gipoteza boyınsha *hár bir elektron e zaryadı, m massaǵa iye bolıw menen birge san mánisi $\frac{1}{2}\hbar$ qa teń qozǵalıstı muǵdarınıń mexanikalıq momenti p_s ke de, san shaması bir Bor magnetonı μ_0 ge turaqlı magnit momenti μ ge de teń*. Elektronnıń mexanikalıq momenti p_s spin atamasına iye boldı.

Elektronda qozǵalıstı muǵdarınıń mexanikalıq momenti hám onıń menen baylanıslı bolǵan magnit momentiniń bolıwın elektronnıń óziniń menshikli kósheriniń dógerindegi turaqlı aylanısı menen túsindiriwge tırıstı. Bunnan elektronnıń momenti ushın "spin" sózi kelip shıqtı, ingliz tilindegi spin sózi aylanbalı qozǵalıstı, aylanıwdı ańǵartadı.

Elektronnıń orbitalıq qozǵalıstında onıń mexanikalıq hám magnit momentleri p menen μ diń san mánisleriniń arasındaǵı ápiwayı qatnas orın aladı:

$$\frac{\mu}{p} = \frac{1}{2c} \cdot \frac{e}{m}.$$

Elektronnıń menshikli mexanikalıq hám magnit momentleri ushın bul qatnastır shaması *eki ese úlken*

$$\frac{\mu_0}{p_s} = \frac{1}{c} \cdot \frac{e}{m}.$$

Elektrodinamikalıq kóz-qarastan óziniń menshikli kósheriniń dógerinde aylanıwshı elektron gipotezası qarama-qarsılıqqa iye: p_s penen μ_0 momentleriniń san mánislerin túsindiriw ushın elektronlardıń oǵada úlken bolǵan aylanıw tezligi zárúr, bunday jaǵdayda onıń ekvatorındaǵı noqatlardıń tezligi jaqtılıqtır tezliginen úlken bolıwı kerek, bul jaǵday salıstırmalıq principine qarama-qarsı keledi.

Elektronnıń spini haqqındaǵı gipoteza siltili metallardıń spektrleriniń dubletlik xarakterin túsindiriwge múmkinshilik beredi. Formallıq jaqtan, siltili metallardıń sızıqlarınıń dubletlik xarakterin túsindiriw ushın S-termlerden basqa termlerdiń barlıǵın qos dep boljaw kerek. Termlerdiń usınday termlerge ajırılıwı elektronda spinlik momenttiń bar ekenliginen kelip shıǵadı. Biziń joqarıda kórgenimizdey (347-paragraf), siltili metallardıń atomlarında atomlıq qaldıqtır maydanında valentli elektronnıń orbitasınıń tásirengenliginiń saldarınan kvant sanlarınıń hám bir n hám n_φ jubına belgili bolǵan energiya qáddi sáykes keledi. Bor teoriyası boyınsha kvant sanlarınıń hám bir n hám n_φ jubına valentli elektronnıń belgili formaǵa hám ólshemge iye bolǵan orbitası sáykes keledi. Usı orbita boyınsha qozǵalatuǵın elektron orbitalıq mexanikalıq hám magnit momentlerine iye boladı, yaǵnıy magnit maydanın payda etedi (atomlıq qaldıqtır magnit momenti onıń joqarı simmetriyasına baylanıslı nolge teń). Elektronnıń menshikli momenti haqqındaǵı gipotezanı qabil etip, elektronlıq moment p_s tiń p momentine salıstırǵandaǵı múmkin bolǵan orientaciýaların tabıw kerek. Elektron mexanikalıq p_s momenti menen birge onıń menen baylanıslı bolǵan menshikli magnit momenti μ_0 ge de iye bolǵanlıqtan,

onda onıń qozǵalısqında $\mathbf{p}_s$ penen $\mathbf{p}$ nıń bir birine salıstırǵandaǵı orientaciyasınan ǵárezli bolǵan qosımsha $\Delta W'$ energiyası payda boladı. Elektronnıń menshikli momenti $\mathbf{p}_s$ orbitalıq moment $\mathbf{p}$ ǵa salıstırǵanda tek eki túrli bolıp baǵıtlanıwı múmkin. Orientaciyalardıń múmkin bolǵan usı eki orientaciyasına qosımsha energiya $\Delta W'$ tıń eki mánisi hám, usıǵan sáykes, hár bir termnıń ekige ajıralıwı sáykes keledi.

Elektronda menshikli magnit momentiniń bolıwı haqqındaǵı gipoteza vodorodtıń hám oǵan uqsas bolǵan ionlardıń juqa struktura dep atalatuǵın juqa strukturasın túsindiriwge múmkinshilik beredi. Bul struktura siltili metallardıń sızıqlarınıń dubletlik strukturasına usaydı, biraq olardan ádewir tar.

Elektronnıń menshikli magnit momenti haqqındaǵı gipoteza atomlardıń magnit momentleriniń mánislerindegi anomalialardı hám magnit maydanındaǵı spektrallıq sızıqlardıń úsh qurawshıdan kóp qurawshılarga ajıralıwın túsindiredi. Atomnıń tolıq magnit momenti μ orbitalıq magnit moment μ_l menen menshikli magnit momenti μ_0 dıń vektorlıq qosındısınan turadı: $\mu = \mu_l + \mu_0$. μ_l hám μ_0 momentleriniń múmkin bolǵan baǵıtların esapqa alıp, tolıq moment $\mu = \mu_l + \mu_0$ dıń mánisin anıqlawǵa boladı. Alınǵan nátiyje tájiriybelerde alınǵan nátiyjelerge tolıq sáykes keledi. $\mu = \mu_l + \mu_0$ tolıq momenti μ_l hám μ_0 momentleriniń múmkin bolǵan baǵıtlarında Bor megnetonı μ_0 dıń mánisine yamasa onıń pútin san eselengen mánisine teń bolmaǵan mániske iye bolıwı múmkin. Sırtqı H magnit maydanında atomnıń tolıq magnit momenti μ bir neshe túrli bolıp baǵıtlanǵan bolıwı múmkin (349-paragrafqa qarańız). Bul jaǵday Zeemannıń quramalı ("anomallıq") qubılısın túsindiredi.

§ 349. Atomnıń vektorlıq modeli. Bunnan aldınǵı paragraftaǵı siltili metallardıń spektrleriniń dubletlik xarakterin túsindiriw mınaday kemshilikke iye: onnan barlıq termlderdiń qos bolıwınıń kerek ekenligi kelip shıǵadı, biraq siltili metallardıń termlieri ápiwayı bolıp tabıladı. Solay etip, tájiriybelerde alınǵan maǵlıwmatlar menen sáykesliktiń orın alıwı ushın tek R, D, F h.t.b. termlderdi qos, al S termlderdi ápiwayı dep esaplaw kerek. Eger sırtqı elektronnıń stacionar hallarınıń ishinde $p = 0$ teńligi orın alatuǵın hal orın alsa hám bul hallar S-termgerge sáykes keletuǵın bolsa, onda bul jaǵdaydı túsindiriwge boladı.

344-paragrafta biz $p = 0$ teńligi orın alatuǵın hallardı júzege kelmeydi dep esapladıq, sebebi bunday hallarga elektronlardıń yadro arqalı ótetuǵın tuwrı sızıq boylap qozǵalısqı sáykes keledi. Biraq biz elektronlardıń atomlardıń ishindegi belgili bolǵan orbitalar boyınsha qozǵalısqın juwıq dep esapladıq. Sonlıqtan, stacionar hallardıń ishinen $p = 0$ teńligi orın alatuǵın hallardı alıp taslawǵa májbúrleytuǵın pikirlerdi paydalanıwdıń zárúrliǵı joǵaladı.

Bunnan bılay biz mınaday jaǵdaydı kóremiz (366-paragraf): p momentleriniń absolyut mánisleri pútin san eselengen $\hbar$ shamasına teń bolmaydı, atap aytqanda elektronnıń orbitalıq momenti (endi biz onı p_l arqalı belgileybiz) mınaday mánislerdi qabıl etedi:

$$p_l = \sqrt{l(l+1)}\hbar. \quad (1)$$

Bul teńlikte $l = 0, 1, 2, \dots, (n-1)$.

Jańa l kvant sanı burınǵı azimutallıq kvant sanı n_φ di almastradı. n bas kvant sanınıń berilgen mánisinde ol n_φ sıyaqlı hár qıylı bolǵan n dana mániske iye boladı, biraq nolden baslanadı (n_φ nıń mánisi 1 den baslanatuǵın edi).

Tájiriybelerde alınatuǵın maǵlıwmatlarga sáykes bolıwı ushın elektronnıń menshikli momenti $\mathbf{p}_s$ haqqındaǵı dáslepki boljawdı da ózgertiwge tuwrı keledi. Atap aytqanda p_s mınaday mániske iye boladı dep esaplaw kerek:

$$p_s = \sqrt{s(s+1)}\hbar. \quad (2)$$

Bul teńlikte s shaması múmkin bolǵan bir mániske iye $s = 1/2$. Usınıń menen birge elektronnıń momentiniń berilgen baǵıtqa túsirilgen proekciyası bolǵan $|p_{sz}|$ shaması $\frac{1}{2}\hbar$ mánisin qabıl etedi. Bul proekciyanıń eki usılda baǵıtlana alatuǵın bolǵanlıqtan (berilgen baǵıt boyınsha hám oǵan qarama-qarsı baǵıtta) p_{sz} shaması tómendegidey eki mánisti qabıl ete aladı:

$$p_{sz} = m_s \hbar. \quad (3)$$

Bul teńlikte $m_s = \pm \frac{1}{2}$.

Demek, biz birotala mınanı alamız: atomdaǵı elektronnıń qozǵalıǵı halı mınaday úl kvant sanınıń járdeminde táriyiplenedi:

1) 1, 2, 3, 4, ... mánislerin qabıl etetuǵın n kvant sanları menen;

2) n niń berilgen mánisinde 0, 1, 2, ... , $(n - 1)$ mánislerin qabıl etetuǵın qosımsha l kvant sanı;

3) $\pm \frac{1}{2}$ mánisin qabıl etetuǵın m_s kvant sanı.

Bor teoriyası boyınsha bas kvant sanı n orbitanıń ólshemlerin hám birinshi jaqınlasıwda onıń

$$W = -\frac{Rhc}{n^2}$$

shamasına teń bolǵan energiyasın anıqlaydı.

Qosımsha kvant sanı l orbitalıq moment $\mathbf{p}_l$ di hám usıǵan baylanıslı orbitanıń formasın hám atomlıq qaldıqtaǵı onıń tásirleńiw dárejesin anıqlaydı. m_s kvant sanı orbitalıq moment $\mathbf{p}_l$ ge salıstırǵandaǵı elektronnıń menshikli momentiniń orientaciyası $\mathbf{p}_s$ ti anıqlaydı.

Elektronnıń s-halları ushın $l = 0$ hám usıǵan sáykes orbitalıq moment $\mathbf{p}_l$ nolge teń. Usıǵan baylanıslı elektronnıń menshikli momenti $\mathbf{p}_s$ tiń sol $\mathbf{p}_l$ ge salıstırǵandaǵı hár qıylı baǵıtlarınıń bolıw zárúrliǵı joǵaladı hám usınday hár qıylı orientaciyalar menen baylanıslı bolǵan qosımsha energiya ushın $\Delta W' = 0$ shamasın alamız. Usınday jollar menen S termleriniń ápiwayı bolatuǵınlıǵı, al basqa termlerdiń ekige ajıralatuǵınlıǵı túsindiriledi.

Elektronnıń atomdaǵı qozǵalıǵı halın táriyipleytuǵın n, l, m_s kvant sanlarınıń ornına elektronnıń qozǵalıǵı muǵdarınıń tolıq momenti $\mathbf{p}_j$ di qarap, basqa úshlik n, l, j lardı kirgiziwge boladı. Álbette, bunday jaǵdayda $\mathbf{p}_j$ tolıq momenti elektronnıń orbitalıq momenti $\mathbf{p}_l$ menen menshikli momenti $\mathbf{p}_s$ tiń geometriyalıq qosındısına teń boladı:

$$\mathbf{p}_j = \mathbf{p}_l + \mathbf{p}_s. \quad (4)$$

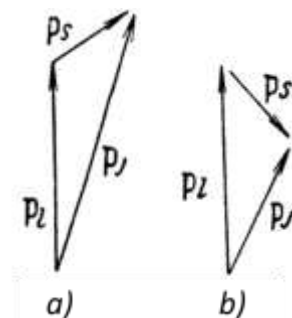
Bunday jaǵdayda $\mathbf{p}_l$ hám $\mathbf{p}_s$ momentleriniń arasındaǵı múyeshler tolıq momenttiń

$$p_j = \sqrt{j(j+1)}\hbar \quad (5)$$

mánislerine sáykes keletuǵınday boladı. Bul teńlikte $j = |l + m_s|$.

$m_s = \pm \frac{1}{2}$ teńliǵı orınlı bolatuǵın bolǵanlıqtan, $l \neq 0$ bolǵan jaǵdayda j kvant sanı $j = l \pm \frac{1}{2}$ mánislerine iye boladı; $l = 0$ teńliǵı orınlanǵan jaǵdayda j kvant sanı tek bir $j = \frac{1}{2}$ mánisin qabıl etedi. $l \neq 0$ teńsizliǵı orınlanǵan jaǵdaydaǵı $\mathbf{p}_l$, $\mathbf{p}_s$ hám $\mathbf{p}_j$ vektorlarınıń óz-ara jaylasıwları 339 a hám b súwretlerde keltirilgen.

339-súwret.
Elektronnıń orbitalıq hám spinlik
momentlerin qosıw.



$\mathbf{p}_j$ niń múmkin bolǵan mánisleri vektorlıq qosıw jolı menen tabılatuǵın bolǵanlıqtan, atomnıń biz qaraǵan modeli *vektorlıq model* dep ataladı. Sırtqı magnit maydanında atomnıń μ magnit momenti $2j + 1$ usıl menen baǵıtlanadı, bul jaǵday sırtqı bir tekli bolmaǵan magnit maydanındaǵı dástelerdiń mayda dástelerge ajıralıwın baqlawlarǵa da, Zeeman qubılısına da sáykes keledi

Burıngıday etip, bunnan keyin de atomdağı elektronnıń halların 1s, 2p, 3d h.t.b. belgileymiz. Biraq, olardı tolıq moment p_j nıń mánislerin de beriwi ushın bul simvollarğa qosımshalardı kirgizemiz. Onıń ushın kórsetilgen simvolların qasına j nıń sáykes mánisin indeks túrinde beremiz. Bunday jaǵdayda, mısalı, $2p_{1/2}$ simvolı elektronnıń kvant sanların $n = 2, l = 1, j = 1/2$ mánislerine menen táriyipleytuǵın halın ańǵartadı. Tap sol sıyaqlı $3d_{5/2}$ simvolı elektronnıń $n = 3, l = 2, j = 5/2$ sanları menen táriyiplenetuǵın haldı ańǵartadı. Atomnıń tutası menen alǵandağı halı S, P, D latin háripleri menen belgileymiz. Olarğa da indeks túrinde j dıń mánisin jazamız; eń aqırında termlderdiń dubletlik xarakterin kórsetiw ushın simvoldıń shep tárepine, joqarıǵa 2 sanın qoyamız. Nátiyjede, $^2S_{1/2}, ^2P_{1/2}, ^2P_{3/2}$ h.t.b. simvolların alamız. Siltili metallardıń atomları ushın úlken latin háripleri menen jazılǵan S, P, D h.t.b. jańa hesh nárseni de ańǵartpaydı. Sebebi bunday atomlardıń halları olardıń tek bir elektronnıń halı menen anıqlanadı. Biraq bunday qos simvolika sırtqı elektronların sanı eki yamasa onnan da kóp bolǵan atomlardıń halların táriyiplew ushın júdá qolaylı.

Usınday jollar menen siltili metallardıń múmkin bolǵan halların $n = 1, 2, 3$ bolǵan jaǵdaylar ushın sxemasın alamız (XXII keste).

XXII keste.

n	l	j	Valentli elektronnıń halın simvolı	Atomnıń halın simvolı
1	0	$1/2$	$1s_{1/2}$	$^2S_{1/2}$
2	0	$1/2$	$2s_{1/2}$	$^2S_{1/2}$
	1	$1/2$	$2p_{1/2}$	$^2P_{1/2}$
		$3/2$	$2p_{3/2}$	$^2P_{3/2}$
3	0	$1/2$	$3s_{1/2}$	$^2S_{1/2}$
	1	$1/2$	$3p_{1/2}$	$^2P_{1/2}$
		$3/2$	$3p_{3/2}$	$^2P_{3/2}$
	2	$3/2$	$3d_{3/2}$	$^2D_{3/2}$
		$5/2$	$3d_{5/2}$	$^2D_{5/2}$

Hár bir halğa atomnıń energiyasınıń ayrıqsha mánisi hám, usıǵan sáykes, óziniń termi sáykes keledi. Sonlıqtan úlken latin háripleri bir waqıtta atomnıń halın da, termi de ańǵartadı.

347-paragrafta ayılǵanlarǵa sáykes, siltili metallarda valentli elektron ushın bas kvant sanı n niń mánisi $n = 1$ den baslanbaydı, al onnan úlken bolǵan mánislerden baslanadı (litiy ushın $n = 2$ den, natriy ushın $n = 3$ ten h.t.b.). 340-súwrette $n = 3$ ten baslanatuǵın natriy menen oǵan uqsas bolǵan ionlardıń qáddileri sxema túrinde kórsetilgen. Strelkalar spektrallıq sızıqlardıń shıǵarılıwına alıp keletuǵın qáddilerdiń arasındaǵı ótiwlerdi kórsetedi. Múmkin bolǵan ótiwler saylap alıw qaǵıydası boyınsha anıqlanadı: n_φ ushın saylap alıw qaǵıydasında, l kvant sanı ushın

$$\Delta l = \pm 1 \quad (6)$$

saylap alıw qaǵıydası (347-paragraf) hám j kvant sanı ushın

$$\Delta j = 0, \pm 1 \quad (7)$$

saylap alıw qaǵıydası orınlanadı.

340-paragrafta kórinip turǵanınday, bas seriyanıń

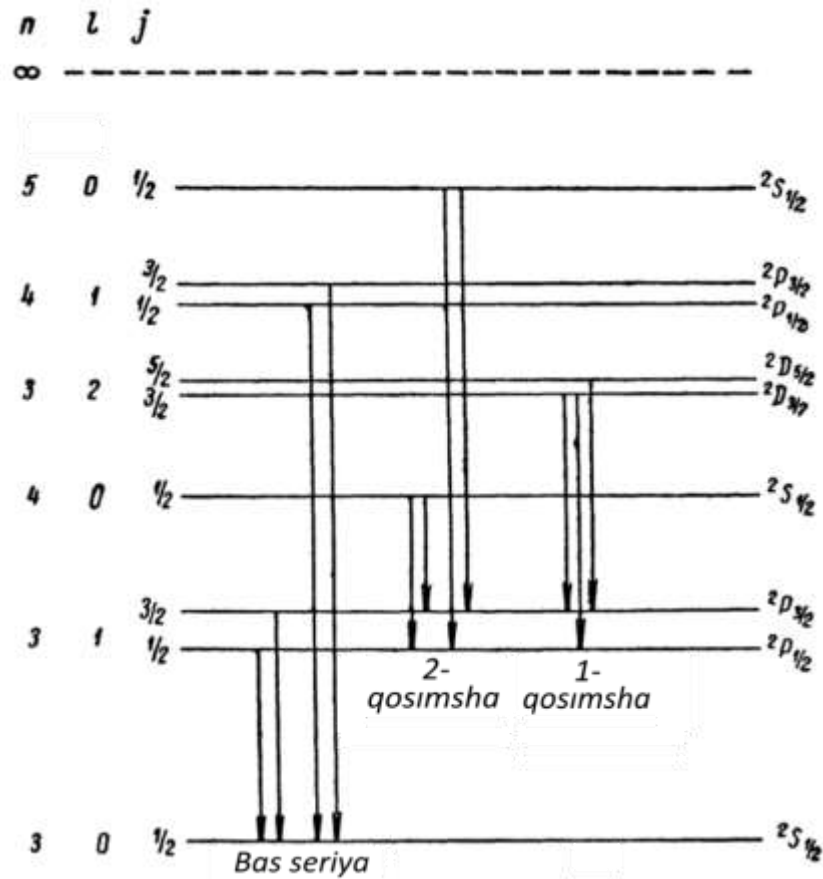
$$\left. \begin{aligned} \nu &= 3 \ ^2S_{1/2} - n \ ^2P_{1/2}, \\ \nu &= 3 \ ^2S_{1/2} - n \ ^2P_{3/2} \end{aligned} \right\}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

sızıqları qos sızıqlar bolıp tabıladı; olardıń dubletligi $n \ ^2P_j$ termlderiniń eki mániske iye bolatuǵınlıǵın saldarı bolıp tabıladı.

Ekinshi qosımsha seriyanıń sızıqları da qos.

(7)-saylap alıw qaǵıydasın paydalanıp, $3 \ ^2P_j - n \ ^2D_j$ hám $3 \ ^2D_j - n \ ^2F_j$ seriyaların sızıqların úsh qurawshıdan turatuǵınlıǵın ańsat kóriwge boladı. Biraq, l dıń ósiwi menen termlderdiń

dubletlik ajıralıwı kishireyetuǵın bolǵanlıqtan, bul úshinshi qurawshı qalǵan ekewiniń birine júdá jaqın jaylasadı hám tek awır siltili metallarda sezilerliktey boladı.



340-súwret. Natriydiń qáddileriniń sxeması.

Vektorlıq modeldi bir neshe valentli elektronlarǵa iye bolǵan atomlar menen ionlarǵa ulıwmalastırıw múmkin. Bir neshe elektron bolǵan jaǵdayda olardıń orbitalıq hám spinlik $\mathbf{p}_{li}$ hám $\mathbf{p}_{si}$ momentler qosındı momentke qosıladı. Atomnıń tolıq energiyası tek momentlerdiń ózleriniń mánisinen ǵana emes, al olardıń bir birine salıstırǵandaǵı orientaciyalarınan da ǵárezli. Bul atomlıq qaldıqtıń dógereginde bir neshe elektronlar aylanatuǵın atomlardadı qáddilerdiń qurılısın quramalastıradı.

Eki valentli elektron bolǵan jaǵdaydı qaraymız. *Eki valentli elektronı bar atom yamasa ion haqqında gáp etkende sol eki elektronnan basqa elektronlardı jabıq qabıqlardı payda etetuǵın atomlar menen ionlardı túsinemiz.* Jabıq qabıqlardıǵı elektronlardıń qosındı momentleri nolge teń. Usınday atomlar menen ionlardıń halı tek sol eki sırtqı, valentli elektronlardıń halları menen anıqlanadı. Bul gruppanıń wakilleri bolıp yadronıń sırtında tek eki elektron bolatuǵın ionlar (He I, Li II, Be III, ...), siltili jer elementleri, Zn, Cd, Hg hám olarǵa uqsas bolǵan ionlar xızmet etedi.

Elektronlardıń biri barlıq waqıtta $1s$ (ulıwma jaǵdayda n_1s) halda, al ekinshisi múmkin bolǵan qálegen halda, bas kvant sanı n_2 niń qálegen mánisinde qalatuǵın dara jaǵdaydı qaraymız. Bunday jaǵdayda birinshi elektron ushın $l_1 = 0$, l_2 bolsa múmkin bolǵan qálegen mániske iye bola aladı. $l_1 = 0$ teńligi orınlanatuǵın bolǵanlıqtan, atom tutası menen l_2 ge sáykes keletuǵın kvant sanı L menen táriyiplenedi hám $\mathbf{P}_L$ tolıq orbitalıq moment $\mathbf{p}_{l_2}$ ge sáykes keledi. Qosındı spinlik moment $\mathbf{P}_S = \mathbf{p}_{s_1} + \mathbf{p}_{s_2}$ kvant sanınıń sáykes $S = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} = 0$ hám $S = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$ mánislerine sáykes keletuǵın eki mániske iye boladı.

$S = 0$ hám $S = 1$ bolǵan jaǵdaylardı óz aldına qaraymız. Olardıń birinshisi spinlik momentlerdiń kompensaciyası menen táriyiplenedi: atomnıń qosındı spinlik momentı $P_S = 0$. Bul halǵa *jekke-jalǵız termler* sáykes keledi, olar ushın J kvant sanınıń mánisi L diń mánisi menen birdey (XXIII kesteniń ortańǵı bólimin qarańız). Ekinshi jaǵdayda qosındı spinlik moment nolden ózgeshe hám kvant sanınıń $S = 1$ mánisi menen táriyiplenedi. Endi tolıq moment P_J niń mánisi

$$J = L + S, L + S - 1, \dots, |L - S|$$

mánislerin qabıl etetuǵın J kvant sanı menen anıqlanadı. Sonlıqtan, $S = 1$ bolǵan jaǵdayda hár bir L ge ($L = 0$ bolmaǵan jaǵdaylar ushın) J nıń múmkin bolǵan úsh mánisi, soǵan baylanıslı *tripletli termlerdiń* payda bolıwı sáykes keledi (XXIII kesteniń oń bólimi).

XXIII keste.

1-elektron	2-elektron	L	$S = 0$ (jeke-jalgız)		$S = 1$ (tripletler)	
			J	simvol	J	simvol
1s	1s	0	0	$^1S_0$	1	$^3S_1$
1s	2p	1	1	$^1P_1$	0 1 2	$^3P_0$ $^3P_1$ $^3P_2$
1s	3d	2	2	$^1D_2$	1 2 3	$^3D_1$ $^3D_2$ $^3D_3$
1s	4f	3	3	$^1F_3$	2 3 4	$^3F_2$ $^3F_3$ $^3F_4$

Hár bir termniń simvolına eki belgini qoyamız: shep táreptegi joqarıdaǵı belgi onıń multipletligin kórsetedi (jeke-jalgız, triplet) hám oń tárepte tómende - J kvant sanınıń mánisin kórsetetuǵın belgi. Toliq xarakteristika ushın atomnıń halınıń simvolınıń aldına elektronlardıń simvolların jazadı. Mısalı, eger elektronnıń biri 1s halda, al ekinshisi 2p halda turatuǵın atomnıń $^3P_1$ halı haqqında gáp etilip atırǵan bolsa, onda biz $1s2p^3P_1$ dep jazamız.

Solay etip, eki elektronǵa iye atom termlerdiń hár qıylı bolǵan eki jıynaǵına iye boladı: jeke-jalgız termlerdiń jıynaǵı hám tripletlik termlerdiń jıynaǵı. Haqıyqatında da, geliydiń spektri seriyalardıń eki hár qıylı bolǵan jıynaǵına iye. Usınıń saldarınan geliydi hár qıylı bolǵan eki elementtiń aralaspasınan turadı dep esaplaǵan hám olardı *parageliy* hám *ortogeliy* dep ataǵan. Parageliydiń sızıqları - jeke-jalgız; ortogeliydiń sızıqların dáslep dubletler dep esapladı. Biraq házirgi zaman spektroskopiyası paydalanatuǵın joqarı ajırata alıw kúshine iye ásbaplar olardıń júdá tar bolǵan tripletlerden turatuǵınlıǵın kórsetti.

Baqlawlar jeke-jalgız termler menen tripletlerdiń termleriniń bir birinen ádewir jılısqan ekenligin kórsetedi. $S = 1$ qáddiler sáykes $S = 0$ qáddilerden tómende jaylasadı. Elementar teoriya bul fakttı túsindire almaydı: eki elektronnıń spinleriniń óz-ara tásirlesiw energiyası hám spin menen orbitanıń momentiniń óz-ara tásirlesiw energiyasınıń birdey tártipte bolıwı kerek; sońǵı jaǵday bolsa tek salıstırmalı tar multipletlik strukturanı ǵana payda etedi. Al is júzinde qubılıs kvantlıq mexanika menen túsindiriletuǵın basqa sebep penen baylanıslı.

Tallanıp atırǵan jaǵdayda bir elektron barlıq waqıtta $l_1 = 0$ teńligi orınlanatuǵın orbitada jaylasadı, sonlıqtan atomnıń stacionar halları bir birinen ekinshi elektronnıń qozǵalıswınıń hár qıylı halları boyınsha ayırıladı. *Usınıń menen birge, sızıqlardıń shıǵarılıwı da ekinshi elektronnıń bir haldan ekinshi halǵa ótiwiniń saldarınan júzege keledi.* Bunday jaǵdayda

$$\Delta L = \pm 1$$

saylap alıw qaǵıydası orın aladı. Usınıń menen bir qatarda J penen S ushın da

$$\Delta J = 0, \pm 1, \quad \Delta S = 0$$

saylap alıw qaǵıydaları orınlanadı.

Bul úsh qaǵıyda tripletlik sızıqlardıń strukturasınıń túsiniwge múmkinshilik beredi. Dubletler bar bolǵan jaǵdaydaǵıday, S termleri tek P termleri menen, al P termleri tek S hám D termleri menen h.t.b. kombinaciyalana aladı. Solay etip, tripletler bolǵan jaǵdaydaǵıday, bas, qosımsha h.t.b. seriyalar tabıladı. Bas seriya "haqıyqıy" tripletlerden, yaǵnıy úsh sızıqqa iye gruppalardan turadı:

$$\nu = 1 \ ^3S_1 - n \ ^3P_0, \nu = 1 \ ^3S_1 - n \ ^3P_1, \nu = 1 \ ^3S_1 - n \ ^3P_2.$$

n niń ósiwi menen tripletlerdiń qurawshılarınıń arasındaǵı qashıqlıq kishireydi⁴⁰.

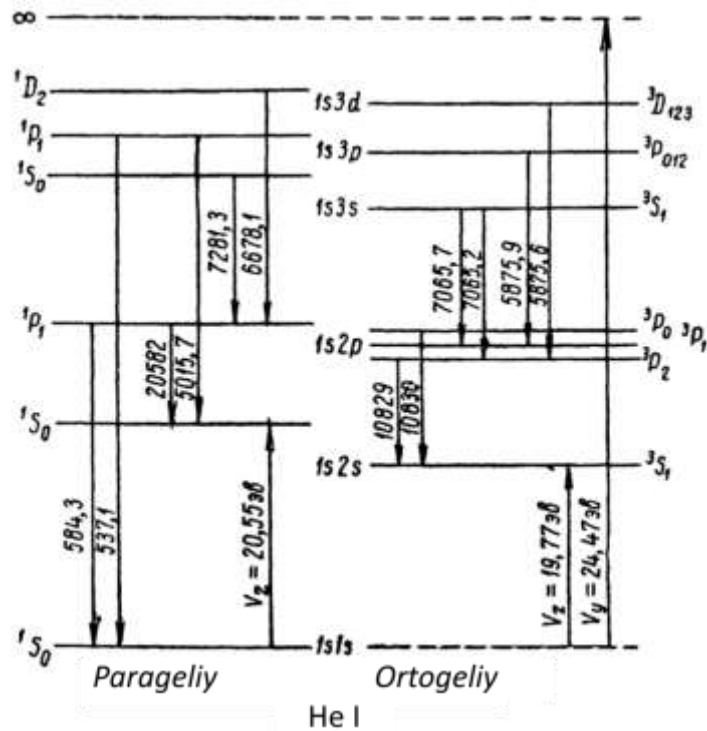
Ekinshi qosımsha seriyanıń sızıqları da úsh sızıqtan turatuǵın gruppalar payda etedi:

$$\nu = 2 \ ^3P_0 - n \ ^3S_1, \nu = 2 \ ^3P_1 - n \ ^3S_1, \nu = 2 \ ^3P_2 - n \ ^3S_1.$$

Seriya arqalı ótkende bul tripletlerdiń keńligi ózgerissiz qaladı. $n \rightarrow \infty$ sheginde triplettiń qurawshılarınıń hár biri óziniń menshikli shegine umtıladı; bul sheklerdiń orınları termlerdiń sanlı mánisleri $2 \ ^3P_0$, $2 \ ^3P_1$, $2 \ ^3P_2$ ler menen beriledi.

⁴⁰ Bul jerde de, bunnan keyingi seriallıq belgilewlerde simvollarıń aldındaǵı bas kvant sanları 1, 2 h.t.b. mánisleri shártli xarakterge iye. Tek geliy hám oǵan usaǵan ionler ushın eń tómengi $^1S_0$ termi $1s1s$ elektronlıq konfiguraciyasına sáykes keledi.

Úshlik $^3G_2$ qáddiden úshlik $^3P_1$ qáddige ótkende payda bolatuǵın birinshi qosımsha seriyanın sızıqları altı qurawshıdan turadı.



341-súwret. Geliydiń qáddileriniń sxeması.

Solay etip, tripletlik termlderdiń arasında ótiwlerde payda bolatuǵın seriyalarda tallaw tek bas hám ekinshi qosımsha seriyalar ushın sızıqlardıń sırtqı túri "tripletlik spektr" atamasın aqlaydı, basqa seriyalardıń sızıqları altı sızıqtan turatuǵın quramalı gruppalarǵı payda etedi. Tek termder ǵana tripletlik bolıp tabıladı.

341-súwrette geliydiń qáddileriniń hám ayırım spektrallıq sızıqlardıń payda bolıw sxeması kórsetilgen. Geliyde tripletlik sızıqlardıń ajırılıwı júdá kishi.

Geliydiń eń tereń halı $1s1s\ ^1S_0$ jeke-jalǵız halı bolıp tabıladı. Geliy atomı qozbaǵan halda (normal halda) usı halda jaylasadı.

$1s2s\ ^3S_1$ halı kelesi hal bolıp tabıladı. Oǵan ádewir joqarıda jaylasqan qáddi sáykes keledi. Geliy atomın $1s1s\ ^1S_0$ haldan $1s2s\ ^3S_1$ halına ótkeriw ushın 19,77 eV jumıs islew kerek. XXIII keste boyınsha $1s1s\ ^3S_1$ halınıń júzege keliwi múmkin bolsa da, bul hal júzege kelmeydi. Biz tómende bul jaǵdaydıń atomlardıń teoriyası ushın úlken áhmiyetke iye ekenligin kóremiz.

Tripletlik hám jeke-jalǵız qáddilerdiń arasındaǵı ótiwler baqlanbaydı. Solay etip, geliy atomınıń $1s2s\ ^3S_1$ halınan qanday da bir tereńirek halǵa ótiwiniń ózinen-ózi júriwi múmkin emes. Tereńirek halǵa ótiw bolmaytuǵın haldı *metastabillik* hal dep ataydı.

341-súwrette geliydiń jáne bir metastabillik halǵa iye bolatuǵınlıǵı kórinip tur. Atap aytqanda bul hal $1s2s\ ^3S_0$ halı bolıp tabıladı. Bul haldan normal halǵa ótiw L kvant sanı ushın arnalǵan saylap alıw qaǵıydası boyınsha qadaǵan etilgen. Bul ekinshi metastabillik halǵa 20,55 V shamasındaǵı qozdırıw potentsialı sáykes keledi. Atomdı metastabillik haldan shıǵarıwǵa boladı. Onıń ushın onı qanday da bir sırtqı tásirde, misalı elektron menen soqqılawdıń nátiyjesinde, joqarıdaǵı metastabillik emes hallardıń birine ótkeriw kerek. Usınıń menen birge, atom normal halǵa basqa atom menen soqlıǵısıwdıń nátiyjesinde oǵan qozdırıw energiyasın tikkeley beriwdiń saldardan ótiwi múmkin. Bir atomnan ekinshi atomǵa energiyanıń tikkeley ótiwi orın alatuǵın usınday soqlıǵısıwlarǵı *ekinshi áwlad urılıwları* dep ataladı.

Geliydegi normal qáddiniń júdá tómende jaylasatuǵınlıǵın onıń $1s1s\ ^3S_0 - 1s2s\ ^3P_1$ rezonanslıq sızıǵınıń alıstaǵı ultrafiolet oblastta jatatuǵınlıǵın túsindiridi; onıń tolqın uzınlıǵı $\lambda = 584,328\text{ \AA}$.

Geliydiń seriyalarınıń usınday alısta jatiwı onıń qısqa tolqınlarǵı úlken móldirliǵı túsindiriledi.

Geliy hám oǵan uqsas bolǵan ionlardan basqa jeke-jalǵızlar hám tripletlerdiń sxemasına siltili jer elementleriniń spektrleri, cinktiń, kadmiydiń hám olar menen uqsas bolǵan ionlar da kiredi.

§ 350. Mendeleevtiń dáwirlik sisteması. D.I.Mendeleevtiń 1869-jılı elementlerdiń ximiyalıq hám fizikalıq qásiyetlerin tereń úyreniwdiń nátiyjesinde óziniń elementler sistemasın dóretkeni belgili Eger elementlerdi atomlıq salmaǵı boyınsha jaylastırsa (úlken bolmaǵan awısıwlar menen), onda olardıń fizikalıq hám ximiyalıq qásiyetleriniń dáwirli túrde qaytalanatuǵınlıǵın kórsetti. Házirgi waqıtları biz Mendeleev kestesindegi elementlerdiń atomlıq salmaǵı boyınsha emes, al zaryadlıq sanı Z boyınsha jaylasatuǵınlıǵın bilemiz. Biraq bul eki tártip bir biri menen derlik tolıq sáykes keledi.

Mendeleev tárepinen ashılǵan dáwirlik quramalı xarakterge iye. 342-súwrette Mendeleevtiń dáwirlik sisteması ádette ximiya kursında beriletuǵınday tártipte biziń maqsetlerimiz ushın qolaylı túrde berilgen⁴¹. Bir dáwirge kiretuǵın elementler kestege bir qatarǵa jazılǵan. Bir birine uqsas bolǵan elementler sıyıqlar menen tutastırılǵan. Kórinip turǵanıday, birinshi dáwir tek eki elementke - vodorod penen geliyge, ekinshi hám úshinshi dáwirler 8 elementke, tórtinshi hám besinshi dáwirler 18 elementke hám altınshi dáwir 32 elementke iye. Sońǵı dáwirde 92-elementte - uranda tamamlanuǵınlıǵı úziletuǵınlıǵı tábiyiy. Házirgi waqıtları zaryadlıq sanları $Z = 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100$ hám 101 (381-paragrafqa qarańız) shamalarına teń jasalma túrde jáne 9 "transuran" elementleri alındı⁴².

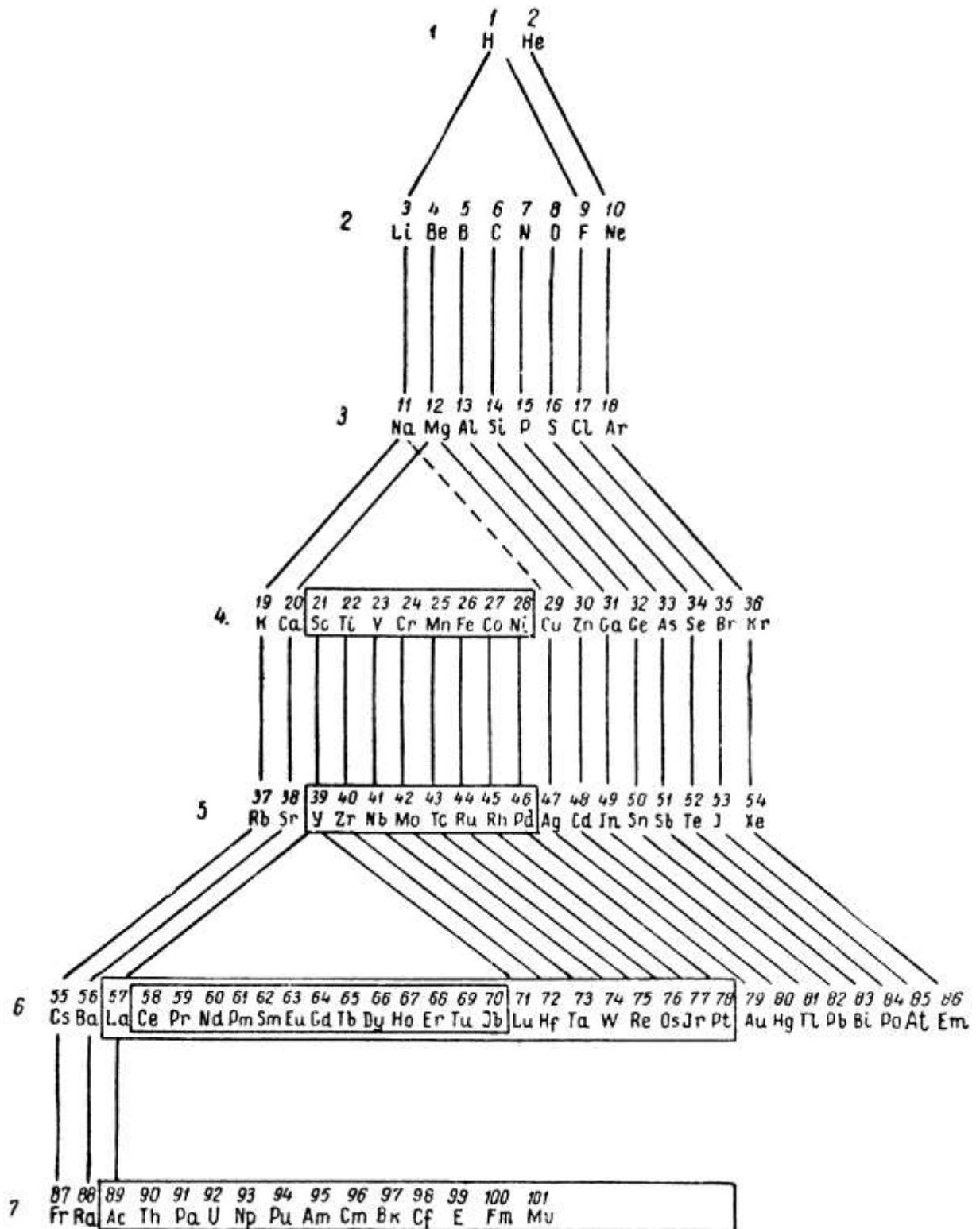
Mendeleev sistemasınıń bir baǵanasına kiretuǵın atomlardıń qásiyetleriniń uqsaslıǵı olardıń atomlıq spektrlerine de tarqatıladı. Bizler barlıq siltili metallardıń bir birine uqsas bolǵan spektrlerge iye bolatuǵınlıǵın kórsettik; barlıq siltili jer elementleriniń h.t.b. spektrleri de bir birine uqsas. Mendeleev kestesiniń hár bir dáwiri boylap qozǵalǵanda kem-kemnen quramalı bolǵan spektrler alınadı.

Bor boyınsha elementlerdiń qásiyetlerindeki dáwirlik elektronlardıń belgili bolǵan qatlamlarda yamasa qabıqlarda jaylasıwı menen túsindiriledi.

Bir qabıqtıń quramına kiretuǵın barlıq elektronlar birdey bas kvant sanına iye boladı. Mendeleev kestesiniń hár bir dáwiri elektronlar menen jańa qabıqtı toltırıw menen baslanadı. Elementlerdiń fizikalıq-ximiyalıq qásiyetleri olardıń eń sırtqı valentli elektronlarınıń sanı hám jaylasıwları boyınsha anıqlanadı. Sonlıqtan, jańa qabıqlardıń dáwirli túrdegi toltırılıwı atomlardıń qásiyetleriniń dáwirligine alıp keledi.

⁴¹ Stabilli izotoplardıǵa iye bolmaytuǵın $Z = 43, 85$ hám 87 elementleri házirgi waqıtlardaǵı ádebiyatlarda texneciy (Tc), astatin (At) hám franciy (Fr) dep ataladı. Olardıń barlıǵı Mendeleev tárepinen boljap ayıldı hám olardıń ol mınaday atamaları berdi: ekamarganec (EMn), ekaiod (EJ) hám ekaceziy (ECs).

⁴² Házirgi waqıtları (2022-jıl) 118 ximiyalıq element belgili. Olardıń eń aqırǵısı bolǵan 118-element oganeson dep ataladı. Sonlıqtan "transuran" elementlerdiń sanı 26 ǵa jetti (Awdarıwshılar).



342-сúwret. D.I.Mendeleevтіń dáwirlik sisteması.

Solay etip, Mendeleev tárepinen ashılǵan *elementlerdiń qásiyetleriniń dáwirligi atomlardıǵı elektronlardıń jaylasıwındaǵı dáwirlikti sáwlelendiredi*. Bul gipoteza optikalıq hám rentgen spektrleriniń ashılıwı menen tastıyıqlanadı.

Mendeleevтіń kestesi menen atomlardıń ishindegi elektronlardıń qatlam boyınsha tarqalıwınıń arasındaǵı baylanıstı tolıq ornatiw ushın anaw yamasa mınaw qabıqta jaylasa alatuǵın elektronlardıń maksimallıq sanın anıqlaw kerek boladı. Bul másele Pauli principini dep atalatuǵın principitiń járdeminde sheshiledi. Bul princip birinshi ret spektrallıq termlerdi tallawdıń

nátiyjesinde kelip shıqtı, al keyin kvantlıq mexanikanıń ulıwmalıq kóz-qaraslarınń tiykarında tastıyıqlandı. 349-paragrafta biz geliydegi múmkin bolǵan eki tereń $1s1s\ ^1S_0$ hám $1s1s\ ^3S_1$ hallardıń haqıyqatında tek jeke-jalgız $1s1s\ ^1S_0$ halınıń júzege keletuǵınlıǵın atap óttik. Tripletlik $1s1s\ ^3S_0$ halı júzege kelmeydi. Eki hám onnan da kóp sanlı atomlarǵa iye basqa atomlarda da formallıq jaqtan payda bolıwı múmkin hallardıń bir bólimi payda bolmaytuǵın bolıp shıqtı. Pauli, *eger atomda birdey kvant sanları menen táriyiplenetuǵın eki hám onnan da kóp sanlı elektronlardı bolmaydı dep esaplasa, onda bul fakttıń túsindiriliwiniń múmkin ekenligin kórsetti.*

349-paragrafta biz atomdaǵı elektronnıń n, l hám j kvant sanları menen táriyiplenetuǵınlıǵın atap óttik. n niń bas kvant sanı ekenligin hám onıń elektronnıń orbitalarınıń ólshemlerin (Bor modelinde ellips tárizli orbitanıń úlken yarım kósherin) anıqlaytuǵınlıǵın eske túsiremiz. $l = 0, 1, 2, \dots (n - 1)$ - elektronnıń orbitalıq momenti $\mathbf{p}_l$ di anıqlaytuǵın qosımsha kvant sanı hám $j = \left| l \pm \frac{1}{2} \right|$ - elektronnıń tolıq momenti $\mathbf{p}_j$ di anıqlaytuǵın kvant sanı. Usınıń menen birge, artıqmash baǵıtqa salıstırǵandaǵı $\mathbf{p}_j$ diń múmkin bolǵan hár qıylı orientaciýaların itibarǵa alıw kerek⁴³.

Bul orientaciýalar $\mathbf{p}_j$ momentiniń artıqmash baǵıtqa túsirilgen múmkin bolǵan proekciýaları menen anıqlanadı. Olardıń mánisi mınalardı teń:

$$p_{iz} = m_j \hbar. \quad (1)$$

Bul teńlikte $m_j = \pm j, \pm(j - 1), \dots, 0$.

Pauli principini boyınsha atomdaǵı elektronnıń xarakteristikası ushın n, l, j, m_j kvant sanlarınıń barlıq tórtewi de qabıl etiledi. Bunday jaǵdayda birotala mınaǵan iye bolamız: *atomda n, l, j, m_j kvant sanlarınıń tórtewi de birdey bolǵan bir neshe elektronlar bola almaydı.*

Eń dáslep Pauli principiniń geliydegi $1s1s\ ^1S_1$ halınıń joq ekenligin túsindiretuǵının kórsetemiz. $1s$ hám $1s$ elektronlardıń ekewi de birdey bolǵan $n_1 = n_2 = 1, l_1 = l_2 = 0, j_1 = j_2 = 1/2$ kvant sanlarına iye boladı. Demek, olar bir birinen tórtinshi m_{j1} hám m_{j2} kvant sanı boyınsha ayrılıwı kerek. Bul kvant sanlarınıń hár biri tek $\pm \frac{1}{2}$ mánislerin qabıl ete alatuǵın bolǵanlıqtan, Pauli principini boyınsha m_j diń biri $+\frac{1}{2}$, al ekinshisi $-\frac{1}{2}$ ge teń bolǵan hallardıń bolıwı múmkin. Biraq, bul jaǵdayda $\mathbf{p}_{j1}$ hám $\mathbf{p}_{j2}$ momentleriniń baǵıtları bir birine salıstırǵanda qarama-qarsı boladı hám qosındı moment $\mathbf{P}_j$ nolge teń boladı hám usınday jaǵdayǵa atomnıń $^1S_0$ halınıń jeke-jalgız bolıwı sáykes keledi ($J = 0$). $^3S_0$ halınıń payda bolıwı da múmkin emes, sebebi onıń payda bolıwı ushın $\mathbf{p}_{j1}$ hám $\mathbf{p}_{j2}$ momentleriniń baǵıtları bir birine parallel bolıwı hám $m_{j1} = m_{j2}$ teńliginiń orınlanıwı kerek, al bul jaǵday Pauli principine qayshı keledi.

Endi, Pauli principinen kelip shıqqan halda

- a) n, l, j kvant sanları
- b) n, l kvant sanları hám
- c) n kvant sanları

birdey bolǵan atomlardaǵı elektronlardıń sanların esaplaymız. Mınalardı iye bolamız:

a) (1) boyınsha m_j kvant sanı hám qıylı bolǵan $2j + 1$ mániske iye bolatuǵın bolǵanlıqtan, onda n, l, j kvant sanlarınıń birdey úshligine iye elektronlardıń maksimallıq sanı $2j + 1$ ge teń boladı;

b) berilgen l kvant sanında j kvant sanı eki $j = \left| l \pm \frac{1}{2} \right|$ mánislerine iye bolatuǵının esapqa alsaq, onda birdey bolǵan n, l kvant sanlarına iye elektronlardıń sanı (bunday elektronlardı *ekvivalent* elektronlar dep ataydı) $2(2l + 1)$ ge teń;

c) berilgen n kvant sanında l kvant sanı $0, 1, 2, \dots, (n - 1)$ mánislerine iye bolıwı múmkin, sonlıqtan birdey n kvant sanına iye bolǵan elektronlardıń eń úlken sanı Z_n mınaday summa arqalı ańǵartıladı:

⁴³ Biz "artıqmash" baǵıt haqqında gáp etkenimizde ádette sırttan túsirilgen maydannıń baǵıtın názerde tutamız (Awdarıwshılar).

$$Z_n = \sum_{l=0}^{n-1} 2(2l+1). \quad (2)$$

Eger bul summanıń birinshi aǵzası 2 ge, al eń sońǵı aǵzası $2(2n-1)$ shamasına teń arifmetikalıq progressiyanıń n aǵzasınıń summası ekenligin esapqa alsaq, onda bul summanıń mánisin ańsat esaplawǵa boladı. Bunnan mınaǵan iye bolamız:

$$Z_n = \frac{2 + 2(2n-1)}{2} n = 2n^2.$$

Solay etip, biz bas kvant sanı n ge teń bolǵan elektronlardıń sanınıń $2n^2$ shamasınan úlken bola almaytuǵınlıǵın alamız.

XXIV keste atomdaǵı birdey n kvant sanına iye bolǵan elektronlardıń múmkin bolǵan maksimalıq sını bolǵan Z_n shamasın hám olardıń l kvant sanı boyınsha tarqalıwın beredi (b punktke berilgen jaǵday).

XXIV keste.

$n \backslash l$	0	1	2	3	4	Z_n
	s	p	d	f	g	
1	2	-	-	-	-	2
2	2	6	-	-	-	8
3	2	6	10	-	-	18
4	2	6	10	14	-	32
5	2	6	10	14	18	50

XXIV kesteden bir kvantlıq qabıqtaǵı ($n = 1$) elektronlardıń maksimalıq sanınıń 2 ge, eki kvantlıq qabıqtaǵı ($n = 2$) elektronlardıń maksimalıq sanınıń 8 ge teń ekenligi; úsh kvantlı hám tórt kvantlı qabıqlarda sáykes 18 hám 32 elektronnıń jaylasa alatuǵınlıǵı kórinip tur: Mendeleev kestesiniń dáwirleri 2, 8, 18 hám 32 elementke iye. Usı jaǵdayǵa baylanıslı Mendeleev kestesinde nelikten 8 hám 18 elementlerdiń dáwirleriniń eki ret ushırasatuǵınlıǵın anıqlaw qaladı. Bul mına jaǵday menen túsindiriledi: XXIV keste qabıqtaǵı elektronlardıń múmkin bolǵan maksimalıq sanın ǵana kórsetedi, al atomdaǵı eń sońǵı elektron eń kishi energiya sáykes keletuǵın halda jaylasadı (múmkin bolǵan barlıq hallardıń ishindegi). Energiyanıń mánisi bolsa tek bas kvant sanı n niń mánisi boyınsha ǵana emes, al qosımsha kvant sanı l den de ǵárezli. Sonlıqtan qáddilerdiń energiyalıq tártibi qabıqlardaǵı múmkin bolǵan orınlardıń tártibine sáykes kelmewi múmkin. Atomlıq spektrlerdi, ásirese izoelektronlıq qatarlardıń spektrlerin úyreniw elektronlıq qabıqlardıń qurılısın mayda-shúydesine shekem qaldırmay ayqınlastırıwǵa hám usınday jollar menen Mendeleevtiń dáwirlik nızamınıń fizikalıq mánisin birotala túsiniwge múmkinshilik beredi.

§ 351. Elektronlıq qabıqlardıń toltırılıwı. Mendeleev kestesiniń birinshi dáwirinde tek eki element bar (H, He). Bul bir kvantlıq qabıqtaǵı elektronlardıń múmkin bolǵan sanına sáykes keledi. Litiyden baslap ekinshi dáwir júredi. Eki kvantlıq qabıqtıń elektronlar menen tolıw barısın qadaǵalaw ushın litiydiń hám oǵan uqsas bolǵan ionlardı qaraymız. Litiydiń spektriniń ápiwayı xarakterı onıń úsh elektronınıń ekewi yadroǵa jaqın jaylasadı, al úshinshi elektron bolsa alısraq bolǵan orbitada qozǵaladı hám bul orbita bas kvant sanı n niń úlken mánisine sáykes keledi dep esaplawǵa májbúrleydi. Bunday jaǵdayda "ishki" elektronnıń ekewi de $n = 1$, al úshinshisi normal halda $n = 2$ shamasına teń bas kvant sanına iye boladı. Li I, Be II, B II, C IV, ... spektrlerin úyreniw bul boljawdı tastıyıqlaydı. Be II, B II, C IV ionlarınıń spektrleri Li I diń spektrine salıstırǵanda olardıń yadrolarınıń zaryadınıń úlken bolıwınıń sebebinen ultrafiolet oblastqa qaray jılıǵan. Olardıń litiydiń spektri menen tolıq uqsaslıǵı usı ionlardıń hár biriniń barlıq úsh elektronlarınıń neytral bolǵan litiy atomındaǵı elektronlarday bolıp jaylasqanlıǵın kórsetedi.

Vodorod hám oǵan uqsas bolǵan ionlar ushın tolqın sanlarında arıǵartılǵan termiler mınaday túrge iye boladı:

$$T = \frac{RZ^2}{n^2}. \quad (1)$$

Bul teńlikte Z - zaryadlıq san.

Siltili metallarda biz sırtqı elektronnıń orbitasınıń alǵan tásinin bas kvant sanı n niń ornına effektivlik kvant sanı n^* di kirgiziw jolı menen esapqa aldıq. Sonlıqtan, Li I diń hám oǵan uqsas bolǵan Be II, B III, C IV, ... lerdiń termileri mınaday formulanıń járdeminde beriliwi kerek:

$$T = \frac{R(Z - 2)^2}{n^{*2}}. \quad (1a)$$

(Li de $Z = 3$, sonlıqtan (1a) formula 347-paragraftaǵı (1)-formulaǵa sáykes keledi).

Biraq (1)-formulaǵa anıǵıraq fizikalıq mániske iye bolǵan basqa dúzetiwdi kirgiziw jolı menen basqasharaq jol menen de júriwge boladı. Atap aytqanda, elektron yadronıń basqa elektronlar tárepinen maystırılǵan maydanında qozǵalatuǵın bolǵanlıqtan, dúzetiwdi yadronıń zaryadına kirgiziw kerek. Bunday jaǵdayda onıń haqıyqıy $+Ze$ zaryadınıń ornına

$$Z_{eff}e = +(Z - a)e$$

effektivlik zaryadın kirgiziw kerek boladı. Bul teńlikte a arqalı ekranlaw shaması degen atamaǵa iye bazı bir dúzetiw belgilengen. Bunday jaǵdayda termiler mınaday túrge iye boladı:

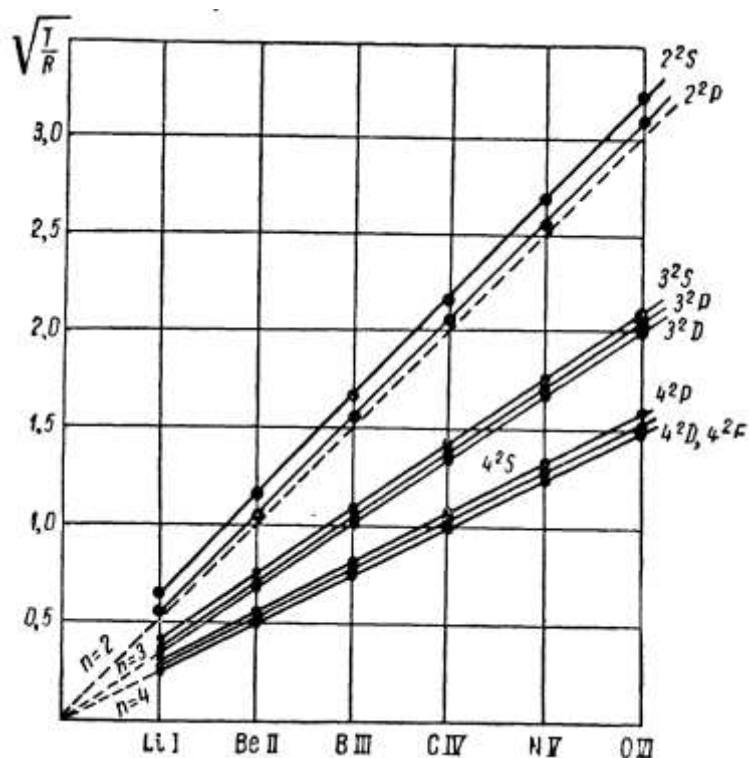
$$T = \frac{R}{n^2} (Z - a)^2. \quad (2)$$

Bul teńliktegi n - haqıyqıy kvant sanı. Izoelektronlıq qatarlardıń termilerin salıstırıw izoelektronlıq qatardıń termileri ushın a shamasınıń shama menen turaqlı bolıp qalatuǵınlıǵın kórsetedi.

(2)-qatnasqa 343-paragraftaǵı Mozli formulasına uqsas bolǵan mınaday túrdi beriwge boladı:

$$\sqrt{\frac{T}{R}} = \frac{1}{n} (Z - a). \quad (3)$$

Termilerdiń san mánisiniń kvadrat túbiri zaryadlıq san Z ten sıızıqlı ǵárezli. $\sqrt{T/R}$ diń Z ten grafikalıq ǵárezligin qursaq, onda qıyalıǵın bas kvant sanı n niń mánisinen ǵárezli bolǵan tuwrını alamız. Bul grafikte usı tuwrınıń ordinata kósheri menen kesilisiw noqatı ekranlawdıń shaması a nı beredi. Solay etip, (3)-qatnas bas kvant sanı n niń mánisin tikkeley anıqlawǵa múmkinshilik beredi.



343-súwret. Izoelektronlıq Li I, Be II, B III, ... qatarı ushın Mozli grafikleri.

343-súwrette izoelektronlıq Li I, Be II, B III, ... qatarınıń S-, P-, D- hám F- termleri ushın $\sqrt{T/R}$ shamasınıń Z ten ġárezligi berilgen. Punktir sızıqlar vodorodlıq

$$\sqrt{\frac{T}{R}} = \frac{Z}{2}, \quad \sqrt{\frac{T}{R}} = \frac{Z}{3}$$

hám

$$\sqrt{\frac{T}{R}} = \frac{Z}{4}$$

termlerge tiyisli.

Kórinip turǵanıday, termlerdiń úsh gruppasınıń barlıǵı ushın Z ten ġárezlik tuwrı sızıq penen ańǵartıladı, bunnan biz a dúzetiwininń turaqlı bolatuǵınlıǵın kóremiz. Birinshi gruppanıń S hám P termlerine tiyisli bolǵan tuwrılar $\sqrt{T/R} = Z/2$ tuwrısına, ekinshi gruppanıń D termine sáykes keletuǵın tuwrı $\sqrt{T/R} = Z/3$ tuwrısına, al úshinshi gruppanıń F termine sáykes keletuǵın tuwrı $\sqrt{T/R} = Z/4$ tuwrısına parallel. Bunnan minaday jaǵdayǵa tikkeley iye bolamız: litiydiń hám oǵan uqsas bolǵan ionlardıń eń tereńdegi S hám P hallarınıń bas kvant sanları $n = 2$ ge teń; eń tereń D halınıń bas kvant sanı $n = 3$, al eń tereń F halı ushın $n = 4$. Bunnan geliy atomlarındaǵı valentli elektron ushın múmkin bolǵan hallar 2s, 2p, 3s, 3p, 3d h.t.b. hallar bolıp tabıladı. 2s halǵa eń tereńde jaylasqan qáddi sáykes keledi; normal valentli elektron usı qáddide jaylasadı. Solay etip, litiyden baslap eki kvantlı qabıqtıń toltırılıwı baslanatuǵınlıǵı tikkeley tastıyıqlanadı hám usınıń menen birge Mendeleev kestesindegi jańa dáwir baslanadı.

Litiyden keyingi elementlerdiń spektrlerin tallaw olarda eki kvantlıq qabıqtıń teń ólshewli toltırılıwınıń baslanatuǵınlıǵın kórsetedi. Bul toltırılıw neonda tamam boladı ($Z = 10$). Eki kvantlıq qabıqta orın qalmaydı - bul qabıq jabıq qabıqqa aylanadı dep aytadı. Neonniń eki kvantlıq qabıǵınıń jabıq ekenligi onıń ximiyalıq jaqtan aktiv emes hám onıń bir kvantlıq qabıǵı tolǵan geliy menen uqsaslıǵın túsindiredi.

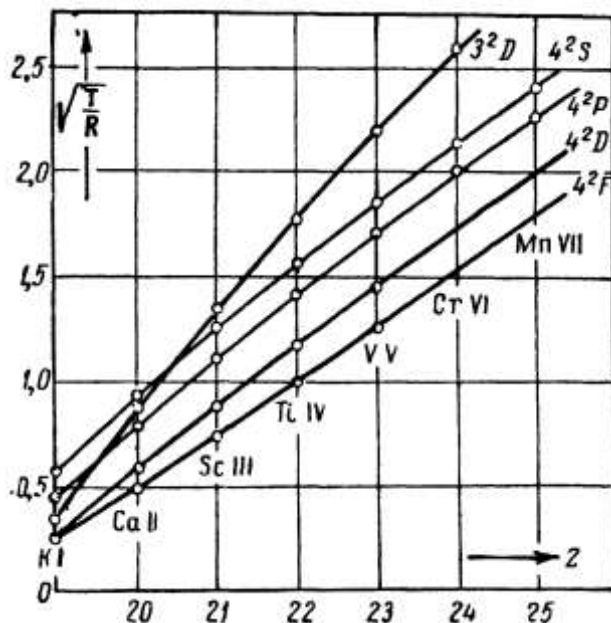
Natriydiń on birinshi elektronı eki kvantlıq qabıqta orın tappaydı hám úsh kvantlıq qabıqtı toltıra baslaydı. Usınıń nátiyjesinde natriydan baslap Mendeleev kestesiniń jańa (úshinshi) dáwiri baslanadı. Natriyde jabıq qabıqtıń sırtında bir valentlik elektronnıń bolıwı onıń fizikalıq hám ximiyalıq qásiyetleriniń litiydiń qásiyetleri menen uqsaslıǵın támiyinleydi. Natriydiń valentli elektronlarınıń úsh kvantlı qabıqta jaylasıwı natriy hám oǵan usaǵan ionlardıń (Mg II, Al III h.t.b.) eń tereń bolǵan S-, R-, D-termleri ushın Mozlidiń grafiklerin úyreniwde tastıyıqlanadı. Bul termлерge sáykes keletuǵın tuwrılar $\sqrt{T/R} = Z/3$ tuwrısına parallel, bunnan usı termлерdiń barlıǵınıń haqıyqatında da bas kvant sanınıń $n = 3$ mánisine sáykes keletuǵınlıǵı kelip shıǵadı.

Natriyden keyingi elementlerde úsh kvantlı qabıqtıń s hám p hallarınıń izbe-iz toltırılıwı baslanadı. Argonda ($Z = 18$) segiz úsh kvantlı elektron simmetriyalı gruppanı payda etedi hám onıń fizikalıq hám ximiyalıq qásiyetleri boyınsha neon menen uqsaslıǵın támiyinleydi. Usınıń menen elementlerdiń úshinshi dáwiri ayrılıp turadı (Na den Ar ǵa shekem). Bul jaǵdayda ol ekinshi dáwir sıyaqlı segiz elementke iye. On toǵızınshi element (kaliy) siltili metallarǵa uqsas hám ol tórtinshi dáwirdi baslaydı.

Biraq, argon atomındaǵı segiz elektron úsh kvantlı qabıqtıń múmkin bolǵan barlıq orınların toltırmaydı. Sebebi, bul qabıqta XXIV kesteде keltirilgen maǵlıwmatlarǵa sáykes 18 elektronnıń jaylasıwı múmkin. Argonda úsh kvantlı qabıqta 3d-elektronlardıń 10 danası ushın orın qaladı. Usınday jaǵdayǵa qaramastan, kaliydegi 19-elektron onıń spektri menen oǵan uqsas bolǵan ionlardıń spektrleri boyınsha normal túrde 3d halında jaylaspaydı. Bul jerдеgi elektronlar menen toltırılıw tártibi XXIV keste tárepinen anıqlanatuǵın tártipke birinshi ret sáykes kelmeydi. 4s orbitası (kúshli sozılǵan sińetuǵın ellips) 3d (dóngelek) orbitasına qaraǵanda kóbirek táсіrlengen hám energiyası boyınsha tereńirek boladı. Usınıń nátiyjesinde kaliydiń 19-elektronı 4s halda normal (tiykarǵı) halda turadı. Bul kaliy menen natriydiń hám Mendeleev kestesiniń jańa tórtinshi dáwiriniń uqsaslıǵın támiyinleydi.

Biraq, kaliydegi úsh kvantlıq qabıqtıń jabıq bolmawı bunnan keyingi elementlerdegi jaǵdaylarǵa táсіr etedi. 344-súwrette izoelektronlıq K I, Ca II, Sc III, Ti IV, ... qatarı ushın $4s^2S$, $4p^2P$, $3d^2D$, $4d^2D$ hám $4f^2F$ termleri ushın Mozli grafikleri keltirilgen. Kórinip turǵanıday, $3d^2D$ termine sáykes keletuǵın tuwrı $4s^2S$ tuwrısın kesip ótedi. Bunnan K I menen Ca II diń eń tereń normal termininiń $4s^2S$ termi ekenligi, al Sc III ushın $3d^2D$ termi ekenligi kelip shıǵadı. Bunnan óz gezeginde Sc III tiń 19-elektronınıń normal jaǵdayda 4s halda emes, al kaliydegi sıyaqlı 3d halda jaylasadı. Tap usınday jollar menen, kelesi ionda (Ti IV) tek 19-elektron ǵana emes, al 20-elektronnıń da 3d halda turatuǵınlıǵın tabıwǵa boladı. Kaliy tárepinen buzılǵan qabıqlardıń tolıw tártibi bul jerde qaytadan tiklenedi.

XXIV kesteniń maǵlıwmatları boyınsha 3d hallardı toltırıw ushın 10 elektron talap etiledi. Usı 3d hallardıń barlıǵı birinshi ret mista toltırılǵan; usınıń menen birge mista barlıq úsh kvantlıq qabıq jabıq bolıp tabıladı; mistıń 29- elektronı 4s halda turadı hám bul jaǵday onıń siltili metallar menen uqsaslıǵın payda etedi. Solay etip, tek mistan baslap tórt kvantlıq qabıqtıń "normal" túrдеgi toltırılıwı baslanadı. Úsh kvantlıq qabıq toltırılatsuǵın skandiyden nikelge shekemgi segiz element Mendeleevtiń dáwirlik sistemasında ramka menen ayırıp kórsetilgen ayırıqsha gruppanı payda etedi (342-súwret). Bunnan keyin mistan kriptonǵa shekem 4s- penen 4p-hallardıń "normal" túrдеgi toltırılıwı júredi. Tórt kvantlı qabıqta segiz elektronı bar kripton eń joqarı elektronlıq qabıǵında segiz elektronǵa iye bolǵan Ne menen Ar ǵa uqsas. Usınıń saldarınan kripton menen barlıǵı bolıp 18 elementke iye (K den Kr ǵa shekemgi) tórtinshi dáwir tamam boladı.



344-súwret.
Izoelektronlıq K I, Ca II, Sc III, ... qatarı ushın
Mozli grafigi.

Kriptonnan keyingi 37-elementten (rubidiyden) baslap tórt kvantlı qabıqta ele 24 orın "bos" bolıp qalatuǵın bolsa da (4d-hallarda 10 orın hám 4f-hallardı 14 orın), bes kvantlı qabıqtıń toltırılıwı baslanadı. Bul jaǵdayda da, kaliyde orın alǵan jaǵdaydaǵıday, kúshli sozılǵan 5s orbitaǵa sáykes keletuǵın hal toltırılmaǵan tórt kvantlı hallardan tereńde jaylasadı. Tórt kvantlı qabıqtı aqırına shekem toltırıw ittriyden ($Z = 39$) baslanadı, usı ittriyden keyin qaytadan d-hallar toltırılatuǵın elementlerdiń gruppası júredi. 4f-hallar 58-elementke (ceriy) shekem toltırılmaǵan bolıp qaladı. Ceriyden baslap usı qabıq toltırılısı baslaydı. 4f-qabıqtıń toltırılıwı óziniń ishine siyrek jer elementleri dep atalatuǵın 14 elementti óziniń ishine aladı. Siyrek jer elementleri ózleriniń fizikalıq-ximiyalıq qásiyetleri boyınsha bir birine júdá uqsas hám ózleriniń aldındaǵı elementlerdiń arasında olarǵa uqsas bolǵan elementler joq⁴⁴. 5f qabıǵı tolatuǵın elementlerdiń usınday gruppası toriydan ($Z = 90$) baslanadı.

⁴⁴ YAǵnıy analogları joq dep aytamız (Awdarıwshılar).

XXV кесте.

Дәйір	Z	Элемент	Қабықтар						
			K 1s	L 2s 2p	M 3s 3p 3d	N 4s 4p 4d 4f	O 5s 5p 5d 5f	P 6s 6p 6d	Q 7s
I	1	H	1						
	2	He	2						
II	3	Li	2	1					
	4-9	Be-F				2s хәм 2р қабықларының толтырылуы			
	10	Ne	2	2 6					
III	11	Na	2	2 6	1				
	12-17	Mg-Cl				3s хәм 3р қабықларының толтырылуы			
	18	Ar	2	2 6	2 6				
IV	19	K	2	2 6	2 6 -	1			
	20	Ca	2	2 6	2 6 -	2			
	21	Sc	2	2 6	2 6 1	2			
	22-28	Ti-Ni				3d қабығының толтырылуы			
	29	Cu	2	2 6	2 6 10	1			
	30-35	Zn-Br				4s хәм 4р қабықларының толтырылуы			
	36	Kr	2	2 6	2 6 10	2 6			

V	37	Rb	2	2 6	2 6 10	2 6 - -	1		
	38	Sr	2	2 6	2 6 10	2 6 - -	2		
	39	Y	2	2 6	2 6 10	2 6 1 -	2		
	40-46	Zr-Pd				4d қабығының толтырылуы			
VI	47	Ag	2	2 6	2 6 10	2 6 10 -	1		
	48-53	Cd-J				5s хәм 5p қабықтарының толтырылуы			
	54	Xe	2	2 6	2 6 10	2 6 10 -	2 6		
	55	Cs	2	2 6	2 6 10	2 6 10 -	2 6 - -	1	
	56	Ba	2	2 6	2 6 10	2 6 10 -	2 6 - -	2	
	57	La	2	2 6	2 6 10	2 6 10 -	2 6 1 -	2	
	58	Ce	2	2 6	2 6 10	2 6 10 1	2 6 1 -	2	
	59-71	Pr-Lu				4f қабығының толтырылуы			
	72	Hf	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 2 -	2	
	73-78	Ta-Pt				5d қабығының толтырылуы			
	79	Au	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 10 -	1	
	80-85	Hg-At				6s хәм 6p қабықтарының толтырылуы			
	86	Em	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 10 -	2 6	1
VII	87	Fr	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 10 -	2 6 -	2
	88	Ra	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 10 -	2 6 -	2
	89	Ac	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 10 -	2 6 1	2
	90	Th	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 10 1	2 6 1	2
	91-	Pa-	2	2 6		5f қабығының толтырылуы			

XXV kestele elektronlar menen qabıqlardı toltırıwdıń sxeması berilgen. Bul sxema Mendeleevtiń sistemasınıń dáwirleri menen salıstırılǵan. Bul XXV kestenen hár bir dáwirde (birinshisinen basqa) bir valentli elektrónı bar siltili metaldan baslanatuǵınlıǵı hám jabıq qabıqtı payda etetuǵın segiz valentli elektrónı bar inert gaz benen tamamlanatuǵınlıǵı kórinip tur. s- hám p-hallar normal túrde tolatuǵın ekinshi hám úshinshi dáwirlerde hár qaysısı, usıǵan sıykes 8 elementke iye boladı. d-qabıǵı tolatuǵın elementlerde gruppası dawam etetuǵın tórtinshi hám besinshi dáwirlerde hár qaysısı 18 elementke iye. Eń aqırında, eń sońǵı toǵan dáwir - altınshi dáwir f-qabıǵı kem-kemnen toltırılatuǵın 32 elementke iye. Solay etip, Mendeleev tárepinen ashılǵan quramalı dáwirlik belgili bolǵan kvant sanları menen táriyiplenetuǵın elektronlardıń gruppalar boyınsha jaylasıwları boyınsha túsindiriledi.

§ 352. Rentgen spektrleri. Rentgen spektrleriniń eki túri bar: tutas hám sıızıqlı. Tutas spektr elektronlar tárepinen olardıń antikatodqa kelip urılıwınıń saldarınan tormozlanıwınıń saldarınan nurlanadı (332-paragraf). Sıızıqlı spektr bolsa optikalıq sıızıqlı spektrler sıyaqlı ayırım keskin túrdegi spektrallıq sıızıqlardan turadı. Tutas spektrde xarakterli antikatodtıń materialınan ǵárezli emes. Sıızıqlı spektrlerde strukturası antikatodtıń materialınan ǵárezli. *Hár bir element ózine tán bolǵan sıızıqlı rentgen spektrge iye boladı.* Sıızıqlı rentgen spektrleri bılayınsha payda boladı: dásteniń elektronlarınıń ayırımları urılıwdıń saldarınan antikatodtıń atomlarına energiyasın beredi. Antikatodtıń qozǵan atomları normal halǵa qaytqanda jıyılıǵı $\nu = \frac{W_2 - W_1}{h}$ shamasına teń nurdı shıǵaradı. Bul teńlikte W_2 - qozǵan atomnıń, al W_1 - onıń tereńdegi hallarınıń biriniń energiyası.

Rentgen nurları kishi tolqın uzınlıǵına (shama menen $1 \text{ \AA}$) hám soǵan sıykes úlken ν jıyılıkke iye boladı. Sonlıqtan rentgen sıızıqları atomlardıń bir birinen úlken ayırmaǵa iye energiyalar W ǵa iye bolǵan hallarınıń arasındaǵı ótiwlerde esabınan payda boladı. Al, awır atomlardıǵı úlken energiyaǵa ishki elektronlar iye boladı. Haqıyqatında da, barlıq ishki qabıqları jabıq bolǵan úlken zaryadlıq san Z ke iye bolǵan qanday da bir atomdı qaraymız. Ishki qabıqlardıń birinde jaylasqan qanday da bir elektrónǵa sırtqı elektronlar ázzi tásir etedi, sebebi simmetriyalı túrde jaylasıwları saldarınan ayırım elektronlardıń tásirleri bir birin kompensaciyalaydı. Sonlıqtan ishki elektronlar tiykarınan zaryadı $+Ze$ bolǵan yadronıń hám yadroǵa jaqın jaylasqan elektronlardıń tásirinde boladı. Demek, olardıń energiyası mınaǵan teń boladı:

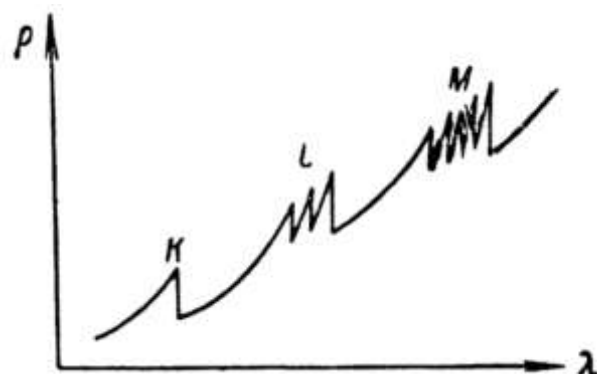
$$W = -\frac{Rhc}{n^2}(Z - a)^2. \quad (1)$$

Bul formulada n - bas kvant sanı (eń ishki elektronlar ushın $n = 1$), al a bolsa tereńirekte jaylasqan elektronlardıń hám basqa elektronlardıń tásiriniń bolıwı menen baylanıslı bolǵan dúzetiw, onıń shaması Z ten kishi. Awar atomlar ushın Z úlken hám energiya W san mánisi boyınsha úlken. Qońsıl hallardıń energiyalarınń arasındaǵı ayırma da úlken, usınıń nátiyjesinde spektrallıq sıızıqlar úlken jıyılıqlarǵa, yaǵnıy kishi tolqın uzınlıqlarına iye bolıwı kerek. Bunnan rentgen spektrleri atomlardıǵı eń tereńde jaylasqan ishki elektronlardıń ótiwleriniń saldarınan payda boladı dep boljaw kelip shıǵadı.

Biraq rentgen hám optikalıq spektrlerde shıǵarıw mexanizmleriniń arasında úlken ayırma bar. Bul ayırma awır atomlardıń ishki qabıqlarınıń toǵan ekenligi menen baylanıslı. Optikalıq spektrde qozdırıw ushın sırtqı elektrón óziniń normal halınan qońsı qozǵan hallardıń birine ótkeriledi (342-paragraftaǵı spektrlerde elektronlardıń urılıwınıń saldarınan payda etiwge qarańız). Awar atomdaǵı ishki elektrón (mısalı, bir kvantlıq haldaǵı) qońsıl qabıqqa (mısalı, eki kvantlıq) ótkeriwge bolmaydı. Sebebi ekinshi kvantlıq qabıqtaǵı orınlar basqa elektronlar menen iyelengen. Ishki elektrón eń sırtqı hallardıń birine shıǵarıw yamasa onı atomnıń shekleriniń sırtına pútkilley shıǵarıp taslaw múmkin. Ádette usı jaǵday júzege keledi. Nátiyjede rentgen spektriniń shıǵarıw processı mınadan ibarat: intensivli sırtqı tásirde (mısalı, sırtqı úlken tezlikke iye bolǵan elektrón kelip urılǵanda) ishki elektronlardıń biri atomnıń sheklerinden sırtqa shıǵarıladı - atom ionǵa aylanadı. Payda bolǵan ionda ishki qabıqlardıń birinde bos orın payda boladı. Bul

bos orın qorńılas qabıqlardıń birindegi elektron menen toltırılıwı múmkin. Usınday jollar menen qorńılas ishki qabıqlardıń arasındaǵı ótiwler júzege keledi, al bul ótiwler rentgen nurlarınıń shıǵarılıwına alıp keledi.

345-súwret.
Rentgen jutılıw spektri.



Bul boljawdıń durıs ekenligi bir qatar faktler menen, eń birinshi bolıp jutılıw rentgen spektrleriniń strukturası menen tastıyqlanadı. Bir atomlı puwlar menen gazler beretuǵın optikalıq spektrler biz qarap atırǵan elementtiń bas seriyasınıń shıǵarıw sızıqlarına sáykes keletuǵın ayırım sızıqlardan turadı. Olar túsiwshi jaqtılıqtıń tásirinde valentli elektronnıń normal haldan qozǵan hallardıń birewine ótiwiniń nátiyjesinde payda boladı. Jutılıw rentgen spektrleri shıǵarıw rentgen spektrlerine usamaydı. Olar keskin túrdegi kóriniske iye uzın tolqınlı bir neshe jolaqtan turadı. 345-súwrette ordinata kósherine rentgen nurlarınıń jutılıw koefficienti, al abscissa kósherine - tolqın uzınlıqları qoyılǵan. Kórinip turǵanıday, bir neshe jutılıw jolaqları bar. Bul jolaqlardı $K, L, M, N, \dots$ arqalı belgilew qabıl etilgen K jolaǵı ápiwayı, qalǵan jolaqlar tábiyatı paraǵraftıń aqırında qaralatuǵın strukturaǵa iye (mayda shrift penen jazılǵan tekstke qarańız). Rentgen jutılıw jolaqları optikalıq spektrlerdegi bas seriyanıń shekleriniń sırtındaǵı tutas jutılıw oblaslarına uqsas. Hár bir jolaq fotoionizaciya processine, yaǵnıy nurdıń tásirinde atomnıń ishki qabıqlarınıń birinen elektrondı julıp alıwǵa sáykes keledi. K jolaǵı elektrondı eń tereń bir kvantlıq qabıqtan julıp alıwdıń nátiyjesinde payda boladı, sonlıqtan oǵan eń úlken jiyilik (eń kishi tolqın uzınlıǵı) sáykes keledi L jolaǵı elektrondı eki kvantlıq qabıqtan h.t.b. julıp alıwda payda boladı. Hár bir jolaqtıń keskin sheti fotoionizaciya processiniń baslanıwına, yaǵnıy elektrondı oǵan qosımsha kinetikalıq energiyanı bermey-aq berilgen qabıqtan julıp alıw ushın kerek bolǵan ν jiyiligine sáykes keledi. Qalǵan jutılıw oblastları (úlken jiyilikler menen) elektrondı oǵan kinetikalıq energiyanı qosıw jolı menen julıp alıwǵa sáykes keledi.

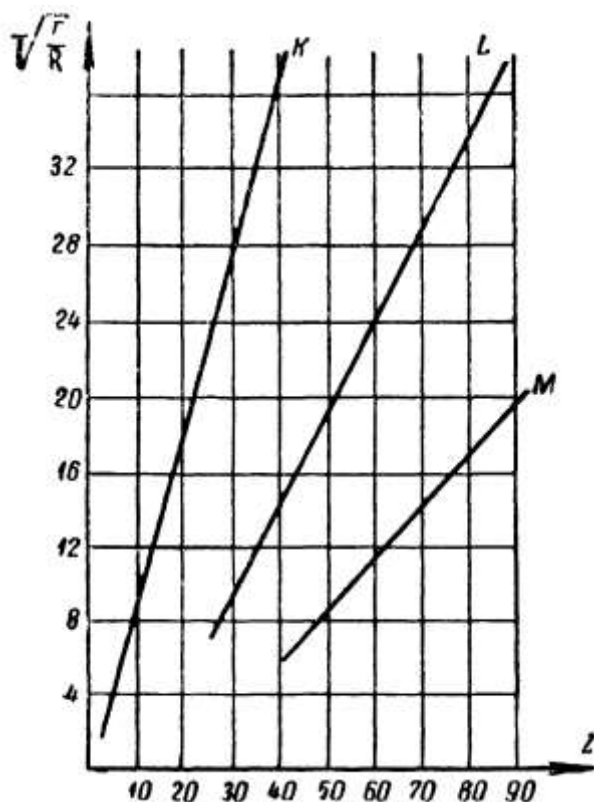
Endi shıǵarıw rentgen spektrin qaraymız. Elektronlardıń energiyası ushın jazılǵan (1)-ańlatpanı paydalınıp, elektronnıń ishki qabıqlardıń birinen ekinshisine ótkende jiyiligi (tolqınlıq sanlarda ańǵartılǵan)

$$\nu = \frac{W_2}{hc} - \frac{W_1}{hc} = \frac{R}{n_1^2} (Z - a_1)^2 - \frac{R}{n_2^2} (Z - a_2)^2 \quad (2)$$

shamasına teń bolǵan sızıqtıń shıǵarılıwı kerek

Rentgenoskopiyada minaday belgilewler qabıl etilgen: $n = 1$ ge sáykes keletuǵın termlerdi K -termler, $n = 2$ ge sáykes keletuǵın termlerdi L -termler, $n = 3$ ge sáykes keletuǵın termlerdi M -termler h.t.b. K qáddine joqarı qáddilerden ótiwlerde payda bolatuǵın sızıqlardıń seriyasın K -seriyası, al onıń eń basındaǵı sızıqtı K_α arqalı ańlatıladı. L - qáddige ótiwdiń saldarınan payda bolatuǵın seriyanı L -seriya h.t.b. dep ataydı. $K, L, M, N, \dots$ háripleri menen atomlardıń elektronlıq qabıqların belgileydi: K háripiniń járdeminde bir kvantlıq qabıq, L háripiniń járdeminde eki kvantlıq qabıq h.t.b. belgilenedi. Barlıq awır atomlardıń ishki qabıqları elektronlar menen birdey toltırılǵan bolǵanlıqtan, (1)-formuladaǵı a dúzetiwi barlıq elementler ushın birdey. Bunnan, (2)-qatnastan *barlıq awır atomlardıń bir birine júdá uqsas bolǵan rentgen spektrlerine iye*

bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Tek atomlıq salmaqtırn úlkeyiwi menen Z tiń úlkeyiwne baylanıslı spektr úlken jıyılıklar oblastına qaray jılısadı. Elementlerdiń jeńil elementlerge salıstırǵandaǵı quramalasıwı tek joqarıraqtaǵı qáddilerdiń payda bolıwı menen baylanıslı. XXV kestege sáykes M -qabıq ($n = 3$) mista ($Z = 29$), al N -qabıq ($n = 3$) lyuteciye ($Z = 71$) birinshi ret jabılıadı.



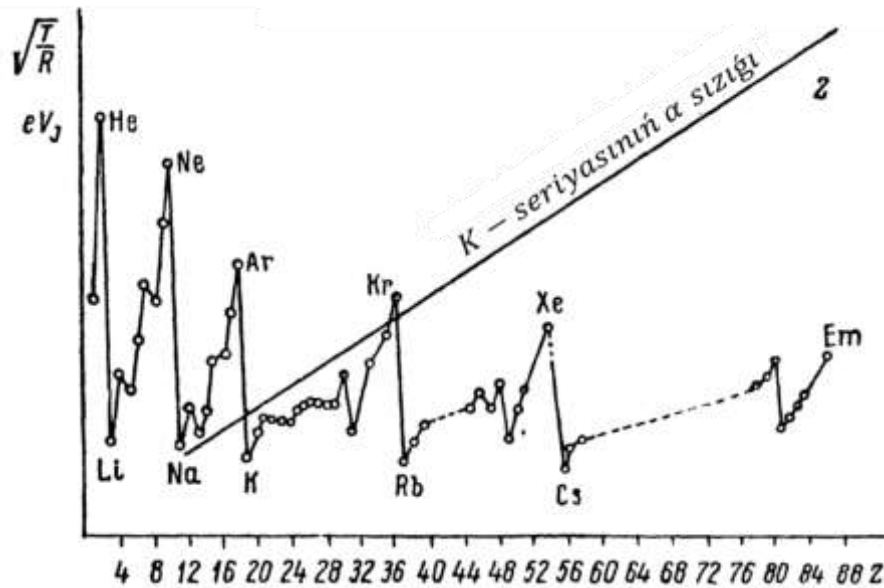
346-súwret.
Rentgen termleri ushın Mozli grafikleri.

Rentgen spektrleriniń termlierin (1)-formula boyınsha bılaysınsha jasa alamız:

$$T(n) = \frac{R(Z - a)^2}{n^2}.$$

a dúzetiwi is júzinde Z ten ǵárezsiz bolǵanlıqtan, rentgen termleri ushın Mozli nızamı orınlanadı: yaǵnıy *retgen termleriniń kvadrat túbiri zaryadlıq san Z ten sıızqlı baylanısqa*n. Tariyxıy (3)-Mozli nızamı birinshi ret rentgen termleri ushın tabıldı. Vakuum-spektroskopiyanıń rawajlanıwı menen bir qatar izoelektronlıq qatardıń spektrleri izertlengenнен keyin onı optikalıq termler ushın tarqatıwdıń sáti tústi.

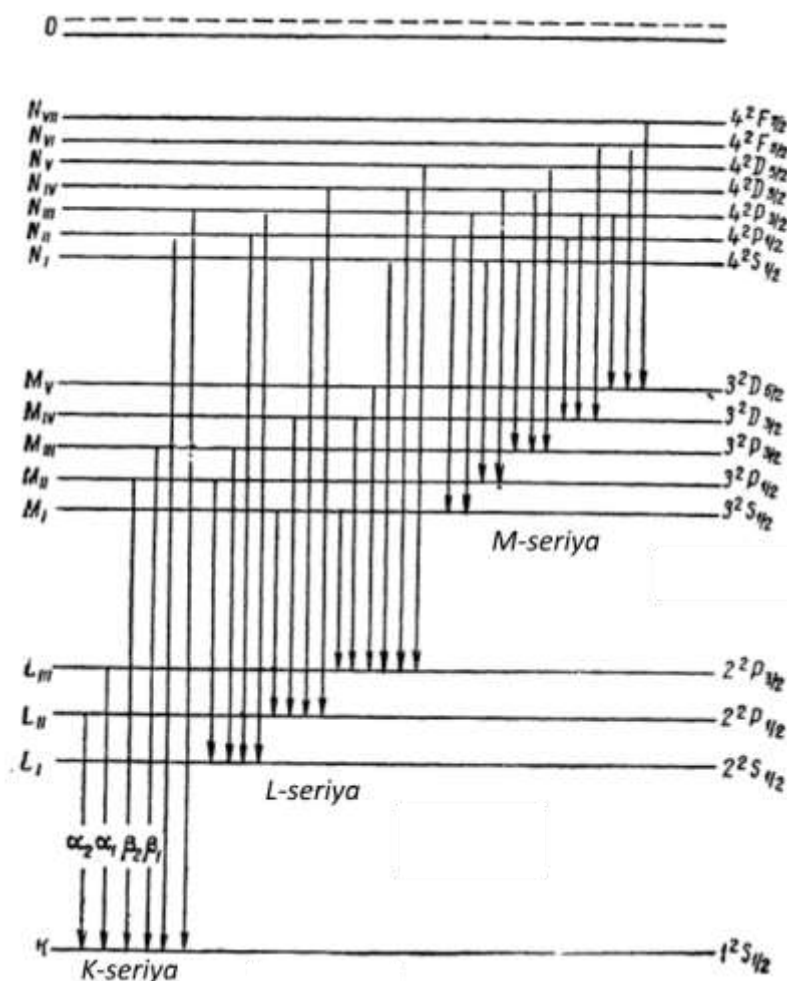
346-súwrette abscissa kósherine zaryadlıq san Z , al orbita kósherine $\sqrt{T/R}$ shaması qoyılǵan. Grafikler K -, L - hám M - termleri ushın berilgen; awır elementler ushın olardıń barlıǵı úlken dállikte tuwrı sıızqlar bolıp tabıladı. Tuwrıǵa sáykes kelmew jaǵdaydı sáykes qabıqlar ele toltırılmaǵan jańıl atomlarda orın aladı. K - termleri ushın a dúzetiwiń shaması 1 ge, al L -termler ushın 8 ge jaqın. Mozli tuwrıları Mendeleev kestesindegi dáwirliktiń izlerine iye emes. Bul jaǵday barlıq atomlardıń ishki elektronlarınıń birdey qabıqlardı payda etetuǵının hám fizikalıq qásiyetlerdiń dáwirliginiń sırtqı elektronlar menen baylanıslı ekenligin jáne bir ret dálilleydi. Bul jaǵdaydı illyustraciyalaw ushın 347-súwrette eki grafikti salıstıramız; 1-grafik atomlardıń ionizaciyalıq potencıalların, yaǵnıy eń sırtqı elektrondı atomnan julıp alıw ushın kerek bolǵan jumıstı hám 2-grafik K - termleri ushın (3)- Mozli nızamın beredi. Olardıń birinshisi Mendeleev kestesiniń dáwiriniń tamamlanǵan orınlarında ótkir maksimumlardı beredi (inert gazler), ekinshisi Z tiń mánisleriniń barlıq oblastı ushın tuwrını beredi.



347-súwret. K -termleri ushın ionizaciyalıq potenciallar (1) menen $\sqrt{T/R}$ shamaların zaryadlıq san Z ten ġárezliklerin salıstırıw.

Bizler 349-paragrafta tallağan vektorlıq sxema rentgen spektrleriniń strukturasını tabıwǵa múmkinshilik beredi. Hár bir rentgen termi bir elektron shıǵarılǵan qabıqtır halına sáykes keledi. Vektorlıq sxema jabıq qabıqtan bir elektrondı shıǵarǵanda payda bola alatuǵın hár qıylı energiyalıq hallardıń sanın tabıwǵa múmkinshilik beredi. Jabıq qabıq ondaǵı qosındı $\mathbf{P}_L$, $\mathbf{P}_S$ hám $\mathbf{P}_J$ momentleriniń nolge teń bolıwı menen táriyiplenedi. Eger jabıq qabıqtan momentleri $\mathbf{p}_l$, $\mathbf{p}_s$ hám $\mathbf{p}_j$ bolǵan bir elektrondı shıǵarsaq, onda qalǵan elektronlardıń konfiguraciyası $\mathbf{P}'_L$, $\mathbf{P}'_S$ hám $\mathbf{P}'_J$ momentleri menen táriyiplenedi. Olardıń san mánisleri shıǵarılǵan elektronnıń momentleri bolǵan $\mathbf{p}_l$, $\mathbf{p}_s$ hám $\mathbf{p}_j$ shamalarınıń san mánislerine sáykes keledi. Bul tek usı jaǵdayda ġana momentleri bolǵan $\mathbf{p}_l + \mathbf{P}'_L = \mathbf{P}_L$, $\mathbf{p}_s + \mathbf{P}'_S = \mathbf{P}_S$ hám $\mathbf{p}_j + \mathbf{P}'_J = \mathbf{P}_J$ momentleriniń qosındısıń nolge teń bolıw shárti orınlanadı. Bir elektrongá tiyisli bolǵan momentlerdiń jıynaǵı dubletlik termlerge sáykes keletuǵın bolǵanlıqtan, usıǵan sáykes, *rentgen termleriniń sxeması optikalıq dubletlerge sáykes keliwi kerek*.

Haqıyqatında da: bir kvantlıq qabıqtır elektronlarınıń ekewi de $1s$ elektronlar bolıp tabıladı, olar ushın $l_i = 0, s_i = 1/2$ hám $j_i = 1/2$; bul elektronlardıń qaysısınıń julıp alıńanlıǵınan ġárezsiz, qabıqtır qalǵan bólimi $L = 0, S = 1/2$, hám $J = 1/2$ kvant sanları menen táriyiplenedi. Rentgenoskopiyada bul hal K simvolı menen belgilenedi.



348-súwret. Rentgen qáddileriniń sxeması.

Eki kvantlıq qabıq eki dana 2s-elektronnan hám altı 2p-elektronnan turadı. Olardıń (altawdıń) ekewi ushın $j_i = 1/2$, al tórtewi ushın $j_i = 3/2$. Eger eki kvantlıq qabıqtan 2s-elektronlardıń birewi shıǵarılǵan bolsa, onda $^2S_{1/2}$ halı payda boladı. Eger $2p_{1/2}$ elektronlardıń biri julıp alınatuǵın bolsa, onda $^2P_{1/2}$ halı ($L = 1, S = 1/2, J = 1/2$), al eger $2p_{3/2}$ - elektronlardıń biri julıp alınatuǵın bolsa, onda $^2P_{3/2}$ halı ($L = 1, S = 1/2, J = 2/2$) halı payda boladı. Demek, bul jaǵdayda hár qıylı bolǵan úsh haldıń júzege keliwi múmkin. Bul jutılıw rentgen spektrinde kórinedi: L jutılıw jolaǵı bir birine tıǵız jaylasqa úsh jolaqqa ajıraladı (345-súwret). Olardıń biri atomnan 2s-elektrondı julıp alıwǵa, al qalǵan ekewi $2p_{1/2}$ - hám $2p_{3/2}$ - elektronlarınıń julıp alınıwına juwap beredi. Rentgenoskopiyada joqarıda kórsetilgen úsh eki kvantlıq hal L_I, L_{II} hám L_{III} simvolları menen belgilenedi. Tap usıǵan uqsas mınaday juwmaqqa keliwge boladı: úsh kvantlı qabıqtan elektronlardıń birin julıp alǵanda mınaday $^2S_{1/2}, ^2P_{1/2}, ^2P_{3/2}, ^2D_{3/2}, ^2D_{5/2}$ bes haldıń biri júzege keledi. Bul bes halǵa jutılıw spektrindegı M-jolaqtıń bir birine jaqın bolǵan bes jolaqqa ajırılıwı sáykes keledi. Tórt kvantlı qabıqtan elektronlardıń birin julıp alǵanda hár qıylı bolǵan jeti hal payda boladı.

Termlderdiń arasındaǵı ruqsat etilgen ótiwler optikalıq oblasttaǵıday saylap alıw qaǵıydaları boyınsha anıqlanadı:

$$\Delta L = \pm 1, \Delta J = 0, \pm 1.$$

Qáddilerdiń sxeması saylap alıw qaǵıydaları menen birgelikte rentgen spektrleriniń strukturasınıń tolıq túsiniwge múmkinshilik beredi. 348-súwrette qáddilerdiń hám ayırım sızıqlardıń payda bolıwınıń sxeması berilgen. K -qáddige joqarı qáddilerden ótiwdiń saldarınan payda bolatuǵın K -seriya eń qısqa tolqınlı seriya bolıp tabıladı. Bul seriya optikalıq $\nu = 1^2S_{1/2} - n^2P_J$ dubletlerdiń bas seriyasına sáykes keledi. Bunnan keyin L — hám M — seriyalar júredi. Seriyalardaǵı ayırım sızıqları $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ grek háripleri hám sanlı indeksler menen belgilenedi. Mısalı, $1^2S_{1/2} - 2^2P_{3/2}$ ótiwine K_{α_1} arqalı belgilenetuǵın sızıq, $1^2S_{1/2} - 3^2P_{3/2}$ ótiwine K_{β_1} arqalı belgilenetuǵın sızıq payda boladı h.t.b.

§ 353. Spektrallıq sızılardıń intensivlikleri. Ótiwlerdiń itimallıqları. Klassikalıq elektrodinamikanıń kóz-qarasları boyınsha (332-paragraf) atomda terbeletuǵın elektron ózi qanday ν jıyilikte terbeletuǵın bolsa, onda tap sonday jıyiliktegi jaqtılıqtı shıǵaradı.

Nurdanıwdıń ortasha quwatı mınaǵan teń:

$$\bar{W} = \frac{16\pi^4 e^2}{3c^2} \nu^4 a^2. \quad (1)$$

Bul teńlikte a - elektronnıń terbelisleriniń amplitudası. Solay etip, klassikalıq teoriya boyınsha spektrallıq sızılardıń intensivligi amplitudanıń kvadratına hám elektronnıń sáykes terbelisiniń jıyiliginıń tórtinshi dárejesine proporcional. Biraq, Bordıń eń dáslepki teoriyasında spektrallıq sızılardıń intensivligi máselesi pútkilley basqasha qoyıldı. Sızılardıń shıǵarılıwı shıǵarıwdıń elementar aktları jolı menen júzege keledi, sol aktlardıń hár birinde energiyanıń $\Delta W = h\nu$ porciyası nurlandırıladı. Nátiyede spektrallıq sızılardıń intensivligi máselesi waqıt birligindegi shıǵarıwlardıń elementar aktleriniń sanına alıp kelinedi.

Úsh dana W_i , W_l hám W_k energiya qáddileri bolǵan jaǵdaydı qaraymız (349-súwret). Meyli, qanday da bir sırttan túsirilgen tásirde (misalı elektronnıń urılıwınır saldarınan) atomlardıń belgili bolǵan N_k danası energiyası W_k bolǵan qozǵan halǵa ótedi. Keri baǵıtta tómengi halǵa ótiwde atomlar jıyiligi

$$\nu_{ki} = \frac{1}{h}(W_k - W_i), \quad \nu_{kl} = \frac{1}{h}(W_k - W_l)$$

shamalarına teń bolǵan sızılardı shıǵaradı. Meyli A_{ki} hám A_{kl} arqalı $W_k \rightarrow W_i$ hám $W_k \rightarrow W_l$ ótiwlerdiń itimallıǵın belgileyik. Bunday jaǵdayda waqıt birligindegi ótiwlerdiń sanları sáykes $N_k A_{ki}$ hám $N_k A_{kl}$ shamalarına, al sızılardıń intensivligi

$$I_{ki} = N_k A_{ki} \cdot h\nu_{ki}; \quad I_{kl} = N_k A_{kl} \cdot h\nu_{kl} \quad (2)$$

shamalarına teń boladı.

Kvantlıq mexanikada ótiwlerdiń itimallıqları bolǵan A_{ki} hám A_{kl} shamalarınıń jıyiliklerdiń kubına hám tómengi qáddilerdiń statistikalıq salmaqlarına proporcional ekenligi kórsetiledi:

$$A_{ki} = A'_{ki} g_i \nu_{ki}^3, \quad A_{kl} = A'_{kl} g_l \nu_{kl}^3$$

Bul teńliklerde A'_{ki} menen A'_{kl} - konstantalar. Bul teńliklerdiń paydalanıp biz qarap atırǵan sızılardıń intensivlikleri ushın minaday qatnastı alamız:

$$\frac{I_{ki}}{I_{kl}} = \frac{A'_{ki}}{A'_{kl}} \cdot \frac{g_i}{g_l} \cdot \frac{\nu_{ki}^3}{\nu_{kl}^3}. \quad (3)$$

Sızılardıń intensivlikleri, klassikalıq teoriyadaǵı sıyaqlı, jıyiliklerdiń tórtinshi dárejesine proporcional bolıp shıǵadı.

Statistikalıq salmaqlardıń mánisileri minaday tallawlardan alınadı: atomnıń energiya qáddileri tek sırtqı magnit maydanı bolmaǵan jaǵdayda ǵana azǵınǵan bolmaydı. Bunday jaǵdayda n, L, J, m_J kvant sanlarınıń hár bir tórtewine óziniń qáddi sáykes keledi. Sırtqı magnit maydanı bolmaǵan jaǵdayda birdey n, L, J kvant sanlarına, biraq hár qıylı m_J lerge iye bolǵan qáddiler bir biri menen qosılıp ketedi. $m_J = \pm J, \pm(J-1), \dots$ mánislerine iye bolǵalıqtan $2J+1$ dana mániske iye boladı. Bunday jaǵdayda sırtqı maydan bolmaǵanda berilgen n, L, J lerdiń hár bir qáddin hár qıylı bolǵan $2J+1$ qáddilerdiń qosılıwınır saldarınan payda bolǵan dep esaplawǵa boladı. Bunnan onıń statistikalıq salmaǵın $2J+1$ ge teń dep esaplawǵa boladı:

$$g = 2J + 1. \quad (4)$$

Eger tómengi qáddiniń ekewi de tek J kvant sanları menen ayrılatuǵın, biraq birdey n hám L kvant sanlarına iye bolsa (bir multiplettiń qurawshıları bolıp tabıladı), onda $A'_{kl} = A'_{ki}$. Eger, bunnan basqa sızılardıń jıyilikleri ν_{ki} menen ν_{kl} ler bir birinen az ayrılatuǵın bolsa, onda

$$\frac{I_{ki}}{I_{kl}} = g_i / g_l \quad (3a)$$

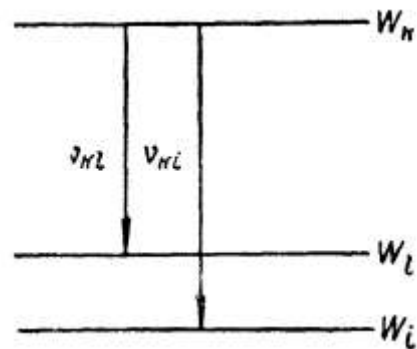
teńligi orın aladı. (3a) teńlikten mınaday jaǵdaydıń orınlı ekenligi kelip shıǵadı: *eger tar spektrallıq multipalettiń qurawshıları joqarı qáddiniń birewiniń ótiwiniń saldarınan payda bolatuǵın bolsa, onda olardıń intensivlikleriniń qatnası tómengi qáddilerdiń statistikalıq salmaqlarınıń qatnasına teń boladı.* Intensivlikler qaǵıydası dep atalatuǵın bul qaǵıydanıń durıs ekenligi tájiriybede ayqın kórinedi. Natriydiń ekinshi qosımsha seriyasınıń dubletlik sıızıqları $\nu = 3^2P_J - n^2S_{1/2}$ (340-súwret) ushın ápiwayı $n^2S_{1/2}$ qáddiden tómengi eki $3^2P_{1/2}$ hám $3^2P_{3/2}$ qáddilerge ótiw júzege keledi. Sonlıqtan, (Za)- hám (4)-formulalar boyınsha dublettiń eki qurawshılarınıń intensivlikleriniń qatnası

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{2J_1 + 1}{2J_2 + 1} = \frac{2 \cdot \frac{1}{2} + 1}{2 \cdot \frac{3}{2} + 1} = \frac{1}{2}$$

qatnasınday boladı.

349-súwret.

Úsh energiya qáddileriniń arasındǵı ótiwler.



Solay etip, bul jaǵdayda intensivliklerdiń qatnası 1:2 ge teń. J_i shaması barlıq waqıtta pútin yamasa yarım pútin bolǵanlıqtan, onda barlıq basqa jaǵdaylarda da multipletlerdiń qurawshılarınıń intensivlikleriniń qatnası (3a) formulaǵa sáykes pútin sanlardıń qatnasınday boladı. Bul pútin sanlıq birinshi ret eksperimentlerde D.S.Rojdestvenskiy tárepinen natriydiń sarı dubletinde tabıldı. Olardıń intensivlikleriniń qatnası 1:2 ge teń.

Ótiwlerdiń itimallıǵı haqındaǵı túsiniń júdá áhmiyetli bolıp tabıladı. Sebebi ol teń salmaqlıq nurlanıwı bolǵan jaǵdayda Plank formulasına alıp keledi (311-paragraf). Hár qaysısı $W_1, W_2, W_3, \dots, W_i, \dots$ stacionar hallarda tura alatuǵın atomlardıń jıynaǵın kóz aldımızǵa keltireyik.

Eger biz qarap atırǵan atomlardıń jıynaǵı T temperaturada termodinamikalıq teń salmaqlıqta turatuǵın bolsa, onda Bolcman nızamı boyınsha energiyası W_i ge teń bolǵan atomlardıń sanı mınaǵan teń:

$$N_i = N_1 \frac{g_i}{g_1} e^{-\frac{W_i - W_1}{kT}}. \quad (5)$$

Bul ańlatpada N_1 arqalı energiyası W_1 ge teń atomlardıń sanı, al k arqalı Bolcman turaqlısı belgilengen.

Joqarıda aytılıp ótilgenindey, jaqtılıqtıń nurlanıwına alıp keletuǵın bir W_k haldan ekinshi W_i halǵa ótiw A_{ki} itimallıǵı menen júredi. Eynshteyn basqa atomlar nurlandırmay turǵan jaǵdayda payda bolatuǵın ótiwler menen bir qatarda sırtqı nurlanıwdıń tásirinde júretuǵın ótiwlerdiń de bolatuǵınlıǵın kórsetti (indukciyalanǵan ótiwler). Bul indukciyalanǵan ótiwlerdiń itimallıǵı nurlanıwdıń tıǵızlıǵı $u(\nu_{ki})$ ǵa proporcional. Bunday jaǵdayda nurlanıwdıń eki tipiniń bar bolatuǵınlıǵınıń nátiyesinde waqıt birliginde nurlanatuǵın ulıwma energiya mınaǵan teń boladı:

$$\Delta W = N_k [A_{ki} + B_{ki} u(\nu_{ki})] h \nu_{ki} \quad (6)$$

Bul teńlikte B_{ki} arqalı jańa konstanta belgilengen.

Jaqtılıqtıń shıǵarılıwı menen bir qatarda atomlardıń W_i haldan W_k halǵa ótiwi menen baylanıslı bolǵan jutılıw da orın aladı. Bunday ótiw sırttan túsiwshi jaqtılıqtıń tásirinde júzege keletuǵın bolǵanlıqtan, onıń itimallıǵı nurlanıwdıń tıǵızlıǵı bolǵan $u(\nu_{ki})$ shamasına proporcional. Sonlıqtan, waqıt birliginde jutılǵan energiyanıń shamasın mına túrde jaza alamız:

$$\Delta W' = N_i B_{ik} u(\nu_{ki}) h \nu_{ki}. \quad (7)$$

Bul teńlikte N_i arqalı energiyası W_i shamasına teń bolǵan haldaǵı atomlardıń sanı belgilengen, al B_{ik} - jáne bir konstanta.

Termodinamikalıq teń salmaqlıq halında nurlanıw menen jutılıwdıń quwatları bir birine teń bolıwı kerek: $\Delta W = \Delta W'$. Bunnan (6)- hám (7)-teńliklerden mınaǵan iye bolamız:

$$N_k[A_{ki} + B_{ki}u(v_{ki})] = N_i B_{ik}u(v_{ki}). \quad (8)$$

(5)-Bolcman formulası boyınsha:

$$\frac{N_i}{N_k} = \frac{g_i}{g_k} e^{-\frac{W_i - W_k}{kT}},$$

yamasa $W_k - W_i = h\nu_{ki}$ teńligi orınlı bolǵanlıqtan

$$\frac{N_i}{N_k} = \frac{g_i}{g_k} e^{-\frac{h\nu_{ki}}{kT}}$$

ańlatpasın jaza alamız.

Bul ańlatpa (8)-formulanı

$$A_{ki} + B_{ki}u(v_{ki}) = \frac{g_i}{g_k} e^{-\frac{h\nu_{ki}}{kT}} B_{ik}u(v_{ki})$$

túrinde jazıwǵa múmkinshilik beredi. Bul teńlikte nurlanıwdıń tıǵızlıǵı $u(v_{ki})$ ge qarata sheship

$$u(v_{ki}) = \frac{A_{ki}}{\frac{g_i}{g_k} B_{ik} e^{-\frac{h\nu_{ki}}{kT}} - B_{ki}} \quad (9)$$

formulasına iye bolamız.

T temperatura sheksiz joqarılaǵanda nurlanıwdıń tıǵızlıǵı bolǵan $u(v_{ki})$ shamasınıń da sheksiz ósiwi kerek. Biraq, $T \rightarrow \infty$ de $e^{-\frac{h\nu_{ki}}{kT}} \rightarrow 1$ shegi orınlı bolǵanlıqtan, onda (9)-formula boyınsha bar jaǵdaydıń $\frac{g_i}{g_k} B_{ik} = B_{ki}$ teńligi orınlangan jaǵdayda ǵana orınlı bolatuǵınlıǵına kóz jetkeremiz. Bunnan keyin (9)-formula mınaday túrge enedi:

$$u(v_{ki}) = \frac{g_k}{g_i} \cdot \frac{A_{ki}}{B_{ik}} \cdot \frac{1}{e^{-\frac{h\nu_{ki}}{kT}} - 1}. \quad (9a)$$

Joqarıda qabıl etilgen boljaw boyınsha biz qarap atırǵan atomlardıń hár biri energiyaları úzlikli $W_1, W_2, W_3, \dots$ shamalarına teń hallarda tura aladı. Demek, bunday atomlar sızıqlarınıń jiyilikleri ν_{ki} shamalarına teń bolǵan sızıqlı spektrdi shıǵaradı. (9a) formula termodinamikalıq teń salmaqlıq halı ornaǵan jaǵdayda ν_{ki} monoxromat jiyiliklerdiń hár qaysısına sáykes keletuǵın nurlanıwdıń tıǵızlıǵı $u(v_{ki})$ di beredi. Bul bul formulanı tutas spektr ushın da ulıwmalastıra alamız. Onıń ushın qanday da bir sebeplerge baylanıslı (mısalı, qattı yamasa suıq denedegi atomlardıń bir birine tásir etiwiniń saldarınan) $W_1, W_2, W_3, \dots$ energiya qáddileri bir birine sheksiz jaqın jaylasa baslaydı dep boljaymız. Bunday jaǵdayda shıǵarılatuǵın jiyiliklerdiń sanı sheksiz ósedi hám qońsılas sızıqları bir birine sheksiz jaqın jaylasadı. Shekte olar bir biri menen birigedi hám bir tutas spektrdi alamız. Ulıwmalıq nurlandıruw quwatınıń shaması shekli bolǵanlıqtan, endi hár bir monoxromat jiyilikke sheksiz kishi energiya sáykes keledi. Sonlıqtan, bunday jaǵdayda bir monoxromat jiyilik ν_{ki} ge sáykes keletuǵın nurlanıwdıń tıǵızlıǵı $u(v_{ki})$ haqqında emes, al jiyiliklerdiń ν den $\nu + d\nu$ ge shekemgi intervalına tiyisli bolǵan tıǵızlıq $u_\nu = u(\nu)d\nu$ haqqında gáp etsek mániske iye bolǵan bolar edi. Bunday jaǵdayda (9a) nıń ornına

$$u_\nu = \frac{g_k}{g_i} \cdot \frac{A_{ki}}{B_{ik}} \cdot \frac{1}{e^{-\frac{h\nu}{kT}} - 1} d\nu \quad (10)$$

formulasına iye bolamız.

Júdá kishi jiyilikler ushın (úlken tolqın uzınlıqları ushın) $\frac{h\nu}{kT} \ll 1$, (10)-formula juwıq túrde mınaday túrge enedi

$$u_\nu = \frac{g_k}{g_i} \cdot \frac{A_{ki}}{B_{ik}h\nu} \cdot kT d\nu.$$

Ekinshi tárepten, kishi jiyilikler ushın nurlanıwdıń úzlikliliǵı sezilerliktey bolmaytuǵın jaǵdayda, Reley-Djins formulasına alıp keletuǵın tallawdıń klassikalıq usılı durıs boladı (311-paragraf):

$$u_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{s^3} kT \cdot d\nu. \quad (11)$$

Haqiqatında da $\frac{h\nu}{kT} \ll 1$ teńsizligi orın alatuǵın úlken tolqın uzınlıqları oblastında Reley-Djins formulasınıń tájiriybede alınatuǵın maǵlıwmatlarǵa sáykes keletuǵınlıǵın kórdik (311-paragraftaǵı 231-súwretke qarańız).

Solay etip, (10a)- hám (11)-formulalardıń bir birine sáykes keliwi kerek hám bunday sáykes keliwdiń orın alıwı ushın

$$\frac{g_k}{g_i} \cdot \frac{A_{ki}}{B_{ik}} = \frac{8\pi h\nu^3}{s^3}$$

teńliginiń orınlanıwı shárt. $\frac{g_k}{g_i} \cdot \frac{A_{ki}}{B_{ik}}$ shamasınıń mánisin (10)-formulaǵa qoyıp, termodinamikalıq teń salmaqlıqta tutas spektrde nurlanıwdıń tıǵızlıǵınıń

$$u_\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{s^3} \cdot \frac{1}{e^{-h\nu/kT} - 1} d\nu$$

formulasın qanaatlardıwınıń kerek ekenligi kelip shıǵadı. Al bul formula bolsa 311-paragraftaǵı (3)-Plank formulasına sáykes keledi.

§ 354. Molekulalardıń qurılısı. Elektronlardıń atomlardaǵı qozǵalısnı qaraytuǵın Bor teoriyası molekulalardıń qurılısın anıqlaw ushın da jaramlı bolıp shıqtı. Biraq, bunday jaǵdayda, atomlarda orın alǵan jaǵdaylardaǵıday, Bor teoriyası haqıyqıy qatnaslardı tek juwıq túrde ǵana táriyipleı aladı. Tek elektronlardıń menshikli mexanikalıq hám magnit momentleriniń bar ekenligin esapqa alatuǵın kvantlıq mexanika ǵana molekulalardıń qurılısın, sonıń ishinde molekulalardaǵı atomlardı bir birine uslap turatuǵın kúshlerdiń tábiyatın tereńirek túsiniwge múmkinshilik beredi.

Kóp sanlı atomlarǵa iye bolǵan molekulalardıń qásiyetleri júdá quramalı hám sońǵı eki on jıllıqtıń ishinde úlken tabıslarǵa erisken molekulalardıń qurılısınıń teoriyası kóp tamanları boyınsha ele tamamlanbaǵan. Sonlıqtan biz eń ápiwayı bolǵan, atap aytqanda *eki atomlı molekulalardı* qaraw menen sheklenemiz.

Molekulalardaǵı atomlardı bir biri menen uslap turatuǵın kúshler eń sırtqı elektronlardıń ózara tásirlesiwiń saldarınan júzege keledi. Ishki qabıqlardıń elektronları ózleriniń orınlarında qaladı. Bul jaǵday awır elementlerdiń rentgen spektrleriniń usı elementlerdiń qanday ximiyalıq birikpeniń quramına kiretuǵınlıǵın sezilerliktey ǵárezli emes ekenligi menen tastıyıqlanadı. Al molekulalardıń optikalıq spektrleri bolsa onıń quramına kiretuǵın atomlardıń spektrlerine pútkilley usamaydı. Sonıń menen birge tek fizikalıq qásiyetlerge ǵana emes, al ximiyalıq qásiyetlerge tiyisli bolǵan dáwirlilik ximiyalıq baylanıstıń tek sırtqı elektronlar arqalı dúziletuǵınlıǵın kórsetedi.

Eki atomlı molekula bolǵan jaǵdayda baylanıstıń eki tipin bir birinen ayırıw kerek. Olardıń biri elektronlardıń bir bólimi eki yadronıń dógeresinde aylanatuǵın jaǵdayǵa tiyisli. Bunday baylanıstı *atomlıq baylanıs* dep ataydı. Ádette, atomlıq baylanıs bir jup elektronlar menen payda boladı hám bul juptaǵı elektronlardıń spinlik momentleriniń baǵıtları qarama-qarsı. Bunday tiptegi molekulalardıń ishindegi birdey yadrolarǵa iye molekulalardı (mısalı N_2 yamasa C_2) hám hár qıylı yadrolarǵa iye molekulalardı (mısalı CN) bir birinen ayırıw kerek. Birinshi túrdegi molekulalarda elektronlar simmetriyalı túrde tarqalǵan, al ekinshi túrdegi molekulalarda elektronlardıń tarqalıwında bazı bir asimmetriya orın aladı. Usınıń nátiyjesinde molekulalar elektrlik dipollik momentke iye boladı.

Baylanıstıń ekinshi tipi molekuladaǵı elektronlardı eki toparǵa bóliw múmkin bolǵan jaǵdayda júzege keledi. Olardıń hár biri barlıq waqıtta yadrolardıń birewiniń átirapında jaylasadı. Eger yadrolardıń biriniń átirapında elektronlar artıqmash, al ekinshisiniń dógeresinde jetkiliksiz jaylasqan bolsa, onda molekulalarda bekkem baylanıs payda boladı. Bunday jaǵdayda molekula belgileri hár qıylı bolǵan hám sonlıqtan bir biri menen tartısatuǵın ionlardan turatuǵınday bolıp kórinedi. Usınday tiptegi baylanıstı *ionlıq baylanıs* dep ataydı. Ionlı baylanısqa iye molekulalarǵa misal sıpatında siltili metallardıń galogenler menen birikpeleri xızmet ete aladı ($NaCl$, KBr h.t.b.). Usınday birikpelerdiń molekulaların suwda eritkende olardıń molekulaları eki ionǵa bólinedi

(siltili metaldırn ón ionı hám galogenniń teris ionı) hám bul óz gezeginde eritpeniń elektrolitlik ótkizgishligin payda etedi (II tom, 174-paragraf).

Joqarıda biz molekuralıq spektrlerdiń atomlıq spektrlerden kúshli ayrılatuǵınlıǵın aytıp óttik. Atomlıq spektrler salıstırmalı sıyrek jaylasqan sızıqlardan turadı, olar seriyalardıń aqırında bir birine jaqınlasadı hám júdá ázzi boladı. Sırtqı elektronlarınıń sanı kishi bolǵan atomlardıń seriyalarınıń sanı úlken emes. Molekulalıq spektrlerde oǵada kóp sandaǵı ayırım sızıqlar bir birine júdá tıǵız jaylasqan ózine tán jıyınalardı payda etedi, olardıń hár biriniń bir shetinde olar oǵada tıǵız jaylasqanlıqtan, ortasha ajırata alıw kúshine iye ásbaplar menen baqlaǵanda olar jolaq túrinde kórinedi. Sonlıqtan barlıq jıyınal bir sheti keskin, al ekinshi sheti jayılǵan jolaqtıń túrine enedi. Bunnan molekularardıń spektrleriniń ataması bolǵan jolaq spektrler ataması kelip shıqqan. Keskin túrdegi shet jolaqtıń uzın tolqınlı tárepinde de, qısqa tolqınlı tárepinde de jaylasıwı múmkin. Jolaqlar gruppalarǵa jıynaladı (350-súwret); molekuralıq spektrdegi usınday gruppalardıń sanı bir neshe bolıwı múmkin. Kórsetilgen jolaqlar spektrdiń jaqın infraqızıl, kózge kórinetuǵın hám ultrafiolet oblastlarında da ushırasadı. Uzaq infraqızıl oblastta eki atomlı molekular ápiwayı spektrlerdi beredi hám bul jaǵdayǵa biz tómende itibar beremiz (356-paragraf). Juwmaqlay kele, biz molekuralıq spektrlerde úsh tiptegi nızamlıqlardıń bolatuǵınlıǵın ayta alamız:

- a) ayırım sızıqlardıń jolaqqa birlesiwi;
- b) jolaqlardıń gruppalarǵa birigiwi;
- c) spektrde bir neshe jolaqlardıń bolıwı.

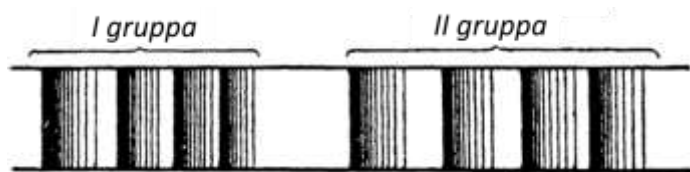
Nızamlıqlardıń bul úsh tipi molekulanıń energiyasın úsh tipke bóliwge sáykes keledi:

- a) molekulanıń tutası menen aylanıw energiyası $W_{ayl.}$;
- b) molekulanıń quramına kiretuǵın yadrolardıń teń salmaqlıq hallarınıń átirapındaǵı terbelisleriniń energiyası $W_{terb.}$;
- c) molekulanıń elektronlıq qabıǵınıń energiyası $W_{el.}$

Molekulanıń tolıq energiyası W sol energiyanıń qosındısına teń:

$$W = W_{el.} + W_{terb.} + W_{ayl.} \quad (1)$$

Haqıyqatında, joqarıda kórsetilgen energiyanıń úsh túri bir birinen ǵárezsiz emes. Sonlıqtan tolıq energiya W nı (1)-summa túrinde kórsetiw juwıq xarakterge iye. Biraq, sonda da, energiyalardı $W_{el.}$, $W_{terb.}$ hám $W_{ayl.}$ túrinde ayırıp qaraw molekuralıq spektrlerdiń strukturasını tallaw ushın paydalı.



350-súwret.
Molekulalıq jolaqlardıń gruppaları.

Molekulanıń halı ózgergende shıǵarılatuǵın jaqtılıqtıń jiyiligi $\nu = \frac{\Delta W}{h}$ qa teń. Bul teńlikti (1)-teńlikke sáykes

$$\nu = \frac{\Delta W_{el.}}{h} + \frac{\Delta W_{terb.}}{h} + \frac{\Delta W_{ayl.}}{h} \quad (2)$$

túrinde jazıwǵa boladı.

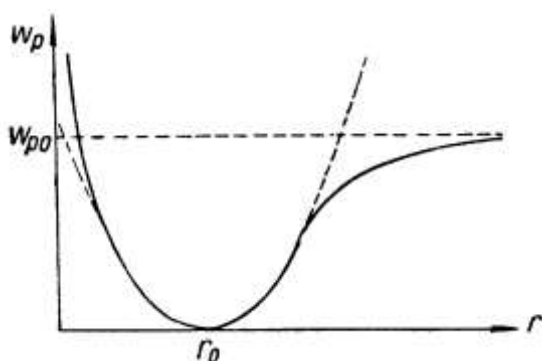
$W_{el.}$, $W_{terb.}$ hám $W_{ayl.}$ energiyalarınıń hár qaysısınıń mánisleri úzlikli qatardı payda etedi. Usınıń saldarınan (2)-formula boyınsha molekulanıń spektri ayırım sızıqlardan turadı. Tek usı sızıqlardıń tıǵız gruppalasıwınıń nátiyjesinde jolaqlardı payda etetuǵınlıǵın biz kórsetip óttik. Teoriya menen tájiriye $\Delta W_{el.}$ elektronlıq energiyalardıń ayırmalarınıń úlken mániske, al aylanıwǵa sáykes keletuǵın $\Delta W_{ayl.}$ energiyalarınıń ayırmasınıń eń kishi mániske iye bolatuǵınlıǵın kórsetedi.

Kelesi paragraflarda molekuladağı elektronniń terbelis, aylanıw energiyaların óz aldına qaraymız.

§ 355. Molekulalardıń terbeliw spektrleri. Eki atomlı molekulada elektronlar menen tásir etisiwdiń saldarınan sol eki atomniń yadroları ózleriniń teń salmaqıq orınlarına iye boladı hám usı orınlardıń átirapında olar terbele aladı. Yadrolardıń arasındağı qashıqlıqtı r arqalı belgileymiz; teń salmaqıq orıńğa $r = r_0$ qashıqlıǵı sáykes keledi. Yadrolardıń teń salmaqıq orınlarınan kishi awısıwlaradağı kúshti kvaziserpimli dep esaplawǵa boladı:

$$f = -k(r - r_0). \quad (1)$$

Yadrolar jaqınlasqanda $r - r_0$ ayırmasınıń mánisi teris hám f kúshiniń shaması oń, yaǵnıy iýterilis kúshi boladı. Yadrolar bir birinen qashıqlasqanda $r - r_0$ ayırmasınıń mánisi oń boladı. Bul tartılıs kúshine sáykes keledi. I tomniń 27-paragrafında kvaziserpimli kúshke W_p potenciallyq energiya menen $r - r_0$ ayırmasınıń arasındağı ǵárezliktiń parabolalıq ekenligin kórdik (351-súwrettegi punktir sıziq). Teń salmaqıq halınan úlken awısıwlarada f kúshi kvaziserpimli bolıp qala almaydı. Eger yadrolar bir birinen júdá úlken aralıqqa qashıqlatılǵan bolsa, onda f kúshiniń shamasınıń nolge umtılıwı kerek. Al (1)-formula boyınsha onıń mánisi úzliksiz úlkeygen bolar edi. Tap sol sıyaqlı, yadrolar bir birine tıǵız jaqınlasqanda da kúshtiń shaması (1)-formula boyınsha ańǵartılmaıdı: ol ádewir tezirek úlkeye baslaydı. Usı jaǵdayǵa sáykes haqıyqıy potenciallyq energiya (351-súwrettegi tutas iymeklik) tek ortadağı bólimde ǵana parabolalıq túrge iye boladı; onıń oń táreptegi shaqası jatıq hám turaqlı bolǵan W_{p0} shamasına asmiptotalıq jaqınlasadı; onıń shep tárepi orbinata kósherine jaqınlasqanda júdá tik ózgeredi. $r = r_0$ teńligi orın alǵandağı minimumdağı potenciallyq energiyanı shártli túrde nolge teń dep esaplaydı.



351-súwret.
Eki atomlı molekulaniń potenciallyq energiyası.

Kvantlıq mexanikada (1)-kvaziserpimli kúsh orın alǵan jaǵdayda yadrolardıń terbelisleriniń tolıq energiyası $W_{terb.}$ niń

$$W_{terb.} = (n + \frac{1}{2})a \quad (2)$$

(n arqalı 0, 1, 2, ... mánislerine teń bolatuǵın pútin san belgilengen hám onı *terbelmeli kvant sanı* dep ataydı) teńligi menen anıqlanatuǵın mánislerge ǵana iye bola alatuǵınlıǵı kórsetiledi. a konstantası

$$a = \hbar \sqrt{\frac{k}{M}}. \quad (3)$$

Bul formulada

$$M = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \quad (4)$$

shaması molekulaniń keltirilgen massası bolıp tabıladı. Bul teńlikte m_1 hám m_2 arqalı eki yadronıń massaları belgilengen.

(2)-formula bir birinen teńdey qashıqlılıqırda turǵan qáddilerdiń qatarın beredi. Bul jaǵdaydağı eń tereń qáddi $W_{terb.} = \frac{1}{2}a$ mánisinde jatadı; nollik qáddiniń bolıwı múmkin emes.

Bul molekularıń yadrolarınıń hesh qashan tınıshlıqta bolmaytuǵınlıǵın ańǵartadı. Yadrolar barlıq waqıtta terbeliste boladı (tek hár qıylı amplitudalar menen).

Yadrolardıń arasındaǵı óz-ara tásirlesiw kúshi kvaziserpimli kúshten ózgeshe bolatuǵın bolsa, onda $W_{terb.}$ energiyasınıń shaması (2)-formula menen ańǵartılmaıdı. Bunday jaǵdayda energiyanıń shamasın juwıq túrde

$$W_{terb.} = (n + \frac{1}{2})a - (n + \frac{1}{2})b \quad (5)$$

formulasınıń járdeminde esaplanadı. Bul formulada a menen b lar konstantalar bolıp tabıladı hám $b < a$.

(2)- hám (5)-formulalardı biriktirip mınaǵan iye bolamız: parabolaǵa jaqın bolǵan potenciallıq iymekliktiń tómengi bóliminde energiya qáddileri bir birinen birdey qashıqlıqlarda jaylasadı; potencial energiya parabolalıqtan qala baslaǵanda (5)-formulaǵa sáykes, qáddiler energiyanıń W_{p0} shamasınan úlken bolmaǵan sheklerde bir birine kem-kemnen jaqın jaylasa baslaydı (352-súwret). Potenciallıq energiya usınday mániske yadrolar bir birinen sheksiz qashıqlatılǵan jaǵdayda turǵanda, yaǵnıy molekula eki bólimge dissociaciyalanǵanda iye boladı.

(2)-formula durıs bolǵan oblastta terbelmeli kvant sanı ushın mınaday saylap alıw qaǵıydası orın aladı:

$$\Delta n = \pm 1. \quad (6)$$

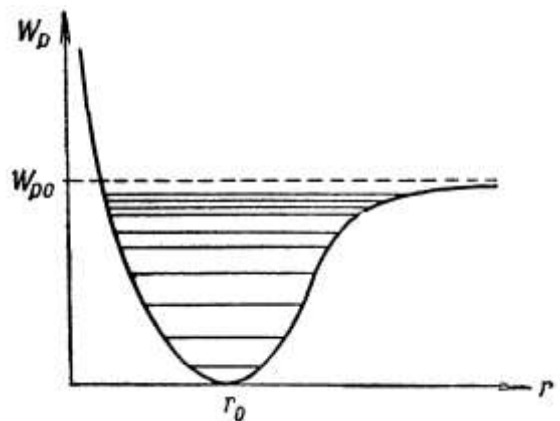
Bul tek qońsılás qáddilerdiń arasında ǵana ótiwlerdiń múmkin ekenligin ańǵartadı. Jaqtılıqtı shıǵarıw processine $\Delta n = -1$ teńligi sáykes keledi. Bunday jaǵdayda jiyiligi

$$\nu = \frac{W'_{terb.} - W_{terb.}}{h} = \frac{a}{h} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}} \quad (7)$$

shamasına teń jaqtılıq shıǵarıladı (sek⁻¹ lerdegi).

$\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}}$ shamasınıń yadrolardıń (1)-kvaziserpimli kúshtiń tásirindegi menshikli terbelis jiyiligi ν_0 bolıp tabılatuǵınlıǵın ańǵaramız. Solay etip, nurlandırılǵan jaqtılıqtı jiyiligi ν yadrolardıń menshikli terbelisleriniń jiyiligi ν_0 ge teń boladı.

352-súwret.
Molekulanıń terbelmeli qáddileri.



Eger ν jiyiligin ádettegidey sm⁻¹ lerde ańǵartatuǵın bolsaq, onda (7)-formulanıń ornına

$$\nu = \frac{1}{2\pi c} \sqrt{\frac{k}{M}} \quad (7a)$$

formulasına iye bolamız.

Molekulalardıń terbelmeli qáddileri bir birinen salıstırmalı jaqın qashıqlıqlarda jaylasqan, sonlıqtan terbelmeli spektrdiń jiyiligi ν tolqın uzınlıǵı bir neshe mikron bolǵan infraqızıl oblastta jaylasadı.

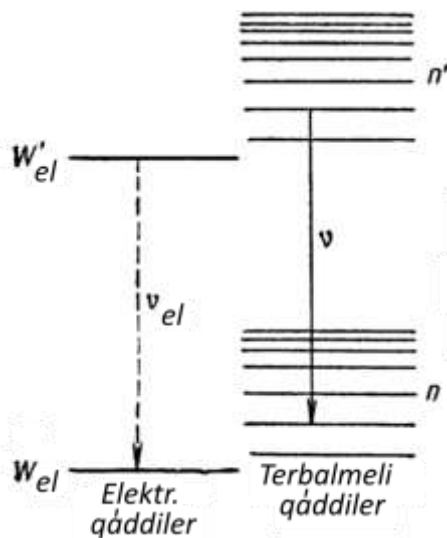
Yadrolardıń arasındaǵı óz-ara tásirlesiw kúshleri kvaziserpimli xarakterden ózgergende (6)-saylap alıw qaǵıydası buzıladı hám $\Delta n = \pm 2, \pm 3, \dots$ ótiwleriniń de orın alıw múmkinshiligi tuwıladı. Bunday jaǵdayda shıǵarılgan jaqtılıqtıń ν jiyiligin anıqlaw ushın terbelislerdiń energiyası ushın jazılǵan (5)-ańlatpadan paydalanıw kerek. Eger $(n + \frac{1}{2})b$ aǵzası ele kishi bolsa, onda $\Delta n = -2, -3, \dots$ ótiwlerge juwıq túrde

$$\nu = 2\nu_0, 3\nu_0, \dots \quad (8)$$

jiyiliklerdi shıǵarıw sáykes keledi.

Usınıń saldarınan eki atomlı molekulanıń terbelmeli spektri ν_0 "tiykargı tonnan" hám $2\nu_0, 3\nu_0, \dots$ "obertonlardan" turadı. Mısal keltiremiz: CO molekulası ushın "tiykargı ton" $\lambda = 4,67$ mkm bolǵan tolqın uzınlıǵına sáykes keledi. Bunnan keyingi eki "obertonlar" $\lambda = 2,35$ mkm hám $\lambda = 1,58$ mkm bolǵan oblastta jaylasadı. (8)-qatnas dál orınlanganda olardıń tolqın uzınlıqları 2,33 mkm hám 1,56 mkm shamalarına teń bolıwı kerek.

Belgili bolǵan W' hám W energiya qáddileriniń arasındaǵı hár bir ótiwge $\nu = \frac{W' - W}{h}$ monoxromat jiyiliginiń shıǵarılıwı sáykes keledi. Sonlıqtan, eger molekulada tek yadrolardıń terbelmeli qozǵalısları ǵana bolatuǵın bolsa, onda onıń spektri ayırım sızıqlardan turǵan bolar edi. Haqıyqatında, hár bir terbelmeli qozǵalısqı molekulanıń aylanbalı qozǵalısqı qosıladı. Bizler kelesi paragrafta bul jaǵdaydıń ayırım sızıqtıń bir biri menen tıǵız jaylasqan tolıq "jolaq" penen almasırwǵa alıp keledi. Demek, molekulanıń hár bir eki terbelmeli halınıń arasındaǵı hár bir ótiwge bir sızıq emes, al jolaq juwap beredi. Biraq, usı jaǵdayǵa qaramastan, biz házirshe usınday jolaqtı molekulanıń aylanıwı bolmaǵan jaǵdaydaǵı bir ν jiyiligi menen táriyipleymiz.



353-súwret.
Hár qıylı elektronlıq hallarǵa sáykes keletuǵın terbelmeli qáddiler.

Atomlarda elektronlıq qabıq hár qıylı energiyalıq hallarda tura aladı. Tap sol sıyaqlı, molekulalarda da elektronlıq qabıq hár qıylı bolǵan bir neshe hallarda tura aladı. Energiyası W_{el} shamasına teń bolǵan normal elektronlıq konfiguraciyanı hám energiyası W'_{el} shamasına teń qozǵan haldı qaraymız. Bul elektronlıq konfiguraciyalardıń hár birine yadrolar ózleriniń terbelislerine iye boladı. Nátiyjede biz terbelmeli qáddilerdiń eki jıynaǵı $W_{terb.}$ penen $W'_{terb.}$ lerdı alamız (353-súwret). Qáddilerdiń usı eki jıynaǵına sáykes keletuǵın kvant sanlardı n hám n' arqalı belgileyemiz. Bul eki gruppalardıń qáddileriniń arasındaǵı ótiwlerde jiyiligi

$$\nu = \frac{W'_{el} - W_{el}}{h} + \frac{W'_{terb.} - W_{terb.}}{h}$$

shamasına teń jaqtılıq shıǵarıladı.

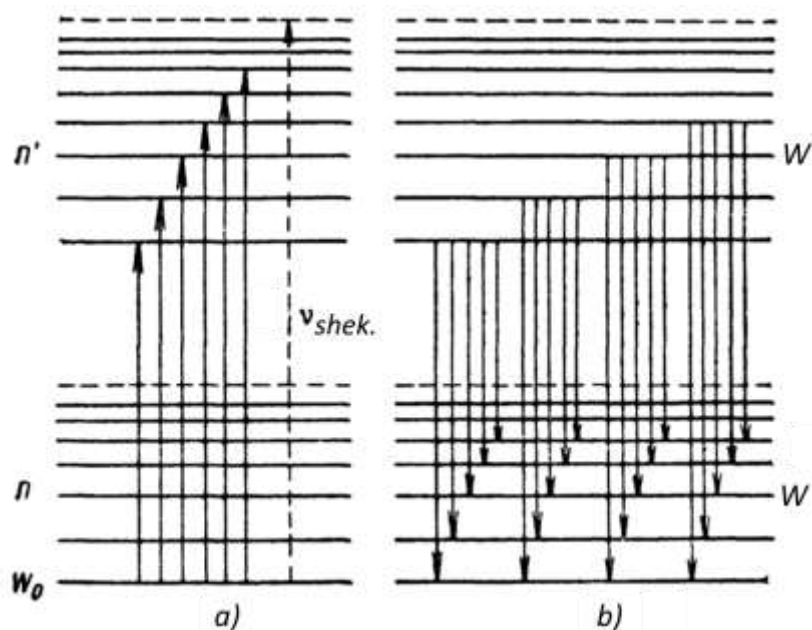
$\frac{W'_{el} - W_{el}}{h}$ shamasın ν_{el} arqalı belgilep, mınanı alamız

$$\nu = \nu_{el} + \frac{W'_{terb.} - W_{terb.}}{h}. \quad (9)$$

Elektronlıq hallardıń berilgen jubı ushın ν_{el} turaqlı shama. $W'_{terb.}$ hám $W_{terb.}$ energiyaları (2)-hám (5)-formulalar arqalı ańlatıladı. Yadrolardıń arasındaǵı óz-ara tásirlesiw kúshleriniń shaması elektronlardan ǵárezli bolǵanlıqtan, bul formulalardaǵı a hám b turaqlıları hár qıylı boladı. Qáddilerdiń eki gruppalarınıń arasındaǵı ótiwler $n - n'$ ayırmasınıń qálegen mánisinde júredi.

Haqıyqatında, molekulanıń hár bir terbelmeli halına bul jaǵdayda da aylanbalı qozǵalısqosıladı hám hár bir $n' \rightarrow n$ ótiwine jolaq sáykes keledi. Usınday jolaqlar sistemasınan payda bolǵan spektrdi elektronlıq-terbelmeli spektr dep ataydı. (9)-formuladaǵı ν_{el} additivlik aǵzasınıń bolıwınıń saldarınıń bul spektr spektrdiń kózge kórinetuǵın oblastında yamasa oǵan jaqın oblastta jaylasadı.

Dáslep elektronlıq-terbelmeli jutılıw spektrin qaraymız. Meyli, normal jaǵdayda molekula eń tómengi W_0 energiya halında turatuǵın bolsın (354a súwret). Tómengi gruppanıń joqarıraq bolǵan qáddilerine ótiwge "tiykargı ton" menen "obertonlardıń" jiyiligindey bolǵan infraqızıl jutılıw jolaqları, al joqarǵı gruppanıń qáddine ótiwge spektrdiń kózge kórinetuǵın oblastındaǵı jolaqlar sáykes keledi (yamasa oǵan jaqın bolǵan oblastlardaǵı). Dáslep joqarǵı terbelmeli qáddiler bir birinen birdey qashıqlıqlarda jaylasadı, al keyin energiyanıń 354-a súwrette punktir menen belgilengen sheklik mánisine jaqınlaǵanda bir birine jaqınlasadı. Usınıń saldarınan jutılıwdıń elektronlıq-terbelmeli jolaqları dáslep bir birinen birdey qashıqlıqlıqta jaylasadı, al keyin (úlken jiyilikler tárepine qaray jılısqanda) ν_{shek} mánisinen ótpey, kem-kemnen tıǵız jaylasa baslaydı. Solay etip, eki atomlı molekulanıń elektronlıq-terbelmeli jutıw spektri bazı bir dárejede bas seriyanıń sıızıqları jutılatuǵın jutılıw spektrine usaydı.



354-súwret. Elektronlıq-terbelmeli jolaqlardıń payda bolıwı:
a) jutılıw; b) shıǵarıw jolaqları.

Endi elektronlıq-terbelmeli shıǵarıw spektrin qaraymız. Bul jaǵdayda joqarǵı hám tómengi terbelmeli qáddilerdiń arasındaǵı qálegen ótiwlerdiń bolıwı múmkin (354b súwret). Usınıń saldarınan jolaqlardıń quramalı sisteması payda boladı. Bul sistemanıń jiyiliklerin keste túrinde kórsetiwge boladı (XXVI keste). Bul kestedek ν_{ik} arqalı $n'_i \rightarrow n_i$ ótiwde payda bolatuǵın jiyilik belgilengen. Kórinip turǵanıday, sistemanı baǵanalar menen qatarlarǵa sáykes keletuǵın ayırım gruppalarǵa bóliw múmkin. Hár bir baǵanada bir joqarǵı qáddiden múmkin bolǵan barlıq tómengi qáddilerge ótiwde payda bolatuǵın jolaqlardıń jiyilikleri tur. Hár bir qatarda berilgen tómengi

qáddige joqarıdağı múmkin bolğan barlıq qáddilerden ótiwdiń saldarınan payda bolatuǵın jolaqlardıń jiyilikleri tur.

Trebelmeli qáddilerdiń sxemasınıń durıs ekenligi eksperimentlerde eki atomlardıń puwlarınır fluorescenciyanı izertlegende tastıyqlanadı. Bul tájiriybeler atomlıq spektrlerdegi fluorescenciyanı baqlaw boyınsha ótkerilgen tájiriybelerdey túrinde ótkeriledi (328-súwret). Meyli, barlıq molekulalar eń tómengi $n = 0$ bolğan qáddide jaylasqan bolsın. Puwlardı jiyiligi ν_{i0} shamasına teń bolğan monoxromat jaqtılıq penen jaqtılandırǵanda molekulalar normal haldan $n' = i$ bolğan halǵa ótkeriledi. Bul $n' = i$ haldan keri baǵıtta molekula qálegen tómengi terbelmeli halǵa óte aladı (355a súwret), usınıń nátiyjesinde fluorescenciyanıń spektrinde jiyilikleri ν_{ik} shamasına teń ($k = 0, 1, 2, 3, \dots$) hám XXVI kesteniń bir baǵanasına tiyisli bolğan jolaqlardıń gruppası qatnasadı.

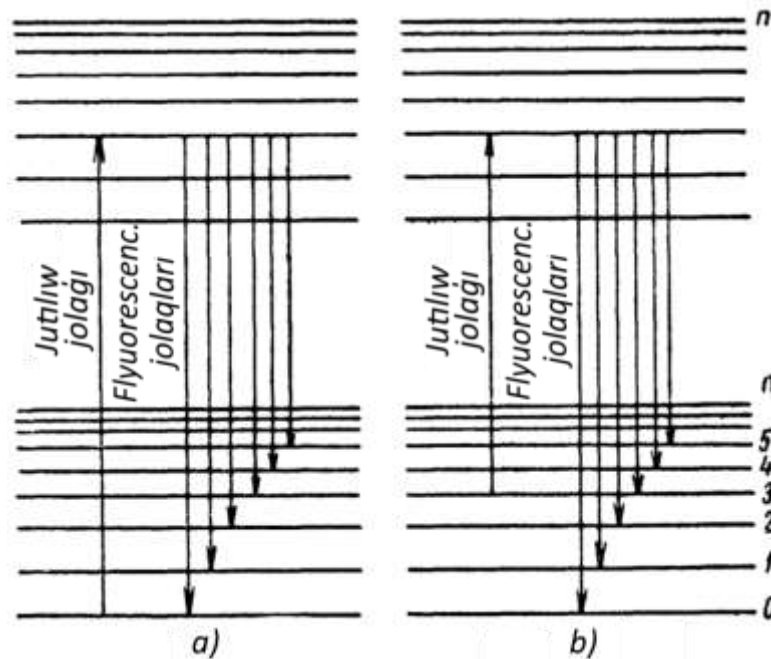
XXVI keste.

$n \backslash n'$	0	1	2	3	4
0	ν_{00}	ν_{10}	ν_{20}	ν_{30}	ν_{40}
1	ν_{01}	ν_{11}	ν_{21}	ν_{31}	ν_{40}
2	ν_{02}	ν_{12}	ν_{22}	ν_{32}	ν_{41}
3	ν_{03}	ν_{13}	ν_{23}	ν_{33}	ν_{42}
4	ν_{04}	ν_{14}	ν_{24}	ν_{34}	ν_{43}

Solay etip, fluorescenciya spektri onı qozdıratuǵın spektrge salıstırǵanda ádewir quramalı boladı (biz qarap atırǵan jaǵdayda jiyiligi ν_{i0} shamasına teń bir jolaq). Fluorescenciyanıń spektrinde ν_{i0} jiyiligine sáykes keletuǵın jiyilikten basqa barlıq jiyilikler qozdaratuǵın jaqtılıqtıń jiyiliginen kishi: $k = 1, 2, 3, \dots$ bolğan jaǵdayda $\nu_{ik} < \nu_{i0}$. Basqa sóz benen aytqanda *fluorescenciyanıń spektri qozdırıwshı jaqtılıqtıń tolqın uzınlıǵına teń yamasa onnan úlken tolqın uzınlıqlarına iye jaqtılıqtan turadı*. Ol qozdırıwshı spektrge salıstırǵanda qızıl tárepke qaray jılısqan. Bul juwmaq birinshi ret tájiriybelerde alınǵan maǵlıwmatlardı tallawdıń nátiyjesinde Stoks tárepinen molekulalıq spektrler teoriyası payda bolmastan ádewir burın alındı hám *Stoks qaǵıydası* dep ataladı.

Eger dáslep molekulalardıń bir bólimi qozǵan terbelmeli hallarda turatuǵın bolsa, onda Stoks qaǵıydasınan sheginiwdiń orın alıwı múmkin. Al molekulalardıń qozǵan terbelmeli hallarda bolıwı jıllılıq qozǵalıslarınıń esabınan júzege keliwi múmkin.

Eger, misalı, molekulalardıń bir toparı $n = 3$ bolğan qozǵan terbelmeli halda turatuǵın bolsa (355b súwret), onda jiyiligi ν_{i3} bolğan jaqtılıqtı jutqanda fluorescenciya spektrinde Stoks qaǵıydasın qanaatlandıratuǵın $k = 3, 4, 5, \dots$ ke sáykes keletuǵın ν_{ik} jolaqları da, Stok qaǵıydasına qayshı keletuǵın $\nu_{i2}, \nu_{i1}, \nu_{i0}$ jolaqları da boladı.



355-súwret. Fluorescenciya jolaqlarınıń payda bolıwı:
a) Stok qağıydasın qanaatlandıratuǵın; b) Stok qağıydasına qayshı keletuǵın.

§ 356. Molekulalardıń aylanıw spektrleri. Kvantlıq mexanika qattı eki atomlı molekulanıń aylanıwınıń energiyasınıń mınaday mánislerge iye bola alatuǵınlıǵın kórsetedi:

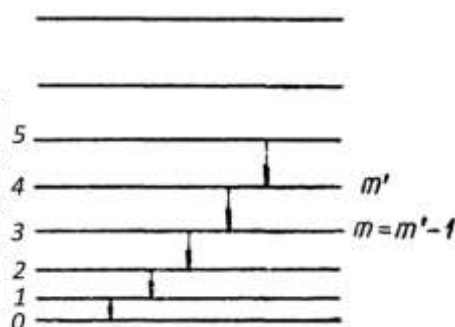
$$W_{ayl.} = \frac{\hbar^2}{2J} m(m+1). \quad (1)$$

Bul teńlikte $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ - aylanıw kvant sanı. J shaması molekulanıń inerciya momenti bolıp tabıladı. (1)-formuladan kórinip turǵanıday, m niń úlkeyiwi menen aylanıw qáddilerin bir birinen kem-kemnen uzaqlasadı (356-súwret). Molekula normal elektronlıq halda eń tómengi terbelmeli halda ($n = 0$) jaylasadı dep boljaymız. Aylanıw qáddileriniń arasındaǵı ótiwlerdi qaraymız. Bul ótiwler

$$\Delta m = \pm 1 \quad (2)$$

saylap alıw qağıydasına baǵınadı.

$\Delta m = -1$ mánisi jaqtılıqtıń shıǵarılıwı processine, al $\Delta m = +1$ jaqtılıqtıń jutılıw processine sáykes keledi.



356-súwret.
Molekulanıń aylanıw qáddileri.

m' hám $m = m' + 1$ kvant sanları menen táriyiplenetuǵın qońsılas aylanıw qáddileriniń arasındaǵı ótiwde shıǵarılatuǵın jaqtılıqtıń jiyiligi ν di tabamız. (1)-formula boyınsha bul jiyilik (sm^{-1} lerdegi)

$$\nu = \frac{\Delta W_{ayl.}}{hc} = \frac{\hbar^2}{2Jhc} [m'(m'+1) - (m'-1)m']$$

yamasa

$$\nu = \frac{\hbar}{4\pi Jc} \cdot 2m' \quad (3)$$

ańlatpalarınń járdeminde ańıqlanadı. m kvant sanındaǵı shtrix bizlerdiń sızıqlardı joqarǵı qáddilerdiń kvant sanları menen sanaytuǵınlıǵımız benen baylanıslı.

$$\frac{\hbar}{4\pi Jc} = B \quad (4)$$

belgilewin kirgizemiz. Bunday jaǵdayda ν jiyiligi ushın

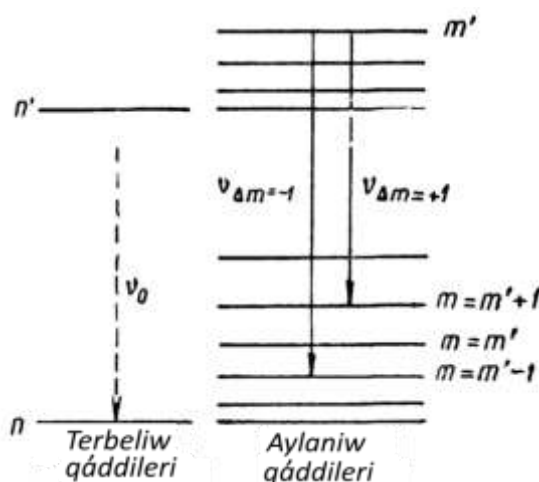
$$\nu = 2Bm' \quad (3a)$$

ańlatpasına iye bolamız. Bul ańlatpada $m' = 1, 2, 3, \dots$ ($m' = 0$ teńligi eń tómeni qáddige sáykes keledi, bul qáddiden jaqtılıqtıń shıǵarılıwı menen bolatuǵın ótiwdiń bolıwı múmkin emes). (Za) formula bir birinen birdey qashıqlıqta jaylasqan bir qatar sızıqlardı beredi. Bul sızıqları alıstaǵı infraqızıl oblastta jaylasqan hám júzlegen mikron tolqın uzınlıǵına iye. Birotala mınaǵan iye bolamız: eki atomlı molekulalardıń taza aylanbalı spektri júdá alıstaǵı infraqızıl oblastta jaylasqan bir birinen birdey qashıqlıqlarda jaylasqan sızıqlardan turadı. Qońısılas sızıqlardıń arasındaǵı qashıqlıq B konstantasınıń mánisin tabıwǵa múmkinshilik beredi. Bul konstanta (4)-formula boyınsha molekulanıń inerciya momenti J menen baylanısqan. Inerciya momentleri ushın shama menen $10^{-40} \text{ g}\cdot\text{sm}^2$ shamasındaǵı mánis alınadı. Mısalı, HCl molekulası ushın $J = 2,61 \cdot 10^{-40} \text{ g}\cdot\text{sm}^2$.

Yadrolardıń massalarınıń belgili bolǵan mánisleri boyınsha eki atomlı molekuladaǵı yadrolardıń arasındaǵı teń salmaqlıq qashıqlıq r_0 di esaplawǵa boladı. CH molekulası ushın $r_0 = 1,12 \text{ \AA}$ shaması alınadı. Bul shama basqa da tallawlarda alınǵan molekulalardıń ólshemlerine sáykes keledi.

357-súwret.

Molekulanıń terbelmeli-aylanıw qáddileri.



Molekulanıń aylanıwına sáykes keletuǵın energiya ushın jazılǵan (1)-formula juwıq formula bolıp tabıladı. Molekulanıń aylanıwınıń ádewir úlken bolǵan múyeshlik tezliklerde onı qattı dep esaplawǵa bolmaydı: teń salmaqlıq qashıqlıq r_0 diń shaması oraydan qashıwshı kúshlerdiń tásirinde úlkeyedi. Bunday jaǵdayda (1)-formulanı

$$W_{ayl} = hc[Bm(m+1) - Cm^2(m+1)^2]$$

formulası menen almasırwıw kerek boladı. Bul formulada C - ekinshi konstanta, onıń mánisi B dan kishi.

Endi bir elektronlıq konfiguraciyaǵa kiretuǵın eki terbelmeli n hám n' qáddilerin qaraymız. Molekulanıń aylanıwınıń nátiyesinde terbelmeli qáddilerdiń hár biri m hám m' kvant sanları menen táriyiplenetuǵın bir qatar aylanıw qáddilerine ajıraladı (357-súwret). Aylanbalı qáddilerdiń bir gruppasınan ekinshisine ótkendegi shıǵarılatuǵın jaqtılıqtıń jiyiligi mınaǵan teń:

$$\nu = \frac{\Delta W_{\text{terb.}}}{hc} + \frac{\Delta W_{\text{ayl.}}}{hc}.$$

Aylanıw bolmağan jaǵdayda $\nu_0 = \frac{\Delta W_{\text{terb.}}}{hc}$ jiyiligi shıǵarılǵan bolar edi. $n - n' = -1$ teńligi orın alǵanda molekulanıń terbelmeli spektriniń "tiykargı tonı" bolǵan bolar edi (355-paragraf). Endi molekulanıń aylanıwına baylanıslı spektr quramalı boladı. Aylanıw energiyası $W_{\text{ayl.}}$ ushın (1)-ańlatpanı paydalanamız. Bunday jaǵdayda

$$\nu = \nu_0 + B[m'(m' + 1) - m(m + 1)] \quad (5)$$

teńligine iye bolamız.

(2)-saylap alıw qaǵıydası boyınsha $\Delta m = m - m' = \pm 1$. $\Delta m = -1$ bolǵan jaǵdayda (5)-formula mínanı beredi:

$$\nu = \nu_0 + 2Bm'. \quad (5a)$$

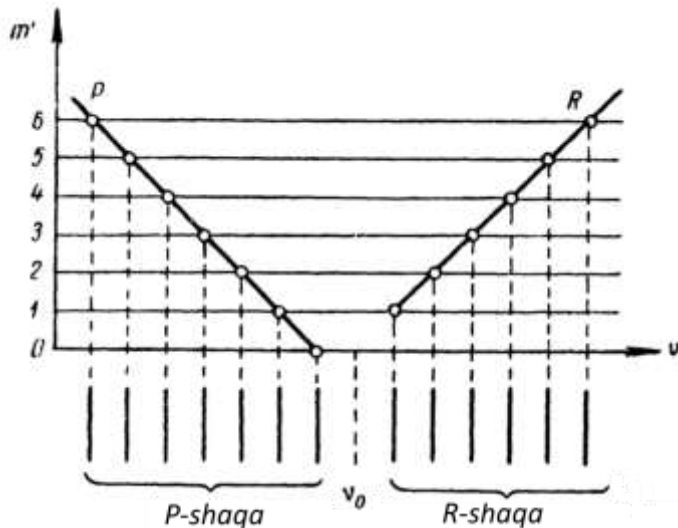
Bunda $m' = 0, 1, 2, \dots$

Tap sol sıyaqlı, $\Delta m = +1$ bolǵan jaǵday ushın mínanı alamız:

$$\nu = \nu_0 - 2B(m' + 1). \quad (5b)$$

(5a) hám (5b) formulaları sızılardıń eki *shaqasın* beredi dep aytadı. Olardıń birinshisi ($\Delta m = -1$) teris yamasa *R-shaqa*, ekinshisi ($\Delta m = +1$) — oń yamasa *P-shaqa* dep ataladı. Eki shaqadaǵı sızılardıń jaylasıwın anıǵıraq túsiniw ushın tómendegidey grafikalıq súwretti sızamız. Ordinata kósherine pútın bolǵan m' sanların, al abscissa kósherine jiyilik ν diń mánislerin qoyamız (358-súwret). m' shamasınıń úzliksiz funkciyaları dep qaralatuǵın (5a) hám (5b) ańlatpalardı eki *P* hám *R* tuwrıları sáykes keledi. Tuwrılardıń m' shamasınıń pútın mánislerine sáykes keletuǵın noqatlarınıń abscissaları (358-súwrette dóńgelekler menen belgilengen) eki shaqadaǵı sızılardıń jaylasıwın beredi. Eki shaqanıń sızılardı $\nu = \nu_0$ noqatına qarata simmetriyalı jaylasqan. SHAqalardıń hár qaysısında sızılıq bir birinen birdey bolǵan $2B$ qashılıǵında jaylasadı; shaqalar bir birinen $4B$ qashılıǵında jaylasadı. Molekula aylanbaǵan jaǵdayda n' penen n terbelmeli qáddileriniń arasındaǵı ótiwge sáykes keletuǵın ν_0 jiyiligi spektrde baqlanbaydı. Sebebi, ol qadaǵan etilgen $\Delta m = 0$ ótiwine sáykes keledi. *P*-shaqanıń sızılardı ν_0 diń kishi jiyilikler (úlken tolqın uzınlıqları) tárepinde jatadı; *R*-shaqanıń sızılardı ν_0 diń úlken jiyilikler (kishi tolqın uzınlıqları) tárepinde jatadı. Usınday tiptegi spektr terbelmeli-aylanıw spektr atamasına iye. ν_0 additivlik turaqlısıń bar bolıwınıń saldarınan terbelmeli-aylanıw spektri aylanıw spektrge salıstırǵanda kishi tolqın uzınlıqları tárepke jılısqan, ol jeńil molekulalar ushın bir neshe mikronga teń λ lerde hám awır molekulalarda bir neshe onlaǵan mikronlarǵa teń λ lerde jatır.

Taza aylanbalı spektrdiń sızılardıń arasındaǵı jiyiliklerdiń ayırması sıyaqlı terbelmeli-aylanıw spektriniń sızılardıń arasındaǵı jiyiliklerdiń ayırması boyınsha molekulanıń inerciya momenti J di tabıwǵa boladı. Terbelmeli-aylanıw spektrindegı sızılardıń intensivligi ózine tán ózgeshelikke iye. Bunday ózgeshelik 359-súwrette *HCl* molekulası ushın kórsetilgen. Ajırata alıw kúshi jetkilikli bolmaǵan ásbaptıń járdeminde usınday sızılardıń gruppasın baqlaǵanda hár bir shaqanıń ayırım sızılardı bir birine qosıladı hám eki keń jolaq payda boladı.



358-súwret.
Terbelmeli-aylanıw spektrdiń P –
hám R – shaqalarınń grafigi.

Eń aqırında energiyanıń barlıq úsh tipi (elektronlıq, terbelmeli, aylanıw) bir waqıtta ózgeretuǵın jaǵdaydı qaraymız. Bunday jaǵdayda berilgen jup qáddilerdiń arasındaǵı ótiwde (360-súwret) shıǵarılgan jaqtılıqtıń jıyılıǵı ν mınaǵan teń (sm^{-1} lerde):

$$\nu = \frac{\Delta W_{el.}}{hc} + \frac{\Delta W_{terb.}}{hc} + \frac{\Delta W_{ayl.}}{hc}.$$

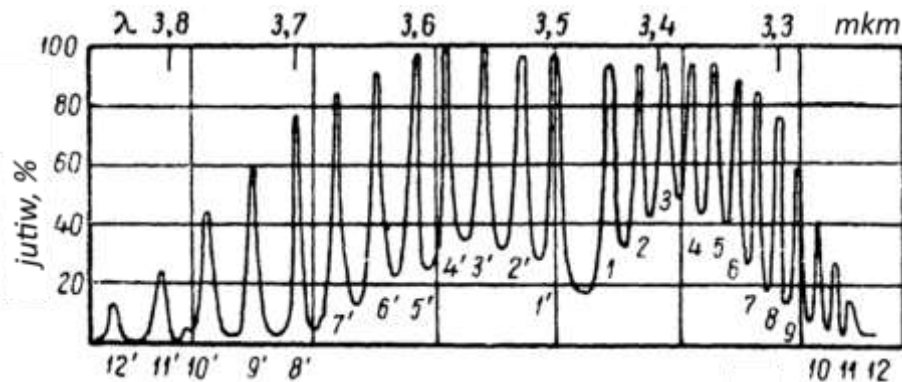
Bunnan keyin

$$\frac{\Delta W_{el.}}{hc} + \frac{\Delta W_{terb.}}{hc} = \nu_{et}$$

belgilewin qabıl etemiz. Bunday jaǵdayda

$$\nu = \nu_{et} + \frac{\Delta W_{ayl.}}{hc}$$

ańlatpasına iye bolamız.



359-súwret. HCl molekulasınıń terbelmeli-aylanıw spektri.

Berilgen ν_{et} niń mánisinde biz elektronlıq-terbelmeli spektrdiń (355-paragraf) belgili bolǵan jolaǵı menen is alıp baramız. $\Delta W_{ayl.}$ shamasınıń múmkin bolǵan mánislerine jolaqtıń ayırım sızıqları sáykes keledi. Solay etip elektronlıq-terbelmeli spektrdiń hár bir jolaǵı quramalı aylanbalı strukturaǵa iye bolıp shıǵadı.

Jolaqtaǵı ayırım sızıqlardıń orınların anıqlaymız. Onıń ushın $W_{ayl.}$ ushın jazılǵan (1)-ańlatpadan paydalanamız. Biraq, biz endi hár qıylı elektronlıq konfiguraciyalardaǵı yadrolardıń arasındaǵı óz-ara tásirlesiw kúshleriniń hár qıylı bolatuǵınlıǵın názerde tutıwımız kerek. Demek, teń salmaqlıq r_0 qashıqlıǵı da, intenciya momenti J da hár qıylı boladı. Sonlıqtan aylanıw qáddileriniń eki gruppalar ushın B turaqlıları hár qıylı boladı.

Nátiyjede biz

$$\nu = \nu_{et} + B'm'(m' + 1) - Bm(m + 1) \quad (6)$$

ańlatpasın alamız.

(2)-saylap alıw qaǵıydası boyınsha $m - m' = \pm 1$. Bul aylanıw hallarınıń ekewi de bir elektronlıq konfiguraciyaǵa tiyisli bolǵan jaǵdayda orınlanadı. Eger elektronlıq konfiguraciýalar hár qıylı bolsa, onda, ulıwma aytqanda, $m - m' = 0$ bolǵan ótiwlerdiń orın alıwı múmkin boladı ($m = m' = \pm 1$ bolǵan jaǵdaydan basqa). Sonlıqtan, P - shaqa ($m - m' = +1$) hám R - shaqa ($m - m' = -1$) menen bir qatarda $m - m' = 0$ ótiwine sáykes keletuǵın úshinshi Q -shaqa (yamasa nollik) dep atalatuǵın shaqa payda boladı.

Bul shaqalardı óz aldına qaraymız.

1) P - shaqa: $m - m' = +1$.

(6)-formula boyınsha mınaǵan iye bolamız:

$$\nu = \nu_{et} + B'm'(m' + 1)^2 - B(m' + 1)(m' + 2).$$

Ápiwayı algebralıq túrlendiriwlerden keyin bul formula mınaday túrge enedi:

$$\nu = \nu_{et} + (B' - B)(m' + 1)^2 - (B' + B)(m' + 1). \quad (6a)$$

Bul formulada

$$m' = 0, 1, 2, 3, \dots$$

2) Q -shaqa: $m - m' = 0$.

ν jiyiligi ushın (6)-ańlatpa boyınsha

$$\nu = \nu_{et} + (B' - B)m'^2 + (B' - B)m'. \quad (6b)$$

Bul formulada

$$m' = 1, 2, 3, \dots$$

3) R -shaqa: $m - m' = -1$.

Bul jaǵdayda (6)-formula mınanı beredi:

$$\nu = \nu_{et} + (B' - B)m'^2 + (B' + B)m'. \quad (6c)$$

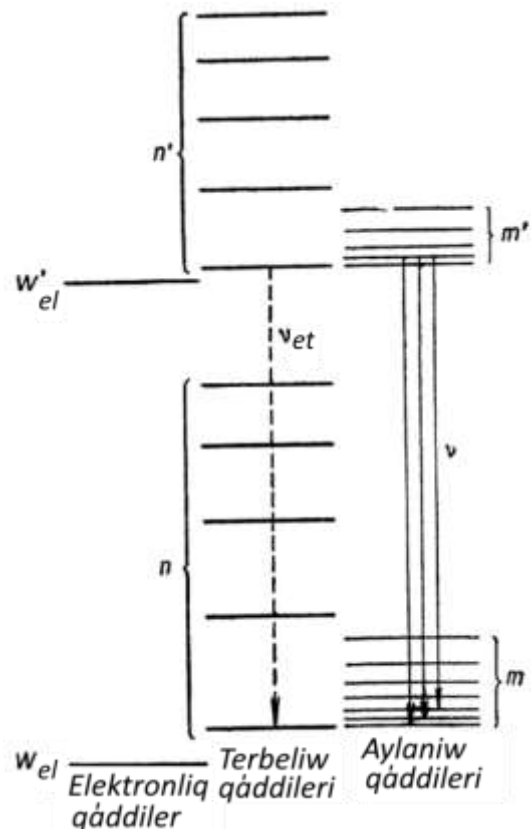
Bul formulada

$$m' = 1, 2, 3, \dots$$

Barlıq úsh shaqanı 358-súwrettegi grafikke sáykes keletuǵın grafiktiń járdeminde kórsetiwge boladı (361-súwret). Bul grafikte abscissa kósherine ν jiyilikler, al ordinata kósherine pútin sanlar bolǵan m' ler qoyılǵan. Hár bir shaqa ushın (6a), (6b) hám (6c) teńlemelerge sáykes parabolalar bolıp tabılatuǵın iymekliklerdi alamız. SHAqalardagı sızıqlardıń orınları iymekliktiń m' tır pútin mánislerine sáykes keletuǵın P, Q, R noqatlarınıń abscissaları boyınsha anıqlanadı. Ayırım shaqalardıń sızıqları bir biriniń ústine túsedı. $\nu = \nu_{et}$ noqatında sızık bolmaydı, sebebi $m' = 0 \rightarrow m = 0$ ótiwi "qadaǵan etilgen". Kórinip turǵanıday, sızıqlar $\nu = \nu_{et}$ noqatınıń qasında jiyi jaylasadı (ayırıqsha P -shaqası iyilgen orında⁴⁵). Eger $B' > B$ teńsizligi orınlanatuǵın bolsa, onda P -shaqası ósiwshi jiyilikler baǵıtında iyeledi (bul jaǵday 361-súwrette kórsetilgen). Bunday jaǵdayda jolaqtaǵı sızıqlar úlken jiyilikler tárepke qaray taraladı; usınday jolaq haqqında gáp etkende onı spektrdiń fiolet tárepine sayasın túsiredi dep aytadı. $B' < B$ teńsizligi orınlanatuǵın jaǵdayda jolaq spektrdiń qızıl tárepine sayasın túsiredi. Jolaqlardıń eki tipi de ushırasadı. $B' > B$ teńsizligi orınlanatuǵın jaǵday molekulanıń qozǵan halda kishi inerciya momentine iye, usıǵan sáykes yadrolardıń arasındagı teń salmaqlıq qashıqlıq r_0 diń normal haldaǵıǵa salıstırǵanda kishi bolatuǵınlıǵın kórsetedi.

⁴⁵ Rus tilindegi "tochka peregiba" sózi qaraqalpaq tiline "iyiliw noqatı" dep awdarılǵan (Awdarıwshılar).

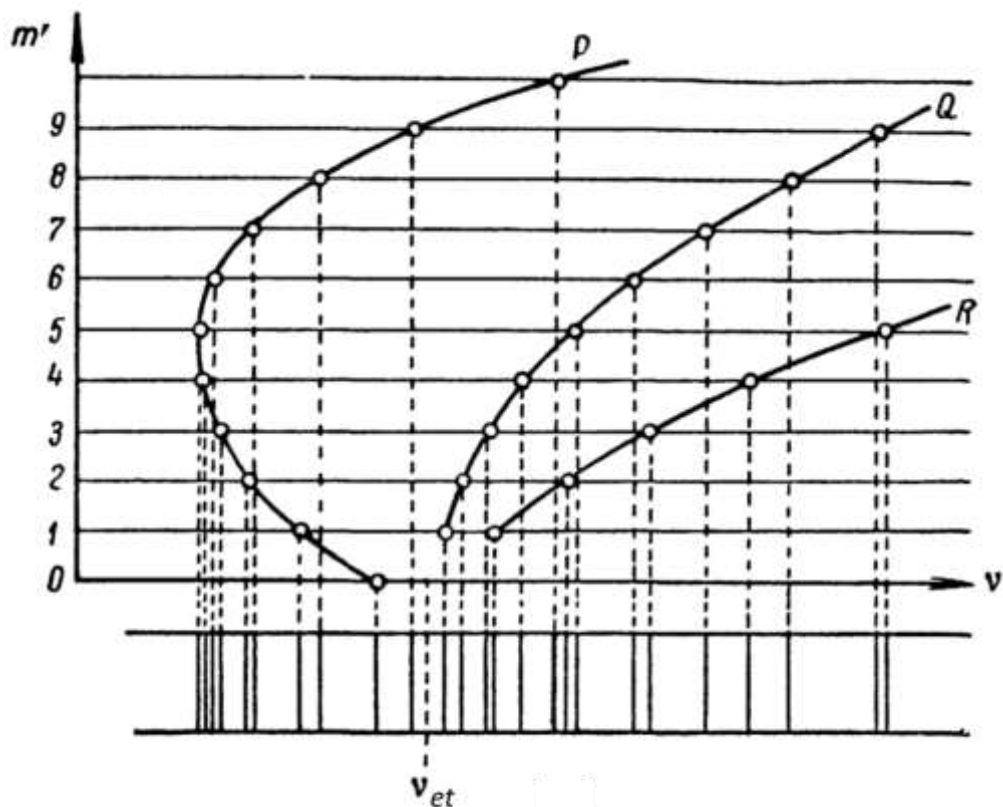
360-súwret.
Eki atomlı molekulalardıń elektronlıq,
terbeliw hám aylanıw qáddileri.



B shaması molekulanıń inerciya momentine keri proporcional bolǵanlıqtan, jeńil molekulalar keńirek aylanıw jolaqlarına, al awır molekulalar tarlaw aylanıw jolaqlarına iye boladı. Mısalı, LiH molekulaları ushın jolaқтаǵı ayırım sıızıqlar bir birinen jetkilikli dárejede alısta jaylasqan, al awır J_2 molekulası ushın olar júdá tar jaylasqan.

§ 357. Eki atomlı molekulanıń elektronlıq halları. 354-súwrette biz molekuladaǵı ishki elektronlardıń erkin atomlarda bar bolatuǵın jabıq orbitalarday bolǵan jabıq orbitalardı payda etetuǵınlıǵın kórsettik. Molekulalardaǵı sırtqı elektronlar bolsa atomlardaǵıǵa salıstırǵanda pútkilley basqa sharayatlarda jaylasadı: olar eki yadronıń elektr maydanında qozǵaladı. Bul elektr maydanı kósherlik simmetriyaǵa iye, al eki yadronı tutastıratuǵın tuwrı simmetriya kósheri bolıp tabıladı. Solay etip, eki atomlı molekulada sırtqı elektronlar baǵıtlanuǵın artıqmash baǵıt boladı. Sonlıqtan, eger eki atomlı molekulada paydalanıw ushın elektronnıń orbitalıq momenti p_l haqqında emes, al onıń molekulanıń kósherine túsirilgen p_{lz} proekciyası haqqında gáp etken mániske iye boladı. Bul p_{lz} proekciyanıń mánisleri $p_{lz} = \lambda \hbar$ mánislerine iye boladı, bul teńlikte λ arqalı 0, 1, 2, ... shamalarına teń kvant sanı belgilengen. λ kvant sanı atomlardaǵı p_l momentiniń sırtqı maydanniń baǵıtına túsirilgen proekciyasın anıqlaytuǵın m_l kvant sanına usaydı. λ niń berilgen hár bir mánisinde ($\lambda = 0$ mánisinen basqa) proekciyanıń molekulanıń kósherine salıstırǵandaǵı eki baǵıtınıń bolıwı múmkin. λ niń hár qıylı mánislerine sáykes keletuǵın elektronlıq hallar atomlardaǵıday etip belgilenedi, biraq latin hárifleriniń ornına grek hárifleri paydalanıladı. Bunday jaǵdayda

λ niń 0, 1, 2, ... shamalarına teń mánislerine
 $\sigma, \pi, \gamma, \dots$ hárifleri sáykes keledi.



361-súwret. Elektronlıq-terbeliw-aylanıw spektriniń P —, Q — hám R — shaqalarınıń grafigi.

Eger elektronlıq qabıqtıń quramına bir neshe elektron kiretuǵın bolsa, onda bul qabıqtıń halın momentlerdiń proekciyalarınıń molekulanıń kósherine túsirilgen proekciyalarınıń qosındı mánisiniń, yaǵnıy $\sum p_{lz}$ summasınıń járdeminde táriyiplewge boladı. Bul summanıń mánisi λ_i kvant sanlarınıń algebralıq qosındısına teń bolǵan Λ kvant sanınıń járdeminde anıqlanadı:

$$\Lambda = \sum \lambda_i. \quad (1)$$

Elektronlıq qabıqlardıń halı da háriplerdiń járdeminde belgilenedi hám

Λ niń 0, 1, 2, ... mánislerine

$\Sigma, \Pi, \Delta, \dots$ háripleri sáykes keledi.

Álbette, eki σ -elektronǵa bir Σ halı sáykes keledi. Sebebi λ_1 hám λ_2 kvant sanlarınıń ekewi de nolge teń. Eger $\lambda_1 = 1$ hám $\lambda_2 = 1$ kvant sanlarına iye eki π -elektron bolsa, onda Λ kvant sanı eki mániske iye boladı: $1 - 1 = 0$ hám $1 + 1 = 2$. Birinshi jaǵdayda qabıqtıń halı Σ simvolı menen, al ekinshi jaǵdayda Δ simvolı menen belgilenedi.

Atomdaǵı sıyaqlı, molekuladaǵı hár bir elektronnıń spinlik momenti onıń sırttan túsirilgen baǵıtqa (biz qarap atırǵan jaǵdayda molekulanıń kósherine) túsirilgen proekciyası mınaday eki mániske iye boladı:

$$p_{sz} = \pm \frac{1}{2} \hbar.$$

Eger elektronlıq qabıqtıń quramına bir neshe elektron kiretuǵın bolsa, onda elektronlardıń spin momentleriniń molekulanıń kósherine túsirilgen proekciyalarınıń summasın qaraw kerek boladı. Bul summa Σ arqalı belgilenetuǵın kvant sanı menen anıqlanadı (molekulanıń $\Lambda = 0$ teńligine iye bolǵan elektronlıq qabıǵınıń belgileniwi menen aljastırmaw kerek). Aqırında, barlıq momentlerdiń proekciyalarınıń tolıq qosındısın (orbitalıq hám spinlik) $\Omega = \Lambda + \Sigma$ kvant sanınıń járdeminde anıqlaydı. Λ niń hár bir berilgen mánisinde Ω kvant sanı $2S + 1$ mániske iye boladı. Bul elektronnıń qosındı spinlik momenttiń molekulanıń kósherine salıstırǵandaǵı múmkin bolǵan $2S + 1$ orientaciyasına sáykes keledi. [S - elektronlardıń qosındı spinlik momentleriniń kvant sanı (349-paragrafqa qarańız)]. Solay etip, atomda orın alǵan jaǵdaydaǵıday, biz qáddilerdiń multipletlik ajıralıwına iye bolamız. Multipletlik dárejesi termniń

simvolınıń shep tárepinde joqarıǵa jazıladı; Ω kvant sanınıń mánisi indeks túrinde qoyıladı. Mısalı, molekulanıń elektronlıq qabıǵı tek bir π -elektronnan turatuǵın bolsa, onda $\Lambda = 1$ hám molekulanıń halı Π -hal bolıp tabıladı. Bunday jaǵdayda elektronnıń spinlik momentiniń proekciyası $\pm \frac{1}{2} \hbar$ shamasına teń boladı, bunnan Ω kvant sanı ushın múmkin bolǵan eki mánis alınadı:

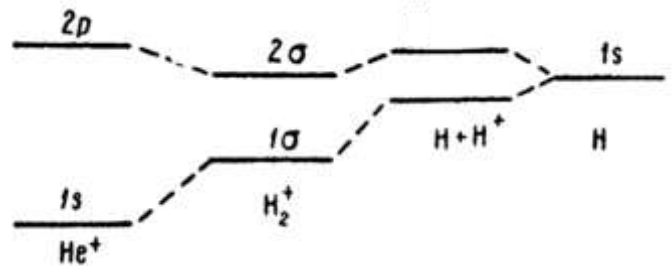
$$\Omega = 1 - \frac{1}{2} = \frac{1}{2}; \quad \Omega = 1 + \frac{1}{2} = \frac{3}{2}.$$

Nátiyjede biz dubletlik Π -haldı alamız: ${}^2\Pi_{1/2}$ hám ${}^2\Pi_{3/2}$.

Atomdaǵı sıyaqlı, molekuladaǵı elektronlar da Pauli principin qanaatlandıradı. Usı jaǵdayǵa sáykes, molekulada ekiden aslam σ -elektronlardıń, tórtten artıq π -elektronlardıń, tórtten artıq δ -elektronnıń bolıwı múmkin emes.

362-súwret.

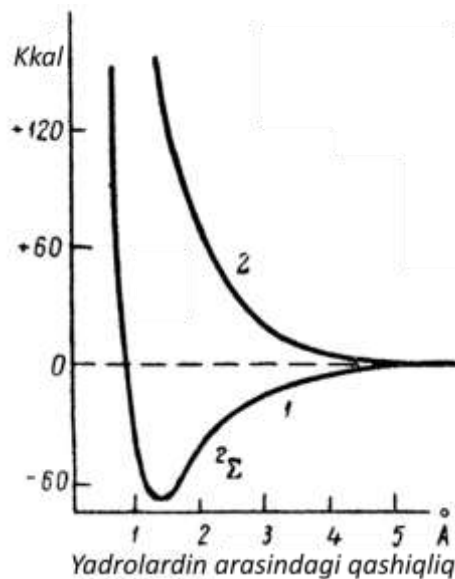
Molekulalıq H_2^+ ionnıń qáddilerin atom túrindegi vodorod H penen He^+ geliy ionnıń qáddileri menen salıstırıw.



Qáddilerdiń arasındaǵı ótiwler

$$\Delta\Lambda = 0, \pm 1$$

saylap alıw qaǵıydasın qanaatlandıradı.



363-súwret.

H_2^+ molekulalıq ionnıń potentsiallıq iymeklikleri.

Molekulanıń energiya qáddilerin usı molekulanı payda etken atomlardıń energiya qáddileri menen salıstırıwǵa boladı. Bunday salıstırıwdı oyımızda dáslep júdá úlken qashıqlıqta jaylasqan eki atomdı bir birine jaqınlastırıw hám olardıń bir birine tásir etiwın esapqa alıw jolı menen islewge boladı. Bul usıldı molekulalıq H_2^+ ionnıń payda bolıwınıń eń ápiwayı mısasında qaraymız. Bul iondı neytrallıq vodorod atomı H penen proton H^+ tan payda bolǵan dep esaplawǵa boladı. Usı eki bólekshe bir birinen kúshli qashıqlatılǵan jaǵdayda vodorod atomı óziniń ádettegidey qáddileriniń jıynaǵına iye boladı; onıń jalǵız elektronınıń eń tereń halı $1s$ halı bolıp tabıladı (362-súwret, oń bólim). Proton H atomına jaqınlasqanda atom túrindegi vodorod protonnıń elektr maydanına kiredi hám SHtark qubılısı júzege keledi; nátiyjede $1s$ qáddi eki qáddige ajıraladı. H atomı menen H^+ protonnıń onnan da jaqınlasıwında ajırılǵan eki qáddi awısıwǵa ushıraydı. Eger, eń aqırında, biz oyımızda H^+ protondı H atomınıń orayına molekula payda bolatuǵınday dárejede jaqınlastırsaq, onda zaryadı $E = 2e$ bolǵan yadrodan hám bir elektronnan turatuǵın birden-bir sistema payda boladı. Bul sistema geliydiń ionlasqan ionı He^+ bolıp tabıladı (atomlıq

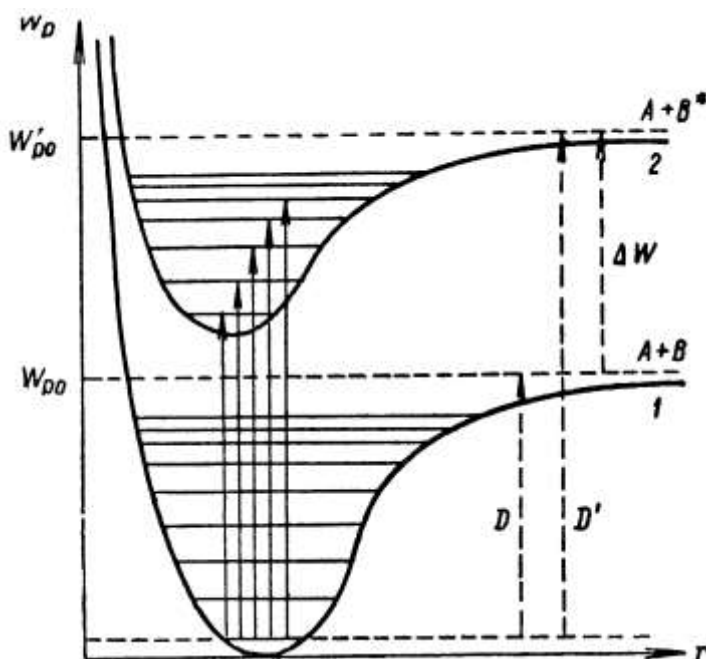
salmağı 2 ge teń bolǵan onıń izotopı). Bul ionnıń qáddileriniń 1s penen 2p bolatuǵınlıǵın kórsetiwge boladı (362-súwrettıń shep bólimi). Solay etip, vodorodtıń ajırılǵan 1s termi He^+ niń eki qáddine aylanadı. H penen H^+ bóleksheleriniń qanday da bir aralıqlıq jaǵdayı 1s hám 2s molekualıq qáddilerge iye bolǵan molekualıq ion H_2^+ bolıp tabıladı. 1s hám 2s qáddileri vodorod atomınıń 1s qáddine hám He^+ ionınıń 1s hám 2s qáddilerine sáykes keledi. 1s qáddine minimumǵa iye potenciallıq energiyanıń (363-súwrettegi 1-iymeklik) hám, usıǵan sáykes, molekulanıń $^2\Sigma$ halınıń ornıqlı halınıń sáykes keletuǵınlıǵın kórsetiwge boladı. 2s halına úzliksiz ósetuǵın iymeklik sáykes keledi (363-súwrettegi 2-iymeklik). Bul jaǵday usı halda H penen H^+ bóleksheleriniń arasında barlıq waqıtta iyterilis kúshleriniń orın alatuǵınlıǵı hám ornıqlı molekulanıń payda bolmaytuǵınlıǵın ańǵartadı.

§ 358. Molekulalardıń dissociaciya. 355-paragrafta terbelmeli qáddilerdiń jılısıp barıw ornınıń yadrolardıń bir birinen sheksiz qashıqlasıwına, yaǵnıy molekulanıń dissociaciyasına sáykes keletuǵınlıǵın atap óttik. Dissociaciya energiyası D (dissociaciya "jıllılıǵı") molekulanıń normal haldan dissociaciyalanǵan halǵa ótiw jumısı menen anıqlanadı. Bul jumıstıń shaması W_{p0} shamasınıń mánisine jaqın (364-súwret). Eger molekula normal halda terbelmegen jaǵdayda onıń mánisi W_{p0} shamasınıń mánisine dál teń bolǵan bolar edi. Haqıyqatında, $\frac{1}{2}a$ shamasına teń terbelislerdiń "nollik" energiyasınıń bar ekenligin kórdik (355-paragraf). Sonlıqtan dissociaciya energiyası $D = W_{p0} - \frac{1}{2}a$ shamasına teń boladı. Biraq, $\frac{1}{2}a \ll W_{p0}$ teńsizligi orınlanatuǵın bolǵanlıqtan, biz juwıq túrde

$$D = W_{p0} \quad (1)$$

teńligi ornınlı boladı dep esaplaymız.

Dissociaciya energiyası D nıń mánisin anıqlaw usılların qaraymız. Bul energiyanı terbelmeli qáddilerdiń jıynalıw ornı boyınsha anıqlaw múmkin. Elektronlıq-terbeliw spektrinen bir baǵanaǵa tiyisli bolǵan (berilgen joqarǵı hám hár qıylı tómengi qáddiler) $\nu_{i0}, \nu_{i1}, \nu_{i2}, \dots$ jiyiliklerin tawıp (XXVI kestege qarańız), olardıń qatarın bunnan keyingi jiyiliklerdiń arasındaǵı ayırma $\Delta\nu_{ik}$ nolge umtılatuǵın ν_{shek} mánisinine interpolyciyalaw kerek. ν_{shek} tiń bul mánisi (sm^{-1} de ańlatılǵan) dissociaciya energiyası D menen $D = \nu_{shek} \cdot hc$ túrinde baylanısqa.



364-súwret.

Dissociaciya energiyası:
 D - qozbaǵan molekulaǵa tiyisli; D'
 - qozǵan molekulaǵa tiyisli.

Normal elektronlıq halǵa sáykes keletuǵın molekulanıń dissociaciya energiyası D menen bir qatarda qozǵan elektronlıq halǵa sáykes keletuǵın molekulanıń D' dissociaciya energiyasın da

anıqlawğa boladı. Molekulanıń qozǵan halına sáykes keletuǵın potenciallyq iymeklik 364-súwrettegi 2-ıymekliktiń járdeminde súwretlenedi. Bul iymekliktiń barlıq noqatları óziniń noqatları menen normal molekulaǵa tiyisli bolǵan 1-ıymekliktiń noqatlarınan joqarıda jaylasadı. Dissociaciya energiyası D' potenciallyq W'_{p0} energiyasına ("nollik" energiya $\frac{1}{2}a$ nı esapqa almaǵanda) teń:

$$D' = W'_{p0}. \quad (2)$$

D' tiń mánisin molekulalardıń jutılıw spektrin baqlaw boyınsha tabıwǵa boladı. Jutılıw elektronlı-terbeliw spektr tómengi qáddiden qozǵan molekulanıń bunnan keyingi bir qatar terbeliw qáddilerine ótiwlerde payda bolatuǵın jolaqlardan turadı (364-súwrette strelkalar menen belgilengen). Olarǵa bir birine qaray jılısatuǵın jutılıw jolaqları sáykes keledi (365-súwret). Jılıswdıń shekлерinen tısta tutas jutılıw oblastı jatadı, bul oblastta jutılǵan jaqtılıqtıń energiyasınıń bir bólimi dissociyalanǵan molekulanıń bólimlerine kinetikalıq energiya beriw ushın jumsaladı. Interpolyaciylaw jolı menen jolaqlardıń jılısw shegi bolǵan ν'_{shek} shamasın tawıp, biz molekulanıń dissociaciya energiyası $D' = \nu'_{shek} \cdot hc$ nı da taba alamız. Bul usıl jutılıwda da baqlanatuǵın bas seriyanıń shegi boyınsha atomnıń ionizaciya potencialın tabıw usılına júdá usaydı (342-súwret). Eki process te bir birine usaydı: atomda jutılatuǵın fotonnıń energiyası joqarılaǵanda elektron atomnıń shekлерinen pútkilley shıǵarılaman degenshe kem-kemnen energiyanıń joqarı bolǵan qáddine ótkeriledi; molekulada bolsa jutılatuǵın fotonnıń energiyası óskende ol ıdıraymın degende kem-kemnen joqarıdaǵı terbeliw qáddilerine kóteriledi. Eki processke de (fotoionizaciya menen dissociaciya) atomnıń bas seriyasınıń shekлерiniń sırtındaǵı yamasa molekulanıń jutılıw spektriniń jolaǵınıń shekлерinen tısta jaylasqan tutas jutılıw spektri sáykes keledi.

Dissociaciyanıń eki energiyaları D menen D' tiń arasında belgili baylanıs bar. Normal molekulanıń dissociaciyasında normal hallardaǵı eki atom payda boladı. 364-súwrette olar $A + B$ arqalı belgilengen. Qozǵan molekulanıń dissociaciyasında payda bolǵan eki atomnıń biri qozǵan halda boladı, bul jaǵday 364-súwrette juldızsha menen belgilengen. W'_{p0} hám W_{p0} energiyalarınıń ayırması atomdı qozdırıw energiyası ΔW ge teń. Sonlıqtan, (1)- hám (2)-teńliklerden mınaǵan iye bolamız:

$$D' = D + \Delta W. \quad (3)$$

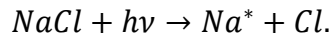
Eger atomdı qozdırıw energiyasınıń mánisi belgili bolsa, onda (3)-teńlik boyınsha dissociaciya energiyaları D menen D' niń birewiniń mánisin bilip, ekinshisiniń mánisin anıqlawǵa boladı.



365-súwret. Jutılıw jolaqlarınıń sisteması.

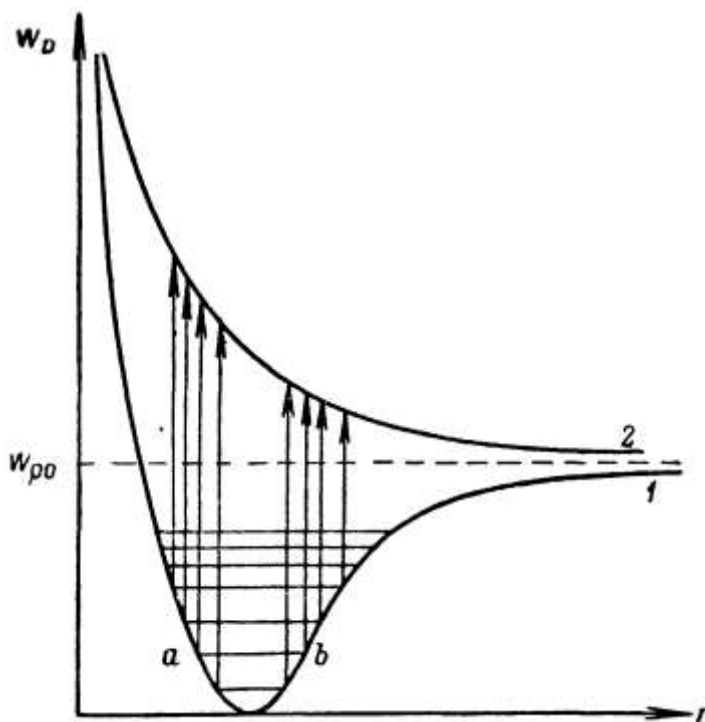
(3)-teńlikke A.N.Tereninniń molekulalardıń dissociaciyasınıń energiyasın anıqlawdıń usılı tiykarlanǵan. Terenina usılı fluorescenciyanıń spektrin anıqlawǵa alıp klinedi. Eki atomlı molekulalardan turatuǵın puwdı jıyiligi jutıw jolaqlarınıń birewiniń jıyiligine sáykes keletuǵın jaqtılıq penen jaqtılandırǵanda fluorescenciyanıń spektrinde molekulalıq jolaqlar payda boladı. Eger qozdıratuǵın jaqtılıqtıń jıyiligi $\nu > \nu'_{shek}$, teńsizligin qanaatlandıratuǵın bolsa, onda molekula dissociaciyalanadı hám qozǵan atomlar payda boladı. Bul atomlar normal halǵa qaytqanda atomlıq sızıqtı shıǵaradı. Solay etip, fluorescenciyanıń spektrinde atomlıq sızıqlardıń payda bolıwı boyınsha dissociaciya processiniń baslanıwı sezile baslaydı. Atomlıq sızıqtıń payda bolatuǵın eń kishi jıyilik ν'_{shek} tiń mánisin beredi hám bul mánis boyınsha D' anıqlanadı. Bul usıl hár qıylı siltili

galogenlik birikpelerdiń puwları ushın paydalanıldı. Mısal retinde $NaCl$ molekularınan turatuǵın puwdı qaraymız. Eger qozdıratuǵın jaqtılıqtıń jıyılıǵı $\nu > \nu'_{shek.}$ teńsizligin qanaatlandıratuǵın bolsa, onda minaday sxema boyınsha fotodissociaciya processı júredi:



Bul ańlatpada Na^* natriydiń qozǵan atomın ańǵartadı. Bul atom 2P halında turadı. Normal 1S halına qaytqanda ol $\nu = 1S - 2P$ sarı sızıqtı shıǵaradı. $NaCl$ puwların tolqın uzınıǵı 2000 Å nen kishi bolǵan ultrafiolet jaqtılıq penen jaqtılandırǵanda natriydiń atap aytqanda sarı D-sızıqların payda bolatuǵınlıǵı Terenin tárepinen baqlandı.

Eki atomlı molekulardıń dissociaciya energiyasınıń shaması bir neshe elektronvolt, yaǵnıy bir molge bir neshe onlaǵan mıń kaloriyaǵa teń. Mısalı, $NaCl$ ushın dissociaciya energiyası $D = 97,7$ kkal/mol.



366-súwret.

Ornıqlı potenciallıq iymeklikten ornıqlı bolmaǵan potenciallıq iymeklikke ótkende tutas jutılıw spektriniń payda bolıwı.

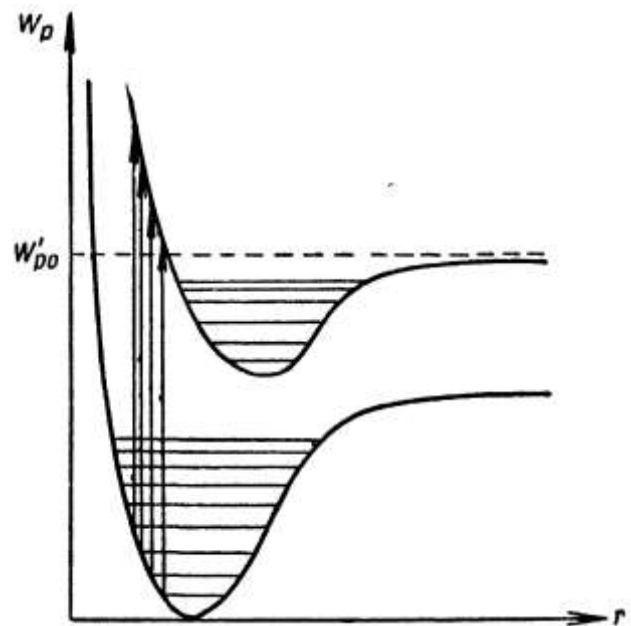
357-paragrafta kórgenimizdey, molekular ornıqlı hallar menen bir qatarda ornıqlı emes hallarǵa da iye boladı. Bunday hallarǵa minimumǵa iye bolmaytuǵın potenciallıq energiya sáykes keledi. Molekularıń dissociaciya onıń ornıqlı halınan ornıqlı emes halǵa ótiwinde de júzege keliwi múmkin. Molekuları ornıqlı bolmaǵan iymeklikke ótkeriw processine jutılıw spektriniń tutas oblastı sáykes keledi. Ornıqlı emes hal kvantlanbaǵan bolǵanlıqtan, ol energiya qáddileriniń úzliksiz qatarı menen táriyiplenedi, biraq bazı bir belgili bolǵan intervaldaǵı energiyalardıń qálegen mánisine alıp keledi. Tájiriyeberler, dissociaciyaǵa alıp keletuǵın usınday tutas spektrdiń óziniń ishine tolqın uzınıqlarınıń belgili bolǵan uchastkasın ǵana alatıǵın kórsetedi. Ol keń, jayılǵan jutıw jolaǵı túrine iye. Bul jolaqlar bizlerdiń joqarıda kórgen molekularlıq jolaqlardan ózleriniń haqıyqatında da "tutaslıǵı" menen ajralıp turadı, yaǵnıy hesh bir spektrallıq ásbaptiń járdeminde olardı ayırım sızıqlarǵa ajratıwǵa bolmaydı. Bunday jolaqlardıń payda bolıwı *Frank-Kondon principi* dep atalatuǵın principitiń járdeminde túsindiriwge boladı. Bul princip molekularardıń salıstırmalı úlken massaǵa hám salıstırmalı ástelik penen terbeletuǵınlıǵına tiykarlangan. Jeńil elektronlardıń jutılatuǵın jaqtılıqtıń tásirinde hallarınıń ózgerisi júdá úlken tezlik penen júzege keledi. Sonlıqtan jutılǵan jaqtılıqtıń tásirindegi bir potenciallıq iymeklikten ekinshisine ótiw yadrolardıń arasındǵı qashılıq ózgermey qalǵan jaǵdayda ámelge asadı.

Frank-Kondon principiniń orınlanıwı kóz-qarasınan ornıqlı potenciallıq iymeklikten (1-ıymeklik, 366-súwret) ornıqlı emes (2-ıymeklik) iymeklikke ótiwdi qaraymız. Terbeliwshi molekularıń tolıq energiyasınıń hár bir mánisine 366-súwrette gorizont baǵıtındaǵı sızık sáykes keledi. Gorizont baǵıtındaǵı sızıqlardıń potenciallıq iymeklik penen kesilisiw noqatlarında (a hám b noqatları) barlıq energiya, yaǵnıy yadrolardıń

potenciallıq hám kinetikalıq energiyaları nolge teń; basqa noqatlarda energiyanıń bir bólimi potenciallıq, al qalǵan bólimi kinetikalıq. Kinetikalıq energiya nolge teń bolǵan momentlerde yadrolar ózleriniń teń salmaqlıq orınlarınan maksimal awısqań hám olardıń tezligi nol mánisi arqalı ótedi. Teń salmaqlıq orınları arqalı ótkende yadrolar eń úlken tezlik penen qozǵaladı. Sonlıqtan olar kópshilik jaǵdaylarda maksimalıq awısıw orınlarında jaylasadı (terbelip turǵan mayatniktiń maksimalıq awısıwǵa sáykes keletuǵın orında kóp waqıt turatuǵınlıǵı sıyaqlı). Nátiyjede jaqtılıqtıń jutılıw aktı da yadrolardıń teń salmaqlıq orınnan eń kóp awısqań jaǵdayında orın aladı hám 1-ıymeklikten 2-ıymeklikke ótiw terbeliwshi molekulanıń tolıq energiyasın sáwlelendiretuǵın gorizont baǵıtında ótkerilgen strelkalardıń eki gruppası menen kórsetiledi. Frank-Kondon principi boyınsha hár bir strelka birdey bolǵan r ge iye bolǵan 1- hám 2-ıymekliklerdiń eki noqatın tutastıradı. Bul strelkalardıń gruppalarınń biri $r - r_{min}$ mánislerine jaqın, al ekinshisi $r - r_{max}$ mánislerine jaqın oblastta jatadı. Bul oblastlardıń birinshisine tutas jutılıwdıń qısqa tolqınlı jolaǵı, al ekinshisine uzın tolqınlı jolaǵı sáykes keledi.

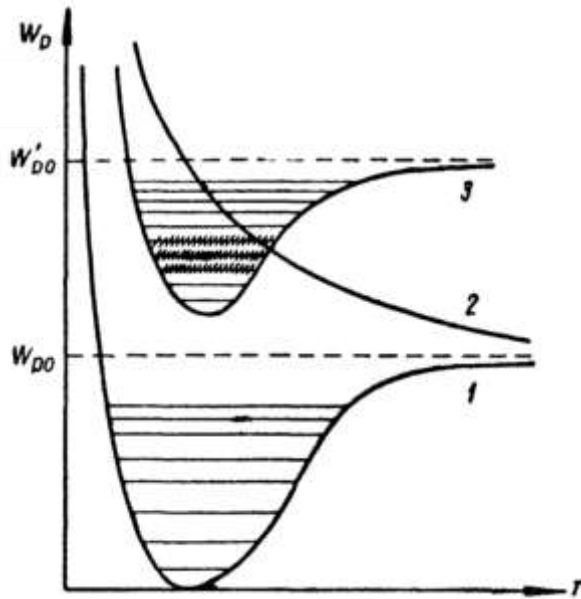
367-súwret.

Eki ornıqlı ıymekliklerdiń arasındaǵı ótiwdegi tutas jutılıw spektriniń payda bolıwı.



Potenciallıq ıymekliklerdiń ekewi de ornıqlı, biraq qozǵan molekulaǵa tiyisli bolǵan ıymekliktiń minimumı normal molekulanıń potenciallıq energiyasınıń ıymekligine salıstırǵanda r diń úlken mánislerine qaray jılısqan jaǵdayda da tutas jutılıwdıń orın alıwı múmkin (367-súwret). Frank-Kondon principi boyınsha eki ıymekliktiń arasındaǵı ótiw bul jaǵdayda da birdey r ge iye noqatlardıń arasında júzege keliwi kerek. Sonlıqtan, tómengi ıymekliktiń $r = r_{min}$ mánisine jaqın oblastlarınan ótiw qozǵan molekulanıń $W_p > W'_{p0}$ energiyasına iye bolıwına alıp keledi (367-súwret). Yadrolar sonday awısqań boladı, olar bir biri menen iyterisip, olar teń salmaqlıq orını arqalı ótedi hám tarqasadı; molekula dissociaciyalangan halǵa jáne qaytıp keledi.

Joqarıda kórsetilgen jaqtılıqtıń tutas jutılıw processı menen bir qatarda molekulalar tárepinen tutas spektrdiń shıǵarılıwınan turatuǵın keri processtiń júriwi de múmkin. Eki atom ornıqlı bolmaǵan potenciallıq ıymeklik boylap jaqınlasıp spontan túrde ("óz betinshe") ornıqlı ıymeklikke ótken jaǵdayda shıǵarıladı. Biraq bunday shıǵarıw júdá siyrek júzege keledi. Joqarǵı ornıqlı potenciallıq ıymeklikten tómennirektegi ornıqlı emes ıymeklikke ótkendegi tutas spektrdiń shıǵarılıwınıń itimallıǵı joqarı. Buǵan misal sıpatında vodorodtaǵı elektr razryadındaǵı intensivli tutas spektrdiń shıǵarılıwın kórsetiwge boladı.



368-súwret.
Molekulaniń predissociaciyasınıń payda bolıwı.

Aqırında, predissociaciya dep atalatuǵın processti qaraymız⁴⁶. Bul process eki potenciallyq iymeklikler kesilisetuǵın jaǵdayda baqlanadı. 2-ornıqlı bolmaǵan potenciallyq iymeklik qozǵan molekulaniń ornıqlı 3-ornıqlı sızıǵın kesip ótedi dep boljaymız (368-súwret). Kvantlıq mexanikadan eki energiyalıq iymeklik bir biri menen kesilisetuǵın bolsa, onda bir iymeklikten ekinshi iymeklikke spontan túrde ótiwdiń belgili bolǵan itimallıǵınıń bar bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Sonlıqtan 368-súwrette kórsetilgen jaǵdayda qozǵan molekulaniń terbelmeli qáddilerinen (shtrixovka menen belgilengen) molekulaniń dissociaciyasına alıp keletuǵın ornıqlı iymeklikke ótiwlerdiń bolıwı múmkin.

Solay etip, qozǵan molekula W'_{D0} energiyasına ele iye bolmaǵan waqıtta da dissociaciyaniń baslanıwı múmkin. Joqarıraq terbelmeli qáddiler qaytadan ornıqlı boladı. Spekrde jolaqlardıń bir bólimi hálsiz hám jayılǵan bolǵan jaǵdayda predissociaciya kórinedi; bul ornıqlı bolmaǵan iymeklikke ótiw júzege keletuǵın qáddilerdiń kishi jasaw waqtına iye bolatuǵınlıǵına sáykes keledi.

§ 359. Izotopiyaniń molekualıq spektrlerge tásir. Derlik barlıq elementler ushın izotoplar dep atalatuǵın hám bir birinen tek atomlıq salmaǵı boyınsha ayrılatuǵın atomlardıń sortlarınıń bar ekenligi belgili (II tom, 219-paragraf). Terbeliw hám aylanıw spektrleriniń jiyilikleri bir elementtiń hár qıylı izotoplarında hár qıylı. Bul terbeliw spektrleriniń jiyilikleri $\nu_{terb.}$ lerdıń molekulaniń keltirilgen massasınan, al aylanıw spektriniń $\nu_{ayl.}$ jiyiliginiń inerciya momentine, al usı inerciya momentiniń óziniń óz gezeginde keltirilgen massadan gárezligi menen baylanıslı. Izotopiyaniń terbeliw hám aylanıw spektrlerine tásin óz aldına qaraymız.

355-paragrafta ayılǵanlarǵa baylanıslı terbeliw spektriniń jiyiligi $\nu_{terb.}$ mınaday formulaniń járdeminde esaplanadı:

$$\nu_{terb.} = \frac{\Delta n}{2\pi c} \sqrt{\frac{k}{M}} \quad (1)$$

Bul formulada M molekulaniń keltirilgen massası hám Δn terbeliw kvant sanınıń ózgerisi. Bir birinen tek izotoplıq quramı menen ayrılatuǵın molekualardaǵı birdey hallarda turatuǵın elektronlardıń sanları birdey. Sonlıqtan olar ushın k konstantasınıń mánisi birdey hám tek keltirilgen massalar M lerdıń mánisleri hár qıylı. Eki atomlı AB molekulası qaraymız. Meyli,

⁴⁶ Predissociaciya - (latın tilinde rrae - aldın ala, aldında hám dissociaciya sózlerinen) energiyası sáykes qozǵan elektronlıq haldıń dissociaciyalıq sheginen kishi bolǵan qozǵan molekulaniń ıdırawı. Molekulaniń baylanısqa haldan energiyası tap sonday bolǵan baylanısqaǵın (erkin) halǵa ótiwiniń belgili itimallıǵınıń bar bolıwınıń sebebinen júzege keledi. Predissociaciya sózin qaraqalpaq tiline awdarmaymız (Awdarıwshılar).

birinshi atom massası m_A bolğan bir A atomına, al ekinshisi massaları m_B hám $m_{B'}$ bolğan eki izotopqa iye bolsın. Bunday jaǵdayda molekulalardıń AB hám AB' bolğan eki tipine iye bolamız. Olardıń keltirilgen massaları $M = \frac{m_A m_B}{m_A + m_B}$ hám $M' = \frac{m_A m_{B'}}{m_A + m_{B'}}$ shamalarına teń. Berilgen elementtiń izotoplarınń atomlıq salmaqları ádette atomlıq salmaqtiń bir yamasa eki birlikke ayrıladi. Sonlıqtan júdá kishi bolmağan atomlıq salmaqlarǵa iye atomlardan turatuǵın molekula ushın keltirilgen massalardıń ayırması $\Delta M = M' - M$ keltirilgen M' hám M massalarǵa salıstırǵanda kishi.

(1)-formula boyınsha AB' hám AB molekulalarınń ekewiniń terbeliw spektrleriniń jiyilikleriniń ayırması bolğan $\Delta v_{terb.} = v'_{terb.} - v_{terb.}$ shaması mınaǵan teń:

$$\Delta v_{terb.} = \frac{\Delta n}{2\pi c} \left(\sqrt{\frac{k}{M'}} - \sqrt{\frac{k}{M}} \right)$$

yamasa

$$\Delta v_{terb.} = \frac{\Delta n}{2\pi c} \sqrt{\frac{k}{M}} \left(\sqrt{\frac{M}{M'}} - 1 \right).$$

(1)-ańlatpaǵa sáykes teńliktiń oń tárepindegi qawsırmanıń aldında turǵan kóbeytiwshi $v_{terb.}$ jiyiligine teń. Bunnan mınaǵan iye bolamız:

$$\Delta v_{terb.} = v_{terb.} \left(\sqrt{\frac{M}{M'}} - 1 \right). \quad (2)$$

$M = M' - \Delta M$ teńligi orınlı bolǵanlıqtan

$$\frac{M}{M'} = 1 - \frac{\Delta M}{M'}$$

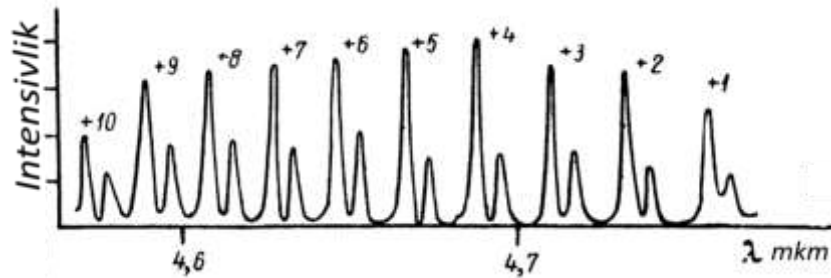
teńligine, al bunnan juwıq túrdegi

$$\sqrt{\frac{M}{M'}} = \sqrt{1 - \frac{\Delta M}{M'}} \cong 1 - \frac{1}{2} \frac{\Delta M}{M'}$$

teńlikke iye bolamız. Bunnan keyin (2)-formula mınaday túrge enedi:

$$\Delta v_{terb.} = -v_{terb.} \cdot \frac{1}{2} \frac{\Delta M}{M'}. \quad (2a)$$

Eger B atomınıń massası A atomınıń massasınan kóp kishi bolsa, onda $\frac{\Delta M}{M'}$ qatnasınıń shaması juwıq túrde $\frac{\Delta m_B}{m_B}$ qatnasına teń bolatuǵınlıǵın ańsat kórsetiwge boladı. Bul qatnasta Δm_B arqalı B hám B' izotoplarınń atomlıq salmaqlarınıń ayırması belgilengen. Ortasha atomlıq salmaqlarǵa iye atomlar ushın $\frac{\Delta M}{M'}$ qatnasınıń mánisi $\frac{1}{10} \sim \frac{1}{50}$ shamasında. Sonlıqtan, (2-a) formuladan kórinip turǵanıday, terbeliw jiyilikleriniń izotoplıq jılıswı jetkilikli dárejede úlken hám onı orta ajırata alıw kúshine iye bolǵan ásbaplardıń járdeminde anıqlawǵa boladı. $v_{terb.}$ shaması elektronlıq-terbeliw spektriniń ańlatpasına additivlik shama túrinde kiretuǵın bolǵanlıqtan elektronlıq-terbelmeli spektrdiń barlıq jolaqları izotoplıq jılıswǵa ushıraydı. Molekulalıq jolaqlardıń jılıwı boyınsha birinshi ret C^{13} , N^{15} , O^{17} , O^{18} hám jáne de bir qatar izotoplar anıqlandı. Jerdegi ádettegidey sharayatlarda uglerodtıń awır C^{13} izotopı tiykarǵı C^{12} izotopqa 1% muǵdarda aralasqan. Biraq, spektroskopiyalıq usıllardıń úlken sezgirliǵine baylanıslı $C^{13}C^{12}$ molekulalardıń bar ekenligin ańsat ańǵarıwǵa boladı. $C^{13}C^{13}$ molekulaları júdá siyrek ushırasadı. 4-súwrette (qosımshaǵa qarańız) C_2 niń λ tolqın uzınlıǵı shama menen 4737 Å bolǵan jolaq keltirilgen. Tiykarǵı jolaqtıń basınıń aldında ($C^{12}C^{12}$) úlken tolqın uzınlıqları tárepine qaray jılısqan $C^{12}C^{13}$ molekulasınıń jolaǵınıń ázzi bası jaylasqan.



369-súwret. HCl dıń infraqızıl jolaǵınıń strukturasındaǵı izotoplıq jılıwı.

Endi izotopiyanıń eki atomlı molekulanıń aylanıw spektrine tásirin qaraymız. 356-paragraftaǵı (3)-formula boyınsha taza aylanıw spektriniń jiyilikleri mınaǵan teń:

$$\nu_{ayl.} = \frac{\hbar}{2\pi Jc} m'. \quad (3)$$

Bul formulada J arqalı molekulanıń inerciya momenti hám m' arqalı 1, 2, 3, ... mánislerine iye bolatuǵın aylanıw kvant sanları. AB' hám AB molekularınıń aylanıw spektri ushın jiyiliklerdiń ayırması $\Delta\nu_{ayl.} = \nu'_{ayl.} - \nu_{ayl.}$ ushın

$$\Delta\nu_{ayl.} = \frac{\hbar}{2\pi c} m' \left(\frac{1}{J'} - \frac{1}{J} \right) = \frac{\hbar}{2\pi Jc} \left(\frac{J}{J'} - 1 \right) \quad (4)$$

ańlatpasına iye bolamız.

(3)-teńliktiń járdeminde bul ańlatpanı

$$\Delta\nu_{ayl.} = \nu_{ayl.} \left(\frac{J}{J'} - 1 \right)$$

túrinde kórsetemiz. $\frac{J}{J'} = \frac{M}{M'}$ teńligi orınlı bolǵanlıqtan $\frac{J}{J'} - 1 = -\frac{\Delta M}{M'}$ teńligine iye bolamız, bunday jaǵdayda (4)-formula mınaday túrge enedi:

$$\Delta\nu_{ayl.} = -\nu_{ayl.} \frac{\Delta M}{M'}. \quad (4a)$$

(2-a) hám (4-a) formulalardı salıstırıwdan aylanıw spektrleri ushın izotoplıq jılıwdıń salıstırmalı mánisi bolǵan $\Delta\nu/\nu$ shamasınıń terbeliw spektrine salıstırǵanda eki ese úlken ekenligin kóremiz. $\nu_{ayl.}$ jiyiliginiń shaması $\nu_{terb.}$ jiyiliginiń shamasınan ádewir kishi bolǵanlıqtan, aylanıw spektrindegı jılıw absolyut mánisi boyınsha kishi boladı. Usınıń menen bir qatarda, taza aylanıw spektrleri spektrdiń alıstaǵı infraqızıl oblastında jaylasqan. Bul oblastta baqlawlardı ótkeriw qıyın. Ádette, izotoplıq jılıw terbeliw yamasa elektronlıq-terbeliw jolaqlarınıń aylanıw strukturasında baqlanadı. Bul jaǵdayda onıń shaması salıstırmalı kishi. Biraq, sonda da sáykes spektrallıq apparaturanı paydalanǵanda onı ańǵarıwǵa boladı. 369-súwrette HCl molekulasınıń aylanıw-terbeliw jolaǵınıń strukturasına izotopiyanıń táhiri kórsetilgen. Spektrallıq ásbaptıń jetkilikli dárejedeǵı ajırata alıw kúshinde barlıq sıyıqlardıń qos ekenligi kórinedi: qurawshılardıń biri HCl^{35} molekulasına, al ekinshisi HCl^{37} molekulasına tiyisli.

§ 360. Jaqtılıqtıń kombinaciyalıq shashırawı. Molekulalardıń qásiyetlerin úyreniwdiń áhmiyetli usıllarınıń biri jaqtılıqtıń kombinaciyalıq shashırawı, yaǵnıy jaqtılıqtıń jiyiliginiń ózgeriwi menen bolatuǵın shashırawı bolıp tabıladı. 284-paragrafta jaqtılıqtıń gúńgirt zatlar arqalı ótiwin qaraǵanımda, biz shashıraǵan nurlardıń jiyiligi ν dıń kelip túsetuǵın nurlardıń jiyiligi ν_0 ge teń bolatuǵınlıǵın kórdik. Bunday jaǵday ortalıqqa kirgizilgen qanday da bir ózge bólekshelerdegı shashırawda da, jıllılıq qozǵalıslarınıń bar bolıwınıń nátiyjesinde payda bolatuǵın tıǵızlıqtıń fluktuaciylarındaǵı shashırawında payda boladı. Biraq, shashıratıwshı bóleksheler shashıraǵan nurlardıń amplitudasınıń dáwirli túrdegı ózgerisine alıp keletuǵın qanday bir terbelislerge qatnaspasa jaǵday usınday boladı. Sońǵı jaǵdayda shashıraǵan jaqtılıq modulyaciyalanǵan bolıp tabıladı. I tomdaǵı 104-paragrafta biz modulyaciyanıń jiyiliktiń ózgeriwine alıp keletuǵınlıǵın

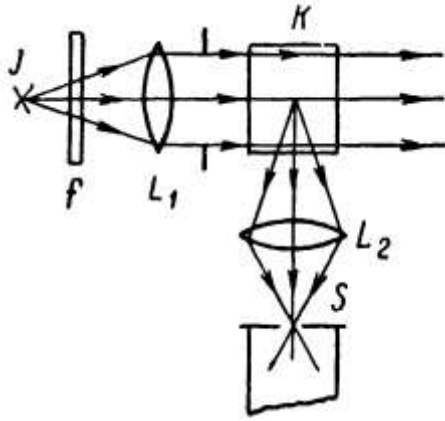
kórdik. Haqıykatında da, $x = a \cos 2\pi\nu_0 t$ terbelisinde amplituda a nırń ózi $a = a_0 \cos 2\pi\nu' t$ nızamı boyınsha ózgeredi. Bunday jaǵdayda

$$\begin{aligned} x &= a_0 \cos 2\pi\nu' t \cdot \cos 2\pi\nu_0 t = \\ &= \frac{a_0}{2} \cos 2\pi(\nu_0 + \nu')t + \frac{a_0}{2} \cos 2\pi(\nu_0 - \nu')t \end{aligned}$$

teńligine iye bolamız. Bul tezlik modulyaciyalanǵan terbelistiń jiyilikleri $\nu = \nu_0 \pm \nu'$ shamalarına teń eki garmonikalıq terbeliske ajralatuǵınlıǵın kórsetedi. Sonlıqtan, shashıraǵan nurlardıń amplitudasın dáwirli túrde ózgartetuǵın oraylarda shashıraǵan dáslep ν_0 jiyiligine iye bolǵan jaqtılıq ta óziniń jiyiligin ózgeritiwi kerek boladı: dáslepki jiyiligi ν_0 shamasına teń bolǵan jaqtılıqtıń ornına jiyilikleri $\nu = \nu_0 \pm \nu'$ shamalarına teń eki nur payda boladı.

L.I.Mandelshtam jaqtılıqtıń modulyaciyasınıń usınday túriniń kristallardaǵı jıllılıq qozǵalıslarında payda bolatuǵın qoyıwlasıwlardaǵı shashırawlarda da payda bolatuǵınlıǵın kórsetti. I tomnıń 93-paragrafında biz kristallıq pánjerede jıllılıq qozǵalıslarınıń turǵın tolqınlardıń payda bolıwına alıp keletuǵınlıǵın atap óttik. Usınıń saldarınan kristaldaǵı belgili orınlarda jaqtılıqtıń modulyaciyalanǵan shashırawına alıp keletuǵın qoyıwlasıwlar menen siyrekiswler dáwirli túrde payda boladı. Esaplawlar kvarc kristalları ushın modulyaciya jiyiliginiń shamasınıń 10^{10} sek^{-1} shamasına teń bola alatuǵınlıǵın kórsetedi. Usınıń saldarınan júzege keletuǵın modulyaciyanıń nátiyjesinde dáslepki jiyiliktıń mánisi procenttiń mırınan bir úlesine ózgeriwi orın aladı. Bul effektıń júdá kishi bolıwına qaramastan, onı tájiriybede tabıwǵa boladı. Jaqtılıqtıń kristallardaǵı jıllılıq turǵın tolqınlarındaqı shashırawındaǵı jiyiliktıń ózgeriwi birinshi ret leningradlı fizik E.F.Gross tárepinen baqlandı.

Jaqtılıqtıń modulyaciyasına alıp keletuǵın ekinshi sebep molekulanıń quramına kiretuǵın atomlardıń terbelisleri menen baylanıslı. Bul jaǵdayda da, jiyiligi ν_0 shamasına teń kelip túsiwshi nurlar menen birgelikte shashıraǵan nurlardıń ishinde jiyilikleri $\nu = \nu_0 \pm \nu'$ shamalarına teń eki nur payda boladı. Bul teńlikte ν' arqalı molekuladaǵı atomlardıń menshikli terbelisleriniń jiyiligi belgilengen. $\nu' \cong 10^{12} \text{ sek}^{-1}$ teńligi orın alatuǵın bolǵanlıqtan, atomlardıń terbelisleriniń saldarınan payda bolǵan modulyaciya jıllılıq tolqınları tárepinen payda etilgen modulyaciyaǵa salıstırǵanda ádewir tereń. Eger molekula menshikli terbelislerdiń bir neshe $\nu', \nu'', \nu''', \dots$ jiyiliklerine iye bolsa, onda shashıraǵan jaqtılıqta barlıq "kombinaciyalıq" $\nu_1 = \nu_0 \pm \nu', \nu_2 = \nu_0 \pm \nu'', \nu_3 = \nu_0 \pm \nu''', \dots$ jiyilikleriniń payda bolıwı kerek. Bunnan jiyiliktıń ózgeriwi menen júretuǵın jaqtılıqtıń shashırawınıń ataması - *kombinaciyalıq shashıraw* ataması payda bolǵan. Usınday tiptegi shashırawdıń bolıwı Moskva universitinde kvarc kristallında shashıraǵan nurlardıń spektrallıq quramın eksperimentallıq izertlegen L.I.Mandelshtam hám G.S.Landsberg tárepinen tabıldı. Olar menen bir waqıtta tap usınday qubılıs jaqtılıqtıń sıyıqlıqlardaǵı shashırawın baqlaǵan indiyalı fizikler Raman menen Krishnan tárepinen baqlandı. Sovet hám indiyalı alımlardıń jumıslarınıń bir birinen ǵárezsiz ótkergenligin hám bir waqıtta orınlanǵanına qaramastan, shet ellerdegi ádebiyatta jaqtılıqtıń kombinaciyalıq shashırawın tek Ramannıń atı menen baylanıstıradı hám onı Raman qubılısı dep ataydı.



370-súwret.
Kombinaciyalıq shashırawdı baqlaw.

Kristallardaǵı jaqtılıqtıń kombinaciyalıq shashırawın baqlaw boyınsha ótkerilgen tájiriýbeniń sxeması 370-súwrette kórsetilgen. Jaqtılıqtıń deregi sıpatında J sinap lampası xızmet etedi; sinap puwları tárepinen shıǵarılatuǵın spektrden f filtriniń járdeminde jiyiligi ν_0 bolǵan bir sızıq ayırıp alınadı. Filtr arqalı ótken jaqtılıq L_1 linzaniń járdeminde K kristallına qaray jiberiledi. Kelip túsetuǵın nurlardıń baǵıtına perpendikulyar baǵıtta shashıraǵan nurlar L_2 linzaniń járdeminde spektrograftıń sańlaǵı S ke túsiriledi. Kombinaciyalıq shashırawdıń intensivligi júdá kishi, sonlıqtan kristaldaǵı bir tekli bolmaǵan orınlardaǵı shashırawdıń shaması júdá kúshli bolmawı kerek. Biraq, usınday jaǵdayǵa qaramastan, ádettegidey ("releylik") shashıraw barlıq waqıtta da orın aladı hám shashıraǵan nurlardıń spektrinde ózgermeytuǵın ν_0 jiyiligindegi sızıq qatnasadı. Mandelshtam menen Landsbergtiń baqlawları ózgermeytuǵın ν_0 jiyiliginiń eki tárepinde simmetriyalı túrde (jiyilikler shkalasında) $\nu_1 = \nu_0 \pm \nu'$, $\nu_2 = \nu_0 \pm \nu''$, $\nu_3 = \nu_0 \pm \nu'''$ h.t.b. jiyiliklerine iye joldaslarınń bolatuǵınlıǵın kórsetti. ν' , ν'' , ν''' jiyilikleri izertlenip atırǵan kristall ushın tán bolıp, kelip túsetuǵın nurdıń jiyiligi ν_0 den ǵárezli emes. Eger, kelip túsetuǵın dáste jiyilikleri ν_i ge teń bolǵan bir neshe spektrallıq sızıqlardan turatuǵın bolsa, onda olardıń hár qaysısınıń átirapında joldasları payda boladı.

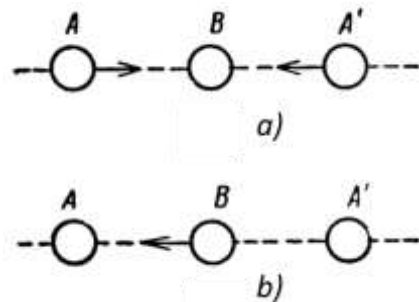
Tiykargı sızıqtan fiolet tárepte jaylasqan joldaslardıń ($\nu_1 = \nu_0 + \nu'$ h.t.b.) intensivlikleri spektrdiń qızıl tárepinde jaylasqan joldaslardıń intensivliklerinen ádewir hásiz. Kristaldıń temperaturasınıń joqarılawı menen "fiolet" joldaslardıń intensivlikleri tez ósedı. "Qızıl" joldaslardıń intensivlikleri temperaturadan derlik ǵárezli emes. Tap usınday nızamlıqlar jaqtılıqtıń suyıqlıqlardaǵı shashırawında da baqlanadı.

Teoriyalıq juwmaqlardı tájiriýbelerde alınǵan maǵlıwmatlar menen salıstırıwdan joldaslardıń tiykargı sızıqtan qashıqlıǵına teń ν' , ν'' , ν''' , ... jiyilikleriniń kristaldaǵı ionlardıń menshikli terbelisleriniń jiyilikleri menen sáykes keliwiniń kerek ekenligin kórsetedi. Tap usı terbelisler infraqızıl nurlardı jutiwdıń nátiýjesinde de payda bola aladı. Haqıyqatında da, kombinaciyalıq shashırawda joldaslardıń jaylasıwları boyınsha alınǵan ν' , ν'' , ν''' , ... jiyilikleri jutılıwdıń infraqızıl jolaqlarınıń jiyiliklerine sáykes keledi. Mısalı, jaqtılıqtıń kristallıq kvarcta shashırawında tiykargı sızıqtan 127; 268; 465; 1075; 1250 sm^{-1} qashıqlaqlarda jaylasqan joldaslar baqlanadı. Tap sol kristallıq kvarc infraqızıl oblastta jiyilikleri $\nu = 128$; 263; 480; 1110 hám 1200 sm^{-1} shamalarına teń jutıw jolaqların beredi. Eki qatar da baqlawdıń qátelikleriniń sheklerinde bir birine sáykes keledi. Biraq kombinaciyalıq shashırawda hám infraqızıl jutıwda kórinetuǵın usınday sáykes keleiwsilik barlıq waqıtta orın ala bermeydi. Kristallıq kvarctaǵı kombinaciyalıq shashırawdıń spektrinde joqarıda keltirilgen joldaslardıń arasında tiykargı sızıqtan 208, 405 hám 694 sm^{-1} sızıqları da bar. Infraqızıl jutıw spektrinde bul sızıqlar kórinbeydi. Sonıń menen birge qarama-qarsı jaǵday da bar: bunday jaǵdayda jutıw jiyiliklerine kombinaciyalıq shashırawdıń spektrindegi joldaslar sáykes kelmeydi. Usınday sáykes kelmewshilik bılayınsha túsindiriledi: biz qarap atırǵan nurlardıń modulyaciyası ushın molekuladaǵı onıń bólimleriniń ózgerisi jetkilikli, biraq molekulanıń elektr momenti ózgerissiz qala aladı. Jaqtılıq elektromagnit tolqınlarınıń molekulada jutıla alıwı

ushın usı molekulada elektr momentiniń ózgeriwi menen baylanıslı bolǵan terbelislerdiń júzege keliwi kerek. Usı ayılǵanlardı dara misalda ayqınlastıramız: meyli, molekula bir sıziqtır boyında jaylasqan bir oń B atomnan hám eki teris A hám A' atomlarınan (úsh atomnan) turatuǵın bolsın (371-súwret). Eger molekuladaǵı terbelisler teris bolǵan A hám A' ionlarınan simmetriyalıq terbelislerine alıp kelinetuǵın bolsa, onda bul eki ion da barlıq waqıtta oń B ionınan birdey qashıqlıqta jaylasadı (371-a súwret) hám molekulanın dipollik momenti ózgermeydi. Tek ǵana elektronlarǵa yadrolar tárepinen tásir etetuǵın kúshler ǵana ózgeriske ushıraydı. Nátiyjede molekulanın polarizaciyalanıwshılıǵı hám soǵan sáykes onıń jaqtılıqtı shashıratıwshılıq qábiletligi ózgeredi. Eger molekuladaǵı terbeliste oń ion B birese A ionı menen, birese A' ionı menen jaqınlasatuǵın bolsa (371-b súwret), onda molekulanın elektr momentı ózgeredi hám bunday jaǵdayda molekula túsken nurdı juta aladı. Molekulanın polarizaciyalanıwshılıǵı ózgeriwi menen baylanıslı bolǵan terbelisler tek kombinaciyalıq shashırawda kórinedi; tek molekulanın elektr momentiniń ózgeriwi menen baylanıslı bolǵan terbelisler infraqızıl jutılıw spektrlerinde ǵana kórinedi. *Qubılıslardıń ekewinde de molekulanın polarizaciyalanıwshılıǵı hám elektr momentı ózgeretuǵın terbelisler menen baylanıslı bolǵan jiyilikler kórinedi.* Demek, kombinaciyalıq shashırawdıń hám jutılıw spektrlerin salıstırıw molekulalardıń ishinde júzege keletuǵın terbelislerdiń áhmiyetli xarakteristikaların anıqlawǵa múmkinshilik beredi.

371-súwret.

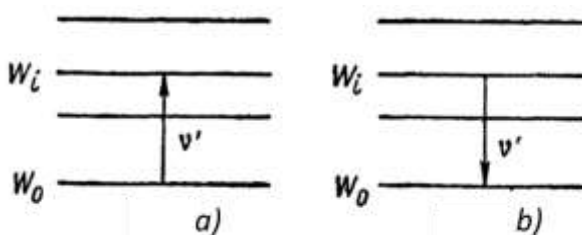
Molekulanın polarizaciyalanıwshılıǵına (a) hám elektr momentiniń ózgeriwine (b) alıp keletuǵın terbelisler.



Joqarıda keltirilgen kombinaciyalıq shashırawdıń klassikalıq túsindiriliwi tolıq emes. Ol bir qatar faktlerdi, misalı "fiolet" hám "qızıl" joldaslardıń hár qıylı intensivliklerge iye bolatuǵınlıǵın túsindire almaydı. Haqıyqatında, jaqtılıqtıń zatlar menen tásir etisiwinde júzege keletuǵın basqa qabılıslar sıyaqlı kombinaciyalıq shashıraw da kvantlıq xarakterge iye. 355-paragrafta biz qarap ótkén kóz-qarasta terbelmeli jiyiliklerdiń shıǵarılıwı menen jutılıwı molekulanın energiyanıń bir qáddinen ekinshi qáddine ótiwi menen baylanıslı. Meyli, molekula energiya hallarınıń $W_0, W_1, \dots, W_i$ qatarına iye bolsın. Ol normal halda energiyası W_0 ge teń bolǵan halda turatuǵın bolsın dep boljaymız. Energiası $\varepsilon_0 = h\nu_0$ shamasına teń foton menen tásirleskende molekulanın joqarıraq bolǵan W_i energiya halına ótiwi múmkin (372-a súwret); usınday ótiw ushın $\Delta W = W_i - W_0$ energiasınıń jumsalıwı talap etiledi. Sonlıqtan, fotonnıń energiası ΔW shamasına kemeyedi hám energiası

$$\varepsilon = h\nu = h\nu_0 - \Delta W$$

shamasına teń jańa (shashıraǵan) foton payda boladı.



372-súwret.

a) "qızıl" qurawshınıń hám b) "fiolet" qurawshınıń payda bolıwı.

Sońǵı teńlikten shashıraǵan fotonlardıń jiyiliginiń

$$\nu = \nu_0 - \frac{\Delta W}{h}$$

shamasına teń ekenligi kelip shıǵadı. Biraq, $\Delta W/h$ shaması molekulalıń W_0 qáddinen W_i qáddine ótiwine sáykes keletuǵın ν' jıyılıǵı bolıp tabıladı.

$\Delta W/h$ shamasınıń usı máńisin paydalanıp

$$\nu = \nu_0 - \nu'$$

teńligine iye bolamız. Bul kombinaciyalıq shashırawdıń spektrindegı "qızıl" joldastırın payda bolıwına alıp keledi. Molekulalırdıń bir bólimi dáslep W_i qozǵan halda jaylastı dep boljasa "fiolet" joldastırın payda bolıwın túsindiriwge boladı (372-b súwret). Bunday jaǵdayda túsiwshi fotonnıń tásirinde molekula energiyası kishi bolǵan W_0 halına ótedi. Dáslepki fotonnıń energiyası $\varepsilon_0 = h\nu_0$ ge ΔW energiyası qosıladı hám energiyası

$$\varepsilon = h\nu = h\nu_0 + \Delta W$$

shamasına teń shashıraǵan foton payda boladı. Bunnan "fiolet" joldastırın jıyılıǵı ushın mınaday teńlikti alamız:

$$\nu = \nu_0 + \nu'.$$

Álbette, qozǵan W_i haldaǵı molekulalırdıń sanı W_0 normal haldaǵı molekulalırdıń sanınan barlıq waqıtta da kishi boladı. Sonlıqtan "fiolet" joldaslardıń intensivligi "qızıl" joldaslardıq intensivliginen kishi boladı. T temperaturanıń joqarılawı menen qozǵan molekulalırdıń sanı N_i Bolcman nızamı boyınsha úlkeyedi:

$$N_i = N_0 \frac{g_i}{g_0} e^{-\frac{W_i - W_0}{kT}}.$$

Bul ańlatpada N_0 arqalı W_i halındaǵı molekulalırdıń sanı belgilengen. Usı ańlatpaǵa sáykes "fiolet" joldaslardıń sanı temperaturanıń joqarılawı menen tek ósiwi kerek. "Qızıl" joldaslardıń sanınıń temperaturaǵa baylanıslı sezilerliktey ózgeriwi kerek emes. Sebebi jetiw múmkin bolǵan temperaturalarda W_0 halındaǵı molekulalırdıń sanı júdá az kemeyedi. Solay etip, kvantlıq kóz-qaraslar "fiolet" hám "qızıl" joldaslardıń hár qıylı intensivliklerge iye bolatuǵınlıǵın hám olarǵa temperaturanıń hár qıylı tásir etetuǵınlıǵın tábiyiy túrde túsindiredi.

Fotonlar menen molekulalırdıń aylanıw energiya hallarınıń arasındaǵı energiya almasıwdıń nátiyjesinde de kombinaciyalıq shashırawdıń payda bolıwı múmkin. Molekulalıń aylanıwına sáykes keletuǵın energiya onıń terbeliwine sáykes keletuǵın energiyadan ádewir kishi bolǵanlıqtan, joldaslar tiykargı sızıqqa jaqın jaylasadı. Olar úlken basımlardaǵı (shashıraǵan nurlardıń intensivligin kúsheytıw ushın) eki atomlı gazlerdegi jaqtılıqtıń shashırawında baqlanadı (N_2 , O_2 , H_2).

Kombinaciyalıq shashıraw quramalı kóp atomlı molekulalardaǵı, solardıń ishinde organikalıq birikpelerdiń molekulalarındaǵı, terbelislerdiń menshikli jıyiliklerin úyreniwdiń áhmiyetli usılı bolıp tabıladı. Házirgi waqıtları kombinaciyalıq shashırawdı baqlawǵa tiykarlangan molekulalıq spektrallıq analiz usılı keńnen paydalanıladı. Belgili bolǵan jıyiliklerdiń bar bolıwı boyınsha berilgen quramalı aralaspanıń quramına qanday molekulalırdıń kiretuǵınlıǵın dodalawǵa boladı. Mısalı, individuallıq uglevodorodlardıń belgili bolǵan menshikli jıyilikleri boyınsha benzinnıń hám basqa da motorlıq janılǵılardıń quramı haqqında pikir aytıw múmkin

§ 361. Suyıq hám qattı denelerdiń lyuminescenciyası. Usı waqıtlarǵa shekem biz tek atom túrindegı yamasa molekulalıq gazlerdiń (puwlardıń) fluorescenciyanı qaradıq (342-, 355-paragraflar). Process jutiwdıń saldarınan atomnıń yamasa molekulalıń normal haldan qozǵan halǵa ótiwi hám onnan keyin qozǵan haldan normal halǵa ótkende jaqtılıqtıń shıǵarılıwına alıp kelinedi. Bazı bir jaǵdaylarda úlken jarıqlıqqa iye bolǵan suyıq hám qattı denelerdiń de fluorescenciya boladı.

Burın biz táriyiplegen gazdiń fluorescenciya jaqtılıqtıń sırtqı deregi tárepinen jaqtılandırıw toqtaǵannan keyin júdá kishi waqıttan soń joǵalatuǵın fluorescenciya bolıp tabıladı. Tap usınday jaǵday bir qatar suyıq hám qattı denelerde de baqlanadı. Biraq, bazı bir qattı deneler sırttan

túsetuǵın jaqtılıqtıń tásiiri joǵalǵannan keyin uzaq waqıt dawam etetuǵın (kóp saatlar dawamında) jaqtılıq shıǵaratuǵın qásiyetke iye. Jaqtılıq shıǵarıwdıń usınday tipin ádette fosforescenciya dep ataw qabil etilgen. Biraq, haqıyqatında, bul belgisi boyınsha fosforescenciyanı fluorescenciyaǵan ayırıwǵa bolmaydı. Sebebi, hár qıylı dara jaǵdaylarda keyingi jariq shıǵarıwdıń júdá hár qıylı sheklerde, sekundtıń júdá kishi úlesinen (10^{-10} sekund) bir neshe saatlarǵa shekem saqlanıwı múmkin.

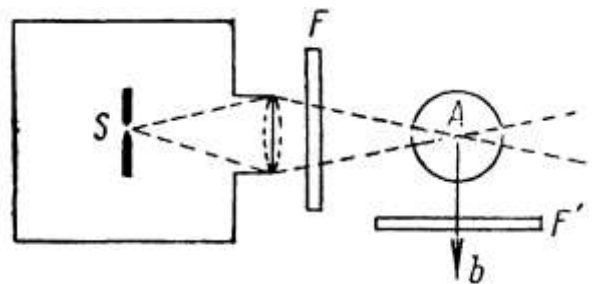
Sırtqı derekten shıqqan nurlanıwdıń tásirindegi jaqtılıq shıǵarıwdı onıń uzaqlıǵınan ǵárezsiz biz *lyuminescenciya* dep ataymız. Usı anıqlamaǵa sáykes, fluorescenciya menen fosforescenciya qubılısları lyuminescenciyanıń dara jaǵdayları bolıp tabıladı.

Ulıwma aytqanda, túsiwshi nurlanıwdıń tásirinde denelerdiń jaqtılıq shıǵarıwı hár qıylı xarakterge iye bolıwı múmkin: bunıń deneniń betinen jaqtılıqtıń shaǵılısıwı bolıwı da, jaqtılıqtıń shashırawı (releylik yamasa kombinaciyalıq), lyuminescenciya hám, aqırında jutılatuǵın radiaciyanıń tásirinde deneniń qızıwınıń saldarınan payda bolatuǵın temperaturalıq jaqtılıq shıǵarıw bolıwı da múmkin. Lyuminescenciyanı jaqtılıq shıǵarıwdıń baska tiplerinen ayırıw ushın onıń ózine tán ózgesheliklerin kórsetiw kerek. Bul ózine tán bolǵan ózgeshelikler eń tolıq túrde S.I.Vavilov tárepinen kórsetildi.

Ulıwma aytqanda, lyuminescenciyanıń jaqtılıǵınıń tolqın uzınlıǵı qozdıratuǵın jaqtılıqtıń *tolqın uzınlıǵınan basqasha boladı*. Usı ózgesheligi boyınsha lyuminescenciyanıń jaqtılıǵı shaǵılısqan jaqtılıqtan hám releylik shashırawda payda bolǵan jaqtılıqtan ayrıladı. Ekinshiden, lyuminescenciya sóniwdiń shekli waqıtına iye boladı, yaǵnıy ol qozdırıwshı jaqtılıqtıń tásiiri toqtaǵannan keyin dárhál joǵalmaydı (jaqtılıq terbelisleriniń dáwiri $t \sim 10^{-15}$ sek úlken waqıtlarda). Eń aqırında, lyuminescenciyanıń jaqtılıǵınıń jariqlıǵı b_λ usı lyuminescenciya *baqlanıp atırǵan temperaturadaǵı absolyut qara deneniń jariqlıǵınan úlken*. Bunday úlken jariqlıq lyuminescentlik jaqtılıq shıǵarıwdıń teń salmaqlıq emes jaqtılıq shıǵarıw ekenligi menen baylanıslı. Qatań túrde aytqanda, bunday jaǵdayda deneniń temperaturası haqqındaǵı túsiniq pútkilley joǵaladı (302-paragrafqa qarańız). Sebebi elektronlardıń energiya qáddileri boyınsha tarqalıwı teń salmaqlıq emes. Biraq, is júzinde lyuminescenciyanıń deneniń temperaturası haqqında gáp etiwge boladı hám bunday mániste lyuminescenciya "salqın" jaqtılıq shıǵarıw bolıp tabıladı.

Jaqtılıq shıǵarıwdıń ayırıqsha túri bolǵan fosforescenciya XVII ásirdeń basında táriyiplendi, biraq ol birinshi ret tolıq túrde XIX ásirdeń basında V.V.Petrov tárepinen úyrenildi.

373-súwret.
Lyuminescenciyanı baqlaw usılı.



Suyıq hám qattı denelerdegi lyuminescenciyanı baqlaw usılı gazlerdegi lyuminescenciyanı baqlaw usılı menen birdey: *S* dereginen shıqqan jaqtılıq (373-súwret) izertlenetuǵın *A* denesine qaray jiberiledi; payda bolǵan jaqtılıq shıǵarıwdı *Ab* baǵıtında baqlaydı. *F* hám *F'* filtrleri qozdırıwshı jaqtılıq penen lyuminescenciyanıń jaqtılıǵınıń ayırım spektrallıq uchastkaların bólip alıw ushın qollanıladı.

Gazler lyuminescenciyaǵa ayırım spektrallıq sızıqlardan turatuǵın jaqtılıqtı, al, qattı hám suyıq deneler bolsa, lyuminescenciyaǵa ayırım spektrallıq sızıqlardan turatuǵın jaqtılıqtı emes al kóbirek yamasa kemirek keńlikke iye bolǵan tutas jolaqtan turatuǵın jaqtılıqtı shıǵaradı. Bunday

jaǵdayda shıǵarılatuǵın jaqtılıqtıń spektrallıq quramınıń kelip túsken jaqtılıqtıń spektrallıq quramınan ózgeshe bolıwı usı qubılıs ushın tán bolıp tabıladı. Kópshilik jaǵdayda *Stoks qaǵıydası* orınlanadı. Bul qaǵıyda boyınsha lyuminescenciyanıń jaqtılıǵınıń tolqın uzınlıǵı usı lyuminescenciyaǵa alıp kelgen jaqtılıqtıń tolqın uzınlıǵınan úlken boladı. SHıǵarıw jolaǵı L (374-a súwret) jutılıw jolaǵı A ǵa salıstırǵanda úlken tolqın uzınlıqları tárepke qaray jılısqan. Jutılıw jolaǵı menen shıǵarıw jolaǵı 374-a súwrette kórsetilgende, bir birin azmaz basıwı múmkin.

Stoks qaǵıydası jaqtılıq haqqındaǵı fotonlıq kóz-qaraslardan tikkeley kelip shıǵadı: eger dene energiyası $\varepsilon_0 = h\nu_0$ ge teń, jiyiligi ν_0 bolǵan fotondı jutatuǵın bolsa, onda bul energiyanıń bir bólimi energiyası $\varepsilon = h\nu$ bolǵan fotonǵa, al qalǵan bólimi deneniń ishinde energiyanıń basqa túrlerine aylanadı. Energiyanıń bul sońǵı bólimin A arqalı belgilep, mınaday teńlikke iye bolamız:

$$h\nu_0 = h\nu + A. \quad (1)$$

$A \geq 0$ orınlı bolǵanlıqtan $\nu \leq \nu_0$, yaǵnıy lyuminescenciyanıń jaqtılıǵınıń jiyiligi qozdıratuǵın jaqtılıqtıń jiyiligine teń yamasa onnan kishi. Demek, lyuminescenciya jaqtılıǵınıń tolqın uzınlıǵı qozdırıwshı jaqtılıqtıń tolqın uzınlıǵına teń yamasa onnan úlken.

Jutıw jolaǵı menen shıǵarıw jolaǵınıń ayırım bólimleri bir biriniń ústine túsetuǵın 374-súwretke qaytıp kelemiz. Meyli, lyuminescenciyanı qozdırıw 374-b súwrette qoyıw shtrixlangan tar jolaq tárepinen júzege keltiriletuǵın bolsın. Stoks nızamı orınlanganda lyuminescenciyanıń spektrinde barlıq shıǵarıw jolaǵı ǵana qatnasıp qoymaydı, al tolqın uzınlıǵı qozdıratuǵın jolaqtıń tolqın uzınlıǵınan úlken bolǵan bólimi ǵana qatnasadı (374-b súwrette shtrixlangan). Biraq, geypara jaǵdaylarda Stoks qaǵıydası orınlanbaydı: tar jolaq penen qozdarganda lyuminescenciyanıń spektrinde qozdırıwshı jaqtılıqtıń tolqın uzınlıǵına salıstırǵanda tolqın uzınlıǵı kishi bolǵan tolqınlar da qatnasadı (374-c súwret). (1)-teńlik boyınsha lyuminescenciyanıń *antistokslıq* oblastı tek ǵana $A < 0$ teńsizligi orınlanganda ǵana, yaǵnıy lyuminescenciya qozdırıwshı fotonlardıń energiyasına lyuminescentlenetuǵın deneniń ishki derekleriniń esabınan energiya qosılatuǵın jaǵdayda orın aladı (355-paragrafta ayılǵanlar menen salıstırırız).

S.I.Vavilov boyınsha lyuminescentlik jaqtılıq shıǵarıw mınaday úsh tiptegi jaqtılıq shıǵarıwlardıń birine tuwrı keledi:

- 1) óz betinshe jaqtılıq shıǵarıw,
- 2) májbúriy nurlanıw hám
- 3) rekombinaciyaǵa nurlanıw.

Birinshi jaǵdayda qozǵan atomnıń (yamasa molekulanıń) elektronı onnan tolıq ayrılmaydı hám qanday da bir waqıttan keyin óziniń dáslepki halına qaytıp keledi hám usınıń menen birge jaqtılıq shıǵaradı. Bunday lyuminescenciyaǵa misal sıpatında bir atomlı puwlardıń rezonanslıq jaqtılıq shıǵarıwın kórsetiwge boladı. Bunday jaǵdayda sóniw waqtınıń shaması atomnıń (molekulanıń) qozǵan haldaǵı jasaw waqtı menen barabar, yaǵnıy 10^{-8} sekundtıń shamasında. Nurlanıwdıń ekinshi tipi metastabillik hal bolǵan jaǵdayda orın aladı; bul jaǵdayda da elektron qozǵan haldan ajıralmaydı, biraq óziniń dáslepki halına qorshaǵan bólekshelerdiń tásirinde ǵana qaytıp kele aladı. Eń aqırında, rekombinaciyaǵa nurlanıw elektron qozdırılatuǵın bóleksheden tolıq ajıralatuǵın jaǵdayda júzege keledi. Sońǵı eki jaǵdayda sóniw waqtınıń mánisi úlken bolıwı múmkin (sekundtıń kishi bólimlerinen bir neshe saatqa shekem).

Lyuminescenciyanı joqarıdaǵıday etip úsh tipke bóliw sxemalıq xarakterge iye. Kóp jaǵdaylarda lyuminescenciyanıń denelerdegi haqıyqıy processler kórip ótilgen elementar processlerdiń quramalı kombinaciya bolıp tabıladı.

Sońıwdıń eń ápiwayı nızamları mınalar bolıp tabıladı:

- 1) sóniwdiń eksponenciallıq nızamı:

$$I = I_0 e^{-at}. \quad (2)$$

Bul teńlikte I_0 - baslanǵısh intensivlik, a - turaqlı shama, t - waqıt.

$\tau = \frac{1}{a}$ shamasın *qozǵan haldıń jasaw waqtı* dep ataladı.

2) sóniwdiń giperbolalıq nızamı:

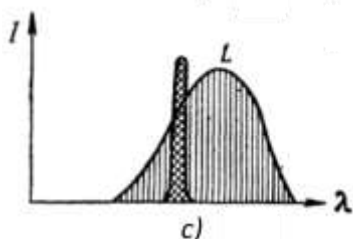
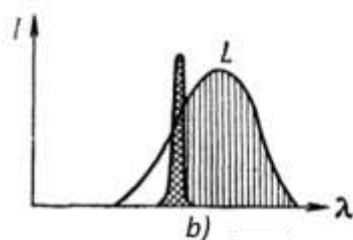
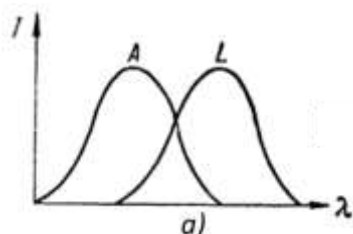
$$I = \frac{I_0}{(b + t)^2}. \quad (3)$$

Bul teńlikte b - turaqlı shama.

(2)-ańlatpanı logarifmlep

$$\ln I = \ln I_0 - at \quad (2a)$$

ańlatpasına iye bolamız.



374-súwret.

Jutılıw hám lyuminescenciya jolaqlarınıń salıstırmalı jaylasıwları.

Eger ordinata kósherine $\ln I$ di, al abscissa kósherine waqıt t nı qoysaq, onda (2)-teńleme tuwrı sızıq penen ańǵartıladı. 375-súwrette S.I.Vavilov hám V.L.Levshin tárepinen uranil duzınıń jaqtılıq shıǵarıwınıń sóniwin ólshewdiń nátiyjeleri keltirilgen. 1- hám 2-iyemeklikter qozdırwshı jaqtılıqtıń intensivliginiń hár qıylı mánislerine tiyisli (hár qıylı I_0 ler). Kórinip turǵanıday, (2)-formulaǵa sáykes bir birine parallel bolǵan tuwrılar alınadı.

Sóniwdiń eksponenciallıq nızamı óz betinshe nurlanıw ushın tán. Rekombinaciyalıq nurlanıw giperbolalıq nızam boyınsha sónedi. Óz betinshe nurlanıw bolǵan jaǵdayda sóniw waqıtı temperaturadan ǵárezli emes. Májbúriy hám rekombinaciyalıq nurlanıwda sóniw waqıtı temperaturadan kúshli ǵárezli hám qızıw menen kemeyedi.

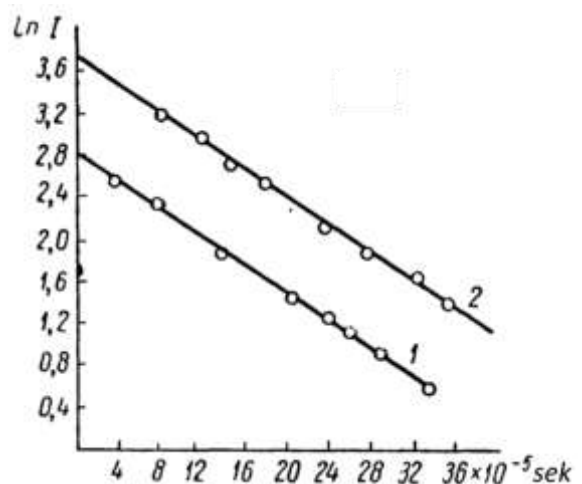
Fosforescenciyanıń qábiletli zatları *fosforlar* dep ataydı (kristallar bolǵan jaǵdayda - *kristallofosforlar*). Ádette, fosforlar tiykarǵı zatları (mısalı, ZnS , CaS , SrS h. b.) aktivatorlar (Cu , Mn , Bi , siyrek jer elementleri h.t.b.) menen qızdırw hám ($NaCl$, CaF_2 h.t.b.) balqıtıw jolı menen alınadı. Sońǵı waqıtları F.D.Klement tárepinen fosforlardı poroshoklardı ápiwayı túrde aralastırıw (qızdırwıwız), vakuumdegi puwlandırıw arqalı juqa plenkalardı payda etiw jolı alıwdıń múmkın ekenligi kórsetildi ("*sublamat-fosforlar*").

Fosfor tárepinen qozdırwıw toqtatılǵan momenti menen jaqtılıq shıǵarıwıw toqtaǵansha shıǵarılǵan jaqtılıqtıń energiyasınıń tolıq muǵdarın *jaqtılıq summası* dep ataydı. Fosfordı qızdırganda jaqtılıq summasınıń shaması ózgerissiz qaladı. Eger qızdırwıw nátiyjesinde sóniw waqıtı kishireyetuǵın bolsa, onda jaqtılıq summasınıń ózgermeytuǵınlıǵına baylanıslı temperaturanıń joqarılawı menen jaqtılıq shıǵarıwıw jarıqlıǵı kúsheyedi.

Fosforescenciyaдағы "kvantlıq shıǵıw" dıń mánisi 1 ge jete aladı: hár bir jutılǵan fotonǵa shıǵarılǵan foton sáykes keledi. Stoks nızamı orınlangan jaǵdayda shıǵarılǵan hár bir fotonnıń energiyası jutılǵan fotonnıń energiyasınan kishi bolǵanlıqtan, energiyalıq p.t.k. 1 den azmaz kishi boladı.

Fosforescenciya qubılısı kóp waqıtlardıń dawamında túsindirilmey keldi. Aktivatorlardıń atqaratuǵın xızmeti ayrıqsha túsiniksiz boldı. Fosforescenciyanıń orın alıwı ushın zárúrli bolǵan aktivatordıń muǵdarı júdá kishi bolıwı múmkin: shama menen $10^{-2} - 10^{-4} \%$. Biraq, usınıń menen birge aktivator pútkilley joq bolǵan jaǵdayda fosforescenciya baqlanbaydı.

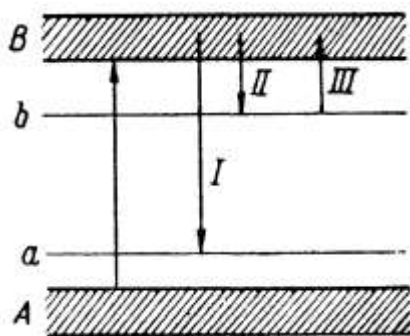
375-súwret.
Uranil duzlarınıń sóniw nızamı.



D.I. Bloxincev 1934-jılı birinshi bolıp fosforescenciya qubılısın túsindiriw ushın kristallardaǵı elektronlar ushın ruqsat etilgen energiya zonaları túsiniǵin kirgizdi. II tomдаǵı 163-paragrafta kórsetilip ótilgenindey, eń ápiwayı jaǵdayda kristalda ruqsat etilgen energiyalıq hallardıń eki zonası boladı. Olardıń biri tómengi, elektronlar menen tolǵan (376-súwrettegi A zonası), ekinshisi joqarǵı, toltırılmaǵan zona (B ótkizgishlik zonası). Qozdıruw jolı menen tómengi zonadaǵı elektrondı joqarǵı toltırılmaǵan zonaǵa ótkeriwge boladı. Kvantlıq mexanika boyınsha joqarǵı zonadan tómengi zonaǵı óz betinshe nur shıǵarıw menen ótiw múmkin emes. Eki zonanıń usınday sxeması lyuminescenciyanıwǵa qábiletli emes taza kristalǵa sáykes keledi.

Aktivator elektronlardıń múmkin bolǵan energiyalıq hallarınıń qosımsha qáddileriniń payda bolıwına alıp keledi. Tolǵan A zonasınıń qasında aktivator a nıń qáddileri payda boladı; usınıń menen birge B ótkizgishlik zonasınıń qasında kristallıq pánjerede aktivatordıń kirgiziliwi menen baylanıslı bolǵan jergilikli defektler hám bul defektlerdiń bar bolıwınıń sebebinen jergilikli (lokallıq) b qáddileri payda boladı. Bul soǵı qáddiler metastabilli qáddiler bolıp tabıladı.

Jaqtılıq jutılǵanda tómengi A zonasınıń elektronları joqarǵı B zonaǵa ótkeriledi. Olardıń bir bólegi metastabilli qáddige ótedi (II strelka). Eger b menen B qáddileriniń arasındaqı energiyalardıń ayırması jıllılıq qozǵalıslarınıń ortasha energiyasınan úlken bolsa, onda elektronlar nurlandırmay, kóp waqıt b qáddinde qala aladı. Tek izbe-iz, fluktuaciylardıń bar bolıwınıń nátiyjesinde olar B zonasına (III strelka) hám onnan a qáddine (I strelka) nurlanıw menen ótkeriledi. Qızdırılǵanda metastabilli b qáddinen B zonasına ótiwdiń itimallıǵın joqarılaydı hám usınıń menen birge ótiw sanları I da, yaǵnıy jaqtılıq shıǵarıwdıń jarıqlıǵı ósedi. Demek, keltirilgen sxema joqarıda keltirilgen temperaturanıń fosforescenciyaǵa tásin tikkeley túsindiridi.



376-súwret.
Fosforenscenciyanıń zonalıq teoriyasına.

Ádette, fosforlar elektronlardıń kelip urılıwınıń tásirinde de jaqtılıqtı shıǵara aladı (katodoluminescenciya).

II tomnıń 171-paragrafında yarım ótkizgishlerdiń elektr ótkizgishliginiń jıllılıq qozǵalıslarınıń esabınan bir qansha elektronlardıń elektronlar menen toltırılǵan tiykarǵı zonadan kóp joqarıda jaylasqan erkin zonaǵa ótiwi menen baylanıslı ekenligi ayılǵan edi. Elektronlardı erkin zonaǵa ótkeriw jaqtılıqtıń jutılıwı menen de júzege kele aladı. Nátiyjede yarım ótkizgishtiń elektr ótkizgishliginiń ósiwi kerek. Haqıyqatında da, jaqtılandırǵanda selen hám jáne bir qatar yarım ótkizgishler óziniń elektr ótkizgishligin ádewir joqarılatadı. 307-paragrafta kórsetilip ótilgenindey, bul qubılıs jaqtılıq aǵısların ólshew ushın paydalanıladı.

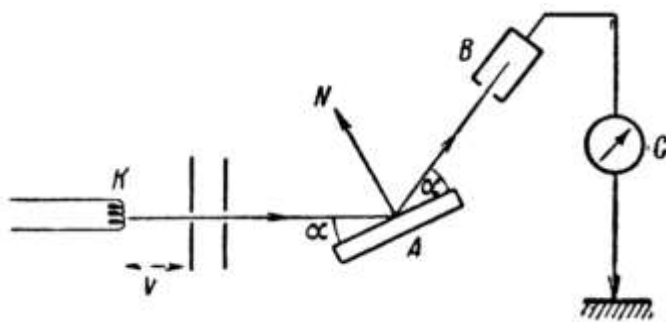
Lyuminescenciya qubılısları da kóp sanlı ámeliy paydalanılıwın tappaqta. Usı qubılıslarǵa lyuminescentlik analiz dep atalatuǵın usıl tiykarlanǵan. Lyuminescentlik jaqtılıq shıǵarıwdıń xarakteri boyınsha qanday da bir aralaspanıń quramın anıqlawǵa boladı. 312-paragrafta biz lyuminescenciyanıwshı zatlardıń házirgi zaman jaqtılıq dereklerinde qollanılıwın kórsettik. Lyuminescenciyanıwshı zatlar ultrafiolet nurlardı (ultrafiolet radiaciyanıń tásirinde payda bolatuǵın kózge kórinetuǵın jaqtılıq shıǵarıwdıń esabınan), fosfordıń infraqızıl nurlar menen nurlandırılıwınıń sebebinen payda bolatuǵın "tutarıwdıń" járdeminde infraqızıl nurlardı tabıw ushın da qollanıladı (katodlı oscillograflar, televizorlar h.t.b.).

XXXI BAP

KVANTLIQ MEXANIKA

§ 362. Elementar bólekshelerdiń tolqınlıq qásiyetleri. Bor teoriyasınıń jetkiliksizligi kvantlıq teoriyanıń hám elementar bólekshelerdiń tábiyatı haqqındaǵı biziń kóz-qaraslarımızdıń tiykarların kritikalıq qaytadan islewdi talap etedi. Bunday jaǵdayda elementar bóleksheler degende (geypara jaǵdaylarda mikrobóleksheler degende) elektronlardı, protonlardı hám basqa da ápiwayı bóleksheler názerde tutiladı. Fizikanıń rawajlanıw processinde elektrondı belgili koordinatalar hám belgili tezlikler menen táriyiplenetuǵın kishi mexanikalıq bólekshe sıpatında qarawdıń qanday dárejede durıs ekenligi máselesi payda boldı. Elektronlar haqqındaǵı eń birinshi kóz-qaraslar elektronlıq dásteler menen ótkerilgen tájiriybelerdiń tiykarında qalıplesti. Atap aytqanda, tap usı tájiriybeler elektron haqqındaǵı qozǵalısqı zaryadlangan bólekshelerdiń elektromagnit kúshleriniń tásirinde esaplanatuǵın kishi bólekshe sıpatındaǵı kóz-qaraslardıń payda bolıwına alıp keldi.

Biraq, elektronlardıń tábiyatın bunnan keyingi úyreniw bunday kóz-qaraslardıń jetkiliksiz ekenligin kórsetti. Bir *qatar tájiriybelerde elektronlıq dásteler tolqınlıq process ushın tán bolǵan qásiyetlerdi kórsetti*. Mısalı, kristallıq plastinka arqalı ótetuǵın elektronlar dástesiniń difrakciyaǵa ushıraytuǵınlıǵı tabıldı. Bul tájiriybeni tolıǵıraq tallaymız. Qızǵan K sabalıǵınan ushıp shıǵatuǵın elektronlar dástesi (377-súwret), potenciallar ayırması V shamasına teń bolǵan maydan menen tezletiledi. Bunnan keyin dástede bir qatar diafragmalar arqalı ótip, jıńışke (tar) dástede túrinde A monokristallına kelip túsedı. G galvanometrine tutastırılǵan B ionizaciyalı kamera payda bolǵan I toǵınıń kúshi boyınsha α múyeshinde kristalda shashıraǵan elektronlardıń sanın shaǵılısqıw nızamı boyınsha ólsheydi. Tájiriybe galvanometr arqalı ótetuǵın I toǵın elektronlıq dásteni tezletetuǵın potenciallar ayırması V nıń funkciyası sıpatında ólshewden ibarat. Potenciallar ayırması V nıń monotonlı túrde ózgerisinde I toǵınıń monotonlı túrde ózgermeytuǵınlıǵı, al bir qatar maksimumlardı beretuǵınlıǵı belgili boldı.



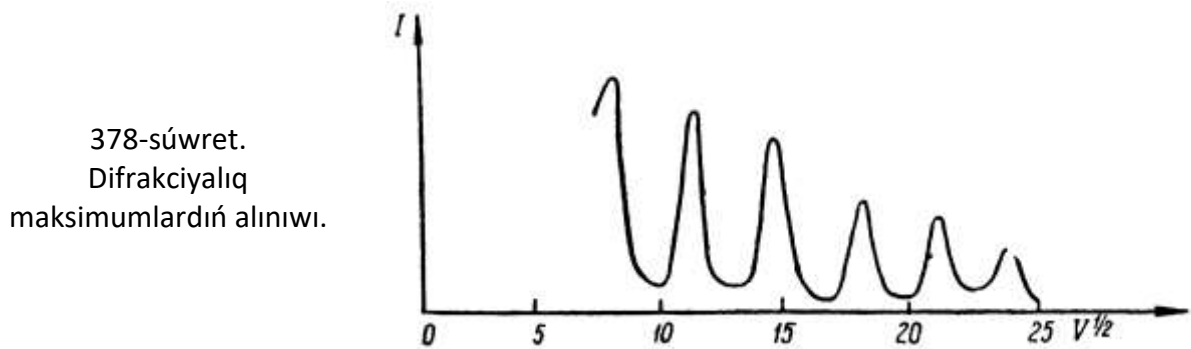
377-súwret.
Elektronlardıń difrakciyası boyınsha
tájiriybeniń sxeması.

Eger 378-súwrette kórstilgendey grafikti sızatuǵın bolsaq, onda tájiriybeniń nátiyjelerin túsindiriwge boladı. Abscissa kósherine potencial ayırmasınıń kvadrat túbiri bolǵan $\sqrt{V}$ shamalarınıń mánisleri, al ordinata kósherine toq kúshi I diń mánisleri qoyılǵan. Bunday jaǵdayda alınatuǵın ǵárezlik bir birinen derlik teńdey qashıqlıqlarda turǵan maksimumlardıń bar bolıwı menen táriyiplenedi. Bunnan elektronlardıń durıs shaǵılısqıwınıń tek potenciallar ayırmasınıń belgili bolǵan mánislerinde, yaǵnıy *elektronlardıń belgili bolǵan tezliklerinde* ǵana júzege keletuǵınlıǵı kórinedi.

Tap usınday qubilis rentgen nurlarınıń kristallardaǵı shashırawında baqlanadı (273-paragraf). α múyeshi menen táriyiplenetuǵın belgili bolǵan baǵıttaǵı shaǵılısqıw Vulf-Breggler qatnası orınlangan jaǵdayda ǵana orın aladı:

$$2d \sin \alpha = k\lambda. \quad (1)$$

Bul formulada λ - rentgen nurlarının tolqın uzınlığı, d - kristallıq pánjereniń turaqlısı, k - pútin san. Bul fakttı joqarıda keltirilgen nátiyjeler menen salıstırıp, biz elektronlıq dásteniń tolqınlıq qásiyetke iye boladı, al elektronlıq dásteniń tolqın uzınlığı elektronlardıń tezliginen gárezli degen juwmaqqa kelemiz.



Haqıyqatında da, tájiriybeniń sharayatlarında d menen α turaqlı bolatuǵın bolǵanlıqtan, tolqınlıq kóz-qarastan (1)-shárt λ niń sáykes mánisinde ǵana orınlanadı. Biz qaraǵan tájiriybede α múyeshindegi shaǵılısıw tek dástedegi elektronlardıń belgili bolǵan tezliginde ǵana júzege keledi. Eger elektronlıq dásteniń tolqın uzınlığı λ elektronlardıń tezligi v menen

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad (2)$$

túrinde baylanısqa bolǵan jaǵdayda (1)-shárt penen sanlıq sáykes keledi. Bul teńlikte h - Plank turaqlısı, al m - elektronnıń massası.

Tezletiwshi V potenciallar ayırmasın ótken elektronnıń tezligi v mınaǵan teń (II tomdaǵı 185-paragrafqa qarańız):

$$v = \sqrt{2 \frac{e}{m} \cdot V}.$$

v ushın bul mánisti (2)-formulaǵa qoyıp,

$$\lambda = h \sqrt{\frac{1}{2em} \cdot \frac{1}{\sqrt{V}}} \quad (2a)$$

formulasına iye bolamız. Bunnan keyin (1)-formulanı bılayınsha kóshirip jazıwǵa boladı:

$$2d \sin \alpha = kh \sqrt{\frac{1}{2em} \cdot \frac{1}{\sqrt{V}}} \quad (3)$$

Bul sońǵı teńlik galvanometr arqalı ótetuǵın I toǵı maksimumǵa jetetuǵın potenciallar ayırması V nıń mánisin anıqlaydı. Tájiriybeni ótkeriwdiń sharayatlarında α múyeshi ózgermeytuǵın bolǵanlıqtan, onda hár qıylı k lerge sáykes keletuǵın hár qıylı maksimumlar ushın (3)-teńlik boyınsha mınaǵan iye bolamız:

$$\sqrt{V} = kC. \quad (3a)$$

Bul teńliktegi C shaması

$$C = \frac{h}{2d \sin \alpha} \sqrt{\frac{1}{2em}}$$

teńliginiń járdeminde anıqlanadı hám tájiriybeniń sharayatlarında turaqlı bolıp qaladı.

Solay etip, (3a) ańlatpası boyınsha I toǵınıń maksimumına sáykes keletuǵın $\sqrt{V}$ nıń mánisleri bir birinen turaqlı C shamasına ayrıladı eken. Usıǵan sáykes, 378-paragraftaǵı bir birinen teńdey qashıqlıqlarda jaylasqa maksimumlardı alamız.

Haqiqatında, V nıń kishi mánislerinde alınatuǵın maksimumlardıń arasındaǵı qashıqlıqlar dál birdey bolmaydı; bul Vulf-Breggler shártin elektronlar tolqınları ushın tolıq paydalanıwǵa bolmaytuǵınlıǵı menen baylanıslı. Sebebi elektronlar dástesi kristalda sınadı (rentgen nurlarınırın sınbaytuǵınlıǵın atap ótemiz) hám sınawdıń shaması kishi tezlik penen qozǵalatuǵın elektronlar ushın kóbirek seziledi.

(2a) formulaǵa h tırn ornına onıń san mánisin qoyıp hám λ tolqın uzınlıǵın angstremlerde, al tezletiwshi potencıalları ayırması V nı voltlerde ańǵartıp, mınanı alamız:

$$\lambda (\text{\AA}) = 12,25 V^{-1/2} (\text{volt}) \quad (2b)$$

Solay etip, 1 V potencıalları ayırmasın ótken elektron 12,25 Å shamasındaǵı tolqın uzınlıǵı menen táriyiplenedi. Bul shama uzın tolqınlı rentgen nurlarına sáykes keledi. Elektronnıń tezligi qanshama úlken bolsa, onı táriyipleytuǵın tolqınnıń uzınlıǵı sonshama qısqa boladı. Maksimumlar alınatuǵın V nıń mánisleri (2b) teńligi menen tolıq sanlıq sáykeslikte beredi.

Eger mv shamasınıń bóleksheniń qozǵalıǵı muǵdarı p ekenligin itibarǵa alsaq, onda (2)-teńlikke basqa túrdi beriwge boladı. Bunday jaǵdayda bóleksheniń tolqın uzınlıǵı λ menen qozǵalıǵı muǵdarı p nıń arasındaǵı mınaday baylanısqa iye bolamız:

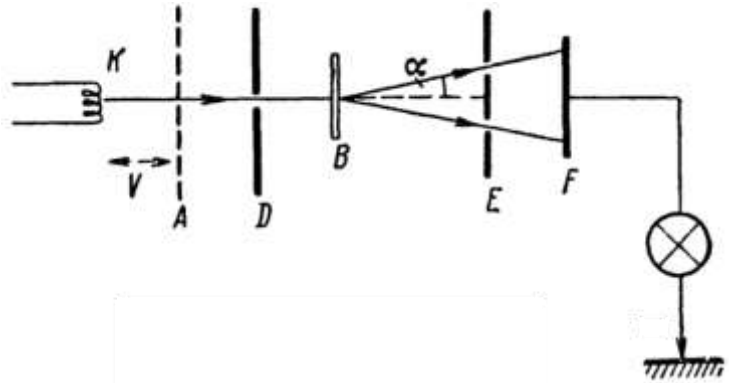
$$\lambda = \frac{h}{p}. \quad (4)$$

Elektronlıq dástelerdiń tolqınlıq tábiyatı dástelerdiń difrakciyası menen interferenciyası boyınsha tájiriybelerdiń oǵada kóp sanınan kelip shıǵadı.

Devison menen Germer kristallardaǵı rentgen nurlarınırın shashırarındaǵı interferenciyalıq maksimumlardı baqlaytuǵın tájiriybege uqsas bolǵan tájiriybede elektronlar dástesiniń nikel kristallındaǵı shashırarında interferenciyalıq maksimumlardıń payda bolatuǵınlıǵın baqladı⁴⁷. Juqa folgadaǵı tez qozǵalatuǵın elektronlardıń difrakciyasın baqlawlar da ótkerildi. Folga mayda tártipsiz baǵıtlanǵan kishkene kristallardıń jıynaǵı bolıp tabıladı, nátiyjede shashırar ekranda difrakciyalıq dóńgeleklerdi beriwi kerek (274-paragraf). Bul dóńgeleklerdiń diametrleri boyınsha, folganıń kishi kristallarınırın pánjeresiniń turaqlısı d nı bilip, shashıraytuǵın bólekshelerdiń tolqın uzınlıǵı λ nı anıqlawǵa boladı. Bul tájiriybeler (2)-qatnastı tolıq tastıyıqladı. 5-súwrette 5 (qosımshaǵa qarańız) mis folgadan alınǵan difrakciyalıq maksimumlardıń foto súwreti keltirilgen. Bul tájiriybeniń bir qansha basqasha bolǵan variantı kishi tezlikler menen qozǵalatuǵın elektronlardıń alyuminiy folga arqalı ótiwin baqlaǵan P.S.Tartakovskiy tárepinen ótkerildi. 379-súwrette ótkerilgen tájiriybeniń sxeması kórsetilgen. Bul súwrette K - elektronlardıń deregi bolıp tabılatuǵın qızdırılǵan katod, A - elektronlar ushın tezletiwshi maydan payda etetuǵın tor, D - diafragma, B - shashıratıwshı folga. Folganıń mayda kristallarında shashırarǵan elektronlar dóńgelek tesik tesilgen E plastinkasına kelip túsedı. Tesik arqalı tek α múyeshine shashırarǵan elektronlar ótedi. Tesiktiń artında elektr toǵın ótkeretuǵın elektrometr menen tutastırılǵan F plastinkası jaylastırılǵan. Tájiriybeniń mánisi elektrometr arqalı ótetuǵın toqtıń shamasın tezletiwshi potencıalları ayırması V nıń funkciyası sıpatında ólshewden ibarat (1700 V ke shekem). Toqtıń maksimumları elektronlardıń belgili bolǵan mánislerinde alınǵan. Bul jaǵdayda da eger elektronǵa onıń tezligi menen (2)-qatnas penen baylanısqa tolqın uzınlıǵın beretuǵın bolsaq, onda difrakciyalıq súwretti esaplaw tájiriybede alınǵan maǵlıwmatlarǵa tolıq sáykes keledi.

⁴⁷ Klinton Djozef Devisson (inglizshe Clinton Joseph Davisson, 1881-jılı 22-oktyabr kúni tuwılǵan hám 1958-jılı 1-fevral kúni qaytı bolǵan) - amerikalı fizik, belgili bolǵan Devisson-Germer tájiriybesinde elektronlardıń difrakciyasın ashqanı ushın 1937-jılı fizika boyınsha Nobel sıylıǵın alıwǵa miyasar boldı. Lester Xelbert Djermer (inglizshe Lester Halbert Germer; 1896-jılı 10-oktyabr kúni tuwılǵan hám 1971-jılı 30-oktyabr kúni qaytı bolǵan) - amerikalı fizik (Awdarıwshılar).

379-paragraf.
P.S.Tartakovskiydiń tájiribesiniń
sxeması.



Elektrik jaqtan neytral bolǵan bóleksheler de tolqınlıq qásiyetlerge iye boladı degen oydıń payda bolıwı tábiyiy. Molekulalıq hám atomlıq dásteler menen eksperimentlerdi ótkeriw ádewir quramalı. Sebebi bunday dástelerdi elektr maydanınıń járdeminde basqarıw da, zaryadlanbaǵan bólekshelerdi registraciyalaw da ádewir qıyın. Usınıń menen birge, atomlar menen molekular kóp sanlı maydaraq bolǵan bólekshelerden turadı (elektronlar menen yadrolardan) hám sonlıqtan elektrongá salıstırǵanda ádewir quramalı bolǵan obekt bolıp tabıladı. Biraq shashıraǵan bir qatar gazlerdiń molekulalıq dásteleriniń ústinen ótkerilgen tájiriybeler bul dástelerdiń tolqınlıq qásiyetlerge iye bolatuǵınlıǵın kórsetti hám dásteniń tolqın uzınlıǵı menen bólekshelerdiń qozǵalıw muǵdarınıń arasındıǵı qatnastı ańǵartatuǵın (4)-qatnastıń durıs ekenligin tolıq tastıyıqladı. Difrakciyalıq qubılıslar neytronlarda da baqlandı.

Joqarıda bayanlanǵan eksperimentallıq jumıslardı tallawdan keyin biz *belgili tezlikke iye hám belgili baǵıtta tarqalatuǵın elementar bólekshelerdiń dástesi tegis tolqınnan alınatuǵın interferenciyalıq hám difrakciyalıq súwretlerge usaǵan interferenciyalıq hám difrakciyalıq súwretlerdi beredi dep juwmaq* shıǵaramız; bunday jaǵdayda tolqın uzınlıǵı λ bóleksheniń qozǵalıw muǵdarı arqalı (4)-qatnas penen ańlatıladı.

§ 363. Shredinger teńlemesi. Klassikalıq mexanikanıń kóz-qarasları boyınsha hár bir bóleksheni belgili bolǵan traektoriya boyınsha qozǵaladı hám bólekshelerdiń dástesi tolqınlıq processke tán bolǵan interferenciya yamasa difrakciya qubılısına ushıramaydı. Tájiriybeler elementar bólekshelerdiń dástelerinde interferenciya menen difrakciya orın alatuǵın bolǵanlıqtan bólekshelerdiń qásiyetlerin klassikalıq mexanikanıń teńlemeleriniń járdeminde kórsetiwdiń múmkinshiliginiń joq ekenligi kelip shıǵadı. Elementar bólekshelerdiń barlıq qásiyetlerin óziniń ishine alatuǵın teoriyanıń olardıń tolqınlıq qásiyetin de óziniń ishine alıwı kerek. Bunnan aldırǵı paragraflarda táriyiplengen tájiriybelerden elementar bólekshelerdiń parallel dástesi bóleksheniń tezligi v nıń baǵıtında tarqalatuǵın tegis tolqınnıń qásiyetine iye bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı.

On normalınıń baǵıtında tarqalatuǵın tegis tolqındı ulıwma túrde qaraymız (380-súwret). Tolqın frontınıń *AB* tegisligindegi terbelislerin kompleksli túrde

$$\Psi = \psi_0 e^{-2\pi i \nu t}$$

ańlatpasınıń járdeminde jazamız. Bul teńlikte ψ_0 - amplituda, ν - jiyilik. Bazı bir waqıttan keyin tolqın frontı jılısadı hám *A'B'* awhalına keledi.

Bul jańa front tegisligindegi terbelisler

$$\Psi = \psi_0 e^{-2\pi i \nu (t - \tau)} \quad (1)$$

formulası menen ańǵartıladı.

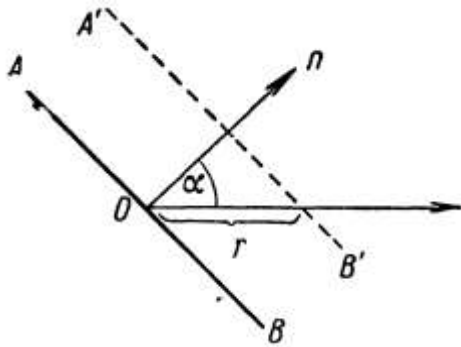
O noqatınan bazı bir ıqtıyarlı baǵıtta *On* normalı menen α múyeshin jasaytuǵın baǵıtta *r* qashıqlıǵın belgilep alamız. Bunday jaǵdayda

$$\tau = \frac{r \cdot \cos \alpha}{v} = \frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{n}}{v}$$

teńligi orınly boladı. Bul ańlatpada $\mathbf{n}$ - On normalınıń baǵıtında túsirilgen birlik vektor, $\mathbf{r} \cdot \mathbf{n}$ - arqalı $\mathbf{r}$ hám $\mathbf{n}$ vektorlarınń skalyar kóbeymesi belgilengen. τ dıń usı mánisin (1)-ańlatpaǵa qoyıp, hám $\frac{v}{\lambda} = \frac{1}{\lambda}$ teńliginiń orınly ekenligine itibar berip,

$$\psi = \psi_0 e^{-2\pi i \left(\frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{n}}{\lambda} - vt \right)} \quad (2)$$

ańlatpasına iye bolamız.



380-súwret.

Tegis tolqın frontınıń tarqalıwı.

Bul ańlatpanı dástelerdiń interferenciya menen difrakciya boyınsha tájiriybelerden alınǵan tolqın uzınlıǵı λ ge teń bolǵan bólekshelerdiń dástesin táriyiplew ushın paydalanamız [362-paragraftaǵı (2)-formula]:

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

$\mathbf{n}$ normalınıń baǵıtı bóleksheniń tezligi $\mathbf{v}$ nıń baǵıtına sáykes keledi. Sonlıqtan, $\frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{n}}{\lambda}$ shamasınıń mánisi mınaǵan teń boladı:

$$\frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{n}}{\lambda} = \frac{\mathbf{r} \cdot m\mathbf{v}}{h} = \frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{p}}{h}$$

Bul teńliklerde $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ - qozǵalıstı muǵdarınıń vektori.

Tolqın uzınlıǵı menen birge (2)-ańlatpa v jıyılıǵına de iye. Bul shamanı elementar bólekshelerdiń mexanikalıq qásiyetleri menen salıstırıwdı optikalıq analogiyalardıń tiykarında júrgizemiz. Jaqtılıqtıń fotonlıq teoriyasında fotonnıń jıyılıǵı v onıń energiya ε menen mınaday qatnas boyınsha baylanısqan:

$$\varepsilon = h\nu$$

Jıyilik penen energiyanıń arasıdaǵı bul baylanıstı jıyilik ν dı bóleksheniń energiya W menen

$$\nu = \frac{W}{h}$$

túrinde baylanısqan dep esaplap, onı elementar bólekshelerdiń qozǵalıstı ushın paydalanamız. Bul ulıwmalastırıwdıń durıs ekenligin biz teoriyanıń nátiyjelerin tájiriybede alınǵan nátiyjeler menen salıstırǵanda alamız.

Turaqlı tezlikke iye bolǵan bólekshelerdiń dástesin táriyipleytuǵın tolqın ushın (2)-teńlik boyınsha eń aqırında mınaday ańlatpanı alamız:

$$\psi = \psi_0 e^{-2\pi i \left(\frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{p}}{h} - \frac{W}{h} t \right)} = \psi_0 e^{-\frac{i}{h}(Wt - \mathbf{r} \cdot \mathbf{p})} \quad (3)$$

ψ funkciya tolqın funkciya, al ψ_0 shaması onıń amplitudası bolıp tabıladı.

Tolqın funkciya ψ dıń fizikalıq mánisin optikadaǵı difrakciyalıq qubılıslardı elementar bólekshelerdiń difrakciya menen salıstırıw arqalı anıqlawǵa boladı.

Optikalıq qubılıslar elementar bóleksheler menen baylanıslı bolǵan basqa qubılıslar sıyaqlı qos tábiyattı - tolqınlıq hám korpuskulalıq tábiyattı kórsetedi. Interferenciya menen difrakciya jaqtılıqtıń tolqınlıq qásiyetleri kórinedi; fotoeffektti, jaqtılıqtıń shıǵarılıwı menen jutılıwın jaqtılıqtıń tek korpuskulalıq qásiyetleri boyınsha túsindiriw múmkin. Tolqınlıq hám korpuskulalıq teoriyalardıń ekewiniń de kóz-qarasında turıp usı qubılıslardıń eki gruppasınıń arasıdaǵı

baylanıstı tabıwǵa boladı. Mısalı, Tolqınlıq teoriyanıń kóz-qarasları boyınsha interferenciya qubılısında jaqtılıqtıń maksimumları baqlanatuǵın keńisliktiń bólimlerinde jaqtılıq terbelisleriniń amplitudası maksimalıq mániske iye: keńisliktegi qálegen orındaǵı jaqtılıqtıń intensivligi terbelislerdiń amplitudasınıń kvadratı a_0^2 qa proporcional. Fotonlıq teoriyanıń kóz-qarasları boyınsha jaqtılıqtıń intensivligi keńisliktiń biz qarap atırǵan bólimine kelip túsetuǵın fotonlardıń sanına proporcional. Eger keńisliktiń bazı bir kólemine kelip túsetuǵın fotonlardıń sanı keńisliktiń usı oblastı ushın anıqlanǵan jaqtılıq terbelisleriniń amplitudasınıń kvadratına proporcional dep boljasa, onda eki teoriyanıń bir birine sáykes keliwi orın aladı.

Tallawdıń usı usılın elementar bólekshelerge alıp kelip, *biz keńisliktiń dv kólemine kelip túsetuǵın bólekshelerdiń sanı $\psi_0^2 dv$ shamasına proporcional*, yaǵnıy dv kólemi ushın esaplanǵan Ψ tolqın funkciyasınıń amplitudasınıń kvadratı menen kólemniń usı elementiniń kóbeymesine proporcional dep esaplaytuǵın bolamız. (2)-ańlatpadaǵı Ψ funkciyası kompleksli bolǵanlıqtan, ulıwma aytqanda ψ_0 kompleksli amplitudasınıń da, $\psi_0^2 dv$ ańlatpasınıń da mınaday ańlatpa menen almasırlılıwı kerek:

$$\psi_0 \psi_0^* dv = \Psi \cdot \Psi^* dv.$$

Bul teńlikte Ψ^* shaması Ψ shamasınıń kompleksli túyinlesi bolıp tabıladı.

Tolıǵıraq qaraw bóleksheler sanınıń $\Psi \cdot \Psi^* dv$ sanına proporcionalıǵı haqqındaǵı boljawdıń dálligin joqarılatıwdı talap etedi. Biz qarap atırǵan qubılıstı kvantlıq mexanikanıń kóz-qaraslarında turıp qaraw statistikalıq xarakterge iye. Sonlıqtan joqarıda keltirilgen jaǵdaydı mınaday jaǵday menen almasırwıw kerek: *elementar bóleksheni kólemniń dv elementinde tabıw kólemniń usı elementi ushın esaplanǵan $\Psi \cdot \Psi^* dv$ shamasına proporcional*. Keńisliktiń bazı bir oblastına bazı bir waqıt aralıǵında kelip túsetuǵın bólekshelerdiń sanı olardıń usı oblastqa kelip túsiwiniń itimallıǵına proporcional. Bunıń durıslıǵına tájiriybelerdı bir birine uqsas bolǵan sharayatlarda kóp ret qaytalawdıń nátiyjesinde iseniwge boladı.

Kvantlıq teoriyada joqarıda keltirilgen tallawlar tezlikleri turaqlı bolmaǵan erkin emes bóleksheler ushın ulıwmalastırıladı. İqtıyarlı kúsh maydanlarında qozǵalatuǵın bóleksheler bazı bir tolqın funkciyası menen táriyiplenedi dep boljaymız. Biraq, bul jaǵdayda bunday funkciyanıń analitikalıq túri turaqlı tezlik penen qozǵalatuǵın erkin bóleksheler ushın jazılǵan tolqın funkciyasınan ózgeshe boladı. Bunday jaǵdayda da $\Psi \cdot \Psi^* dv$ shaması bóleksheni dv kóleminde tabıwdıń itimallıǵı bolıp tabıladı.

Berilgen kúshtiń tásirinde qozǵalatuǵın bóleksheni ushın tolqın funkciyasın qalayınsha anıqlawǵa boladı degen soraw payda boladı. Turaqlı tezlikke iye bolǵan bóleksheni ushın Ψ tolqın funkciyası [(3)-formula] tek optikalıq analogiyanıń tiykarında alındı. Biraq, onıń basqa máseleler ushın túrinin qanday bolatuǵınlıǵı óz-ózin kórinipturǵan joq⁴⁸. Shredinger (1925-jılı) kvantlıq teoriyanı islep shıǵıw processinde qálegen máseledegi tolqın funkciya qanaatlandıratuǵın differenciallıq teńleme ni taptı. Teńleme Shredinger tárepinen analitikalıq mexanika menen optikada orın alatuǵın analogiyalardı tallawdıń tiykarında tabıldı. Shredinger teńlemesinen alınatuǵın nátiyjeler kóp sanlı eksperimentallıq faktlerge sáykes keledi. Biz bul jerde teńleme ni erkin bóleksheler ushın alamız hám onnan keyin onı erkin bolmaǵan bóleksheler ushın ulıwmalastırıwdı kórsetemiz.

(3)-ańlatpa menen kórsetiletuǵın erkin bólekshelerdiń tolqın funkciyasın bılayınsha jazıwǵa boladı:

⁴⁸ Qálegen mikrobóleksheniń halların táriyiplewde fundamentallıq áhmiyetke iye bolǵan tolqın funkciyası, ulıwma aytqanda, sózdiń ádettegidey mánisindegi tolqınǵa sáykes kelmeydi. Mısalı, bir biri menen tásirlesetuǵın bóleksheler haqqındaǵı máselelerde tolqın funkciyası barlıq bólekshelerdiń koordinatalarınan ǵárezli boladı hám, sonlıqtan, onı úsh ólshemli keńisliktegi ádettegidey tolqın túrinde túsindiriwe bolmaydı.

$$\Psi = \psi_0 e^{-\frac{i}{\hbar}(Wt - \mathbf{r} \cdot \mathbf{p})} = e^{-\frac{i}{\hbar}Wt} \cdot \psi.$$

Bul teńlikte $\psi = \psi_0 e^{-\frac{i}{\hbar}Wt}$ - tolqın funkciyasınıń tek koordinatalardan ǵárezli bolǵan bólegi. $\mathbf{r} \cdot \mathbf{p}$ kóbeymesin ashıp, $\mathbf{r} \cdot \mathbf{p} = xp_x + yp_y + zp_z$ túrinde kórsetip, amplitudalıq funkciyanı bilayınsha jazamız:

$$\psi = \psi_0 e^{-\frac{i}{\hbar}(xp_x + yp_y + zp_z)}.$$

ψ funkciyasına Laplas operatorın paydalanamız:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

Bunday jaǵdayda mınaday teńlikti alamız:

$$\Delta\psi = -\frac{1}{\hbar^2}(p_x^2 + p_y^2 + p_z^2)\psi = -\frac{1}{\hbar^2}(mv)^2\psi. \quad (4)$$

Erkin bólekshe ushın $(mv)^2$ shamasınıń bóleksheniń massası menen kinetikalıq energiya W_k nıń ekeletilgen kóbeymesine teń ekenligin ańǵarıp, mınaday ańlatpaǵa iye bolamız:

$$(mv)^2 = 2mW_k$$

hám (4)-teńlikti

$$\Delta\psi = -\frac{2mW_k}{\hbar^2}\psi$$

yamasa

$$\Delta\psi + \frac{2m}{\hbar^2}W_k\psi = 0 \quad (5)$$

túrinde jazamız. Bul teńleme erkin bólekshe ushın Shredinger teńlemesi bolıp tabıladı. Bul teńlemenı erkin bolmaǵan bólekshe ushın ulıwmalastırıw W_k kinetikalıq energianı tolıq W energiya menen potenciallıq U energiylarınıń ayırması túrinde jazıw jolı menen ámelge asırıladı:

$$W_k = W - U.$$

(5)-teńlemege W_k nıń ornına onıń usı mánisin qoyıp,

$$\Delta\psi + \frac{2m}{\hbar^2}(W - U)\psi \quad (6)$$

teńlemesine iye bolamız. (6)-teńleme U potenciallıq energiya menen táriyiplenetuǵın maydanda qozǵalatuǵın bólekshe ushın *Shredinger teńlemesi* dep ataladı. Máseleler potenciallıq energiya U dıń túri boyınsha ayırıladı. Erkin emes bólekshelerdi táriyipleytuǵın tolqın funkciyası (6)-teńlemenıń sheshimi túrinde tabıladı. Bul teńlemege qaralıp atırǵan máselege sáykes keletuǵın potenciallıq energiya U dı qoyıw kerek.

Biraq, matematikalıq tallawda (6)-teńlemenıń óz-ózinen ψ funkciyasın tolıq anıqlamaytuǵınlıǵı kórsetiledi. ψ funkciyasınıń anıqlanǵan bolıwı ushın oǵan onıń fizikalıq mánisine sáykes qosımsha talaplar qoyıladı. Bul talaplar mınalardan ibarat: qarap atırılǵan barlıq keńislikte ψ funkciyasınıń *shekli, bir mánisli hám úzliksiz bolıwı kerek*. Bul talaplar $\psi\psi^* dv$ shamasınıń dv kóleminiń elementinde bóleksheni tabıwdıń itimallıǵı ekenliginen kelip shıǵadı. Eger ψ funkciyası bul talaplardı qanaatlandırmaytuǵın bolsa, onda ol bólekshelerdiń durıs statistikalıq xarakteristikasını bermegen bolar edi. Sebebi itimallıqtıń bir mánisli emes, sheksiz hám bir noqattan ekinshi noqatqa ótkende sekirmeli túrde ózgeretuǵın shama bolıwı ayqın.

Shredinger teńlemesiniń áhmiyeti onıń sheshiminiń tájiriybeniń nátiyjelerine sáykes keletuǵın bólekshelerdiń statistikalıq tarqalıwın beretuǵınlıǵınan ǵana ibarat emes. Onıń jáne bir áhmiyeti (6)-teńlemenı tolqın funkciyasına qoyılatuǵın shártler menen birge sheshkende energiyanıń kvantlanatuǵınlıǵınıń tikkeley kelip shıǵıwınan ibarat. (6)-teńleme jáne mınaday da matematikalıq qásiyetlerge iye: ulıwma aytqanda teńleme tolıq energiyanıń qálegen mánislerinde shekli, bir mánisli hám úzliksiz emes sheshimlerde, yaǵnıy fizikalıq mániske iye bolǵan sheshimlerde iye bolmaydı. Mısalı, eger bizler vodorod atomı ushın másele sheshetuǵın bolsaq, yaǵnıy (6)-teńlemege U dıń ornına bir biri menen tásirlesetuǵın hár qıylı belgilerge iye

bolğan eki noqatlıq bólekshe ushın potencial energiyanıń mánisin qoyatuǵın bolsaq, onda teńleme Bor teoriyasındaǵı vodorod atomınıń stacionar hallarına sáykes keletuǵın energiyalardıń mánisleri ushın shekli, bir mánisli hám úzliksiz sheshimlerge iye bolamız.

Solay etip, kvantlıq mexanikada energiyanıń "kvantlanıwı" onıń teoriyalıq ózgeshelikleriniń tábiyiy rawajlanıwı sıpatında alınadı. Al, Bor teoriyasında bolsa kvantlanıw jasalma túrde oylap tabılǵan "kvantlanıw qaǵıydalarınan" kelip shıqqan edi.

Barlıq máselelerdiń energiyanıń kvantlanıwına alıp keletuǵınlıǵın ańǵaramız. Mısalı, erkin bóleksheler ushın (6)-teńlemenıń sheshimi, álbette, W tolıq energiyanıń qálegen mánisinde bir mánisli hám úzliksiz. Bul erkin bólekshelerdiń energiyasınıń qálegen mániske iye bolatuǵınlıǵın ańǵartadı.

§ 364. Klassikalıq teoriyanıń paydalanılıw shegarası. Joqarıda kórgenimizdey, elementar bóleksheler ("mikrobóleksheler") menen ótkerilgen tájiriybelerdiń jıynaǵı, mısalı, elektronlar menen ótkerilgen tájiriybelerdiń jıynaǵı bir qatar jaǵdaylarda bul "bólekshelerdiń" tolqınlıq qásiyetke iye bolatuǵınlıǵın, al basqa jaǵdaylarda ádettegidey mikrobólekshelerge tán bolğan korpuskulalıq qásiyetlerge iye bolatuǵınlıǵın kórsetedi.

Elektronlardıń korpuskulalıq qásiyetleri olardıń tásiiri kishi oblastta kórinetuǵın jaǵdaylarda tabıladı. Mısalı, elektron fluorescenciyalanatuǵın ekranda scintillyaciyalardı payda etkende yamasa Vilson kamerasında izdi bergende baqlanadı (371-paragraf). Kerisinshe, eger elektronlardı belgili orbitalar boyınsha qozǵalatuǵın klassikalıq mexanikanıń ádettegi bóleksheleri dep kóz aldımızǵa elesletsek, onda difrakciya qubılısın túsindiriwdiń múmkinshiligi bolmaydı. Bul qubılıslardıń elektronlarda tolqınlıq qásiyetlerdiń bar ekenligin ańǵartadı hám onı ózimiz ushın ayqınlastırıw ushın difrakciya qubılısın jáne bir ret qaraymız.

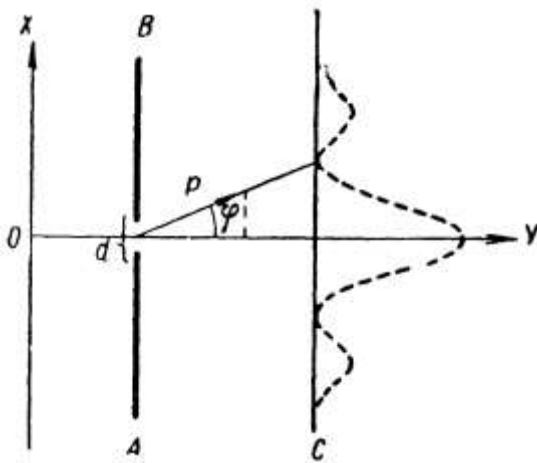
Belgili tezlikke iye mikrobólekshelerdiń parallel dástesi bir birine parallel bolğan eki sańlaqqa kelip túsedı hám ekranda difrakciya qubılısın beredi dep boljayıq. Eger hár bir mikrobólekshe belgili bolğan traektoriya boyınsha qozǵalatuǵın bolsa (yaǵnıy mexanikalıq mánistegi bólekshe bolıp tabılatuǵın bolsa), onda bazı bir mikrobóleksheler bir sańlaq, ekinshileri ekinshi sańlaq arqalı ótedi. Bunday boljawda ekrandaǵı bólekshelerdiń tarqalıwı birinshi hám ekinshi sańlaqlar arqalı ótken bólekshelerdiń tarqalıwınıń qosındısınan turadı. Basqa sóz benen aytqanda ekrandaǵı sańlaqlardıń ekewi de ashıq turǵan jaǵdayda alınǵan súwret tek birinshi sańlaq ashıq bolğan hám tek ekinshi sańlaq ashıq bolğan jaǵdaydaǵı súwretlerdiń qosındısınan turadı. Biraq, haqıyqatında, eki sańlaqtan alınǵan difrakciya súwreti sańlaqlardıń hár birinen alınǵan difrakciyalıq súwretlerdiń qosındısı bolıp tabılmaydı. Demek, mikrobóleksheni belgili traektoriya boyınsha qozǵalatuǵın hám, sonlıqtan, eki sańlaqtıń tek birewinen ótetuǵın klassikalıq bólekshe dep qarawǵa tırısw durıs emes nátiyjege alıp keledi. Mikrobólekshege sańlaqlardıń ekewi de tásir etedi. Bul mikrobóleksheniń klassikalıq mexanikada qabıl etilgen bólekshe emes ekenligin ańǵartadı.

Házirgi waqıtları eksperimentlerde tolqınlıq qásiyettiń elektronlardıń dástesine ǵana emes, al hár bir ayırım elektrongá da tiyisli ekenligi anıqlandı. Bibermannıń, Sushkinniń hám Fabrikanttıń jumısında elektronlıq dásteniń intensivligi júdá kishi bolğan jaǵdayda mayda kristallıq poroshoktan alınǵan difrakciyalıq saqıynalardıń fotosúwreti túsirildi. Saqıynalardıń orınları dásteniń intensivligi júdá kishi bolğan jaǵdayda da, hátte ásbap arqalı elektronlar birewden ótetuǵın jaǵdayda da ózgermegen. Tájiriybelerde dásteniń júdá kishi intensivliklerinde de, hátte elektronlardıń birinen soń biri kelip túsiwiniń arasındaǵı waqıt elektronnıń ásbap arqalı ushıp ótiw waqıtınan 10^4 ese úlken bolatuǵın jaǵdayda da difrakciyalıq súwret alınǵan. Solay etip, difrakciyalıq súwret plastinkaǵa birinen soń biri kelip túsetuǵın ayırım elektronlar tárepinen payda etilgen dep juwmaq shıǵaramız.

Joqarıda ayılǵanlardan mikrobóleksheni ádettegidey mikrobóleksheni táriyipleytuǵın shamalar (mısalı, onıń koordinataları, tezligi) menen táriyiplewge bolmaytuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Mikrobólekshelerdiń qásiyetlerin táriyiplew klassikalıq mexanikadaǵı bóleksheni táriyiplewden

özgeshe bolıwı kerek. Usınday táriyplew kvantlıq mexanikada tolqın funkciyasınıń járdeminde beriledi.

Qálegen deneniń obektivlik qásiyetleri oǵan salıstırǵanda sırtta jaylasqan deneler menen óz-ara tásirlesiwı boyınsha anıqlanadı. Sırtqı sharayatlardıń xarakterine baylanıslı úyreniletuǵın deneniń anaw yamasa mınaw qásiyeti kórinedi. Kvantlıq-mexanikalıq teoriya qaralıp atırǵan bólekshe jaylasqan sharayatlardı esapqa aladı. Mısalı, eger mikrobólekshe tezliginiń shaması boyınsha da, baǵıtı boyınsha da tolıq anıq bolǵan halǵa iye bolsa, onda oǵan sáykes keletuǵın tolqın funkciyası 363-paragraftaǵı (3)-funkciyanıń túrindey túrge iye boladı. Eger shártler mikrobólekshe ózin keńisliktiń kishi bóliminde ǵana kórsetetuǵın bolsa, onda tolqın funkciyası basqa, biz tómende kórsetetuǵın túrge iye boladı. Solay etip, kvantlıq mexanikada mikrobólekshelerdiń haqıyqıy qásiyetlerin táriyplew usı bólekshe jaylasqan haldaǵı sharayatlardı sáykes beriledi.



381-súwret.

"Anıqsızlıq qatnasların" tiykarlawǵa.

Biraq, bir qansha máselelerde biz mikrobóleksheni *juwıq túrde*, anıǵınaq aytqanda, oǵan tán bolmaǵan túsiniklerde, mısalı mikrobóleksheni *bir waqıtta* koordinatalar menen tezliklerdiń belgili bolǵan intervalları menen táriyplewge boladı. Bul túsiniklerdi paydalanıwdıń jaramlıǵınıń dárejesi Geyzenberg tárepinen tabılǵan hám "anıqsızlıq qatnasları" dep atalatuǵın matematikalıq qatnastıń járdeminde anıqlanadı. Bul qatnastı, mısalı, difrakciya qubılısın tabıw jolı menen tiykarlawǵa boladı.

Ápiwayılıq ushın, bir sańlaqtaǵı difrakciyanı qaraymız. OY kósheriniń baǵıtında belgili bolǵan v tezligi menen ushatuǵın elektronlardıń dástesin qaraymız (381-súwret). Keńligi d ǵa teń bolǵan sańlaǵı bar AB ekranı dástege perpendikulyar baǵıtta jaylasqan. Ekinshi CD ekranında difrakciyalıq súwret baqlanadı. Tolqınlıq teoriyanıń kóz-qaraslarında qubılıs mınadan ibarat: sańlaqqa kelip túsken tegis tolqın difrakciyaǵa ushıraydı; CD ekranında intensivliktiń jaqtılıqtıń bir sańlaqtaǵı difrakciasındaǵı intensivliktiń tarqlıwında bolǵan tarqalıw alınadı (269-súwret). Bul tarqalıw 381-súwrette punktir sıziq penen kórsetilgen. Nolinshi tártipli maksimum $\varphi = 0$ múyeshinde jatadı; birinshi maksimum

$$\sin \varphi = l/d \quad (1)$$

shártin qanaatlandıratuǵın múyeshte alınadı. Bul teńlikte λ - elektronlar dástesine sáykes keletuǵın tolqın uzınlıǵı. Intensivliktiń bas bólimi oraylıq maksimumǵa tiyisli, sonlıqtan biz ekinshi maksimumlardıń tutqan ornın esapqa almaymız.

Eger elektrondı mexanikalıq bóleksheler túrinde kóz aldımızǵa elesletetuǵın bolsaq, onda biz mınalardı aytıwımız kerek: v tezligine iye bóleksheler sańlaqtıń baǵıtında ushadı; sańlaqtan ótiw momentinde olardıń OX kósheriniń baǵıtındaǵı elektronnıń ornın anıqlawdaǵı kiriwdiń keńligin Δx arqalı belgilep, mınaǵan iye bolamız:

$$\Delta x = d.$$

Usı momentte difrakciyanıń saldarınan bólekshelerdiń tezliginiń baǵıtı ózgeredi. Tek oraylıq maksimumǵa kelip túsetuǵın elektronlardı esapqa alıp, qozǵalıǵı muǵdarınıń OX kósheriniń baǵıtına túsilgen p_x proekciyası (onıń mánisi sańlaqtan ótpesten burın nolge teń edi)

$$0 \leq p_x \leq p \sin \varphi$$

shekleriniń ishindegi san mánisine iye boladı. Bul teńlikte (1)-teńlik boyınsha $\sin \varphi = \lambda/d$.

Demek, sańlaq arqalı ótetuǵın elektronlar dástesine beriw múmkin bolǵan Δp_x kiriw keńliginiń shaması ushın OX kósheriniń baǵıtındaǵı qozǵalıǵı muǵdarınıń mánisi

$$\Delta p_x \cong p \frac{\lambda}{d}$$

shamasına teń boladı.

Tolqın uzınlıǵı λ niń shaması 362-paragraftaǵı (4)-qatnas boyınsha anıqlanadı:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Bunnan mınaday ańlatpanı alamız:

$$\Delta p_x \cong \frac{h}{d}$$

Biraq, d shaması Δx koordinatasın anıqlawdaǵı shekke teń bolǵanlıqtan, soǵı teńlikten mınanı alamız:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \cong h. \quad (2)$$

(2)-qatnastı barlıq koordinatalar ushın ulıwmalastırıwǵa boladı hám ol mınanı beredi:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \cong h, \quad \Delta y \cdot \Delta p_y \cong h, \quad \Delta z \cdot \Delta p_z \cong h. \quad (2a)$$

(2-a) qatnastı elementar bóleksheler menen ótkerilgen qálegen tájiriýbeni tallawdıń tiykarında hám 363-paragraftaǵı (6)-Shredinger teńlemesinen matematikalıq jollar menen alınadı; olar Geyzenbergtiń "anıqsızlıq qatnaslarınıń" matematikalıq formulirovkası bolıp tabıladı.

Joqarıda ayılǵanlarǵa baylanıslı, (2-a) qatnaslardıń mánisi mınadan ibarat: *eger biz mikrobóleksheni makrobólekshenge tán bolǵan fizikalıq shamalardıń járdeminde táriyipleytuǵın bolsaq, onda onı tek belgili bolǵan juwıqlawda ǵana orınlawǵa boladı.* Bunday jaǵdayda biz bóleksheniń koordinatası x tı qanshama dál anıqlasaq (Δx tıń shaması kishi), onda tájiriýbeniń shártleri boyınsha, biz onıń qozǵalıǵı muǵdarın, soǵan sáykes tezligin kishi dállikte anıqlay alamız. $\Delta p_x = m \cdot \Delta v_x$ teńligi orınlı bolǵanlıqtan, (2)-teńlik boyınsha

$$\Delta v_x = \frac{h}{m \cdot \Delta x} \quad (3)$$

teńligine iye bolamız. Biz I hám II tomlarda ayqın jaǵdaylarda "anıqsızlıq qatnaslarınıń" bizge neni beretuǵınlıǵın kórsetip ótken edik. Bir qatar dara jaǵdaylardı jáne bir ret qaraymız. 10^7 sm/sek tezlik penen qozǵalatuǵın elektronlar dástesin alamız hám, meyli, bul tezliktiń mánisi procenttiń onnan bir shamasındaǵı dállikte anıqlanǵan bolsın. Bunday jaǵdayda

$$\Delta v_x \cong 10^4 \text{ sm/sek}$$

shamasın alamız.

Bunday jaǵdayda tezliktiń baǵıtındaǵı elektronniń ornın qanday dállikte anıqlay alamız degen soraw payda boladı. (3)-qatnas boyınsha mınaǵan iye bolamız:

$$\Delta x = \frac{h}{m \Delta v_x} = \frac{6,6 \cdot 10^{-27}}{9 \cdot 10^{-28} \cdot 10^4} \text{ sm} \cong 6,6 \cdot 10^{-4} \text{ sm}.$$

Bunday jaǵdayda elektronniń ornın millimetrdiń júzden bir bólimine teń, yaǵnıy júdá joqarı dállikte anıqlawǵa boladı.

Basqa misaldı qaraymız. Klassikalıq kóz-qaraslarǵa sáykes, atomniń ishindegi elektron shama menen 10^8 sm/sek shamasına teń tezlikke iye. Elektronniń atomǵa tiyisli ekenligi faktı onıń koordinatasınıń 10^{-8} sm shamasına teń atomniń ólshemlerge teń dállikte anıqlanıwın talap etedi. Demek,

$$\Delta x \cong 10^{-8} \text{ sm}$$

hám (2)-anıqsızlıq qatnası boyınsha tezlikti anıqlawdağı jiberiletuǵın qáteliktiń shaması ushın

$$\Delta v_x = \frac{h}{m \cdot \Delta x} = \frac{6,6 \cdot 10^{-27}}{9 \cdot 10^{-28} \cdot 10^{-8}} \text{ sm} \cong 6,6 \cdot 10^8 \text{ sm}$$

mánisin alamız, yaǵnıy qáteliktiń shaması tezliktiń shamasınıń ózine teń. Demek, bul jaǵdayda belgili tezlik penen júrip ótiletuǵın elektronnıń orbitası haqqındağı kóz-qarastı, yaǵnıy bul jaǵdayda klassikalıq kóz-qarastı paydalanıwǵa bolmaydı.

Solay etip, házirgi fizika elektrondı belgili traektoriya boyınsha qozǵalatuǵın bólekshe kóz-qarasınan bas tartadı. Makroskopiyalıq qubılıslardı baqlawlarda qalıplesken bizlerdiń kóz-qaraslarımızdı atomlardıń ishindegi qubılıslar ushın paydalanıwǵa bolmaydı. Óziniń tábiyatı boyınsha atomnıń ishindegi processler mexanikalıq modellerdiń kórgizbeliligine iye emes. Biraq, usı jaǵdayǵa qaramastan, atomnıń ishindegi elektronlıq orbitalar kóz-qarasın belgili bir dárejede saqlawǵa tuwrı keledi. Sebebi ol kóp jaǵdaylarda juwıq túrdegi durıs nátiyjelerdi beredi hám bul nátiyjelerdi tájiriybelerde alınǵan maǵlıwmatlar menen sáykes keltiriw ushın bazı bir dúzetiwlerdi kirgiziw zárurlıǵı tuwıladı.

Eger biz mikrobóleksheni emes, al kishi bóleksheni alatuǵın bolsaq, onda bul jaǵdayda (3)-qatnas klassikalıq kóz-qaraslardıń paydalanıwǵa bolatuǵınlıǵın kórsetedi. Haqıyqatında da, meyli, misal ushın bóleksheniń massası 10^{-12} g shamasına teń hám onıń ornı mikronnıń júzden birindey úlesi dáliliginde ($\Delta x = 10^{-6} \text{ sm}$) anıqlanatuǵın bolsın. Bunday jaǵdayda (3)-qatnas boyınsha tezlikti ólshewdiń dáliligi ushın minaday shamanı alamız:

$$\Delta v_x \cong \frac{6,6 \cdot 10^{-27}}{10^{-12} \cdot 10^{-6}} \text{ sm} \cong 10^{-8} \text{ sm/sek}$$

shamasına iye bolamız, yaǵnıy is júzinde tezlikti qálegenshe úlken dállikte ólshewge boladı.

Tolıǵıraq qarap shıǵıw anıqsızlıq qatnaslarınń kvantlıq teoriyanıń ulıwmalıq jaǵdaylarınan kelip shıǵatuǵınlıǵın kórsetedi. Biz OX kósheriniń baǵıtında belgili bolǵan v tezligi menen qozǵalatuǵın mikrobólekshelerdiń parallel dástesin qarap atırımız dep boljayıq. Bunday dástege tolqın uzınlıǵınıń $\lambda = h/p$ shamasına teń tolıq anıq mánisi sáykes keledi; demek ol 363-paragraftağı (3)- tegis "monoxromat" tolqın menen táriyiplenedi:

$$\Psi = \psi_0 \cdot e^{-\frac{i}{\hbar}(Wt - \mathbf{r} \cdot \mathbf{p})}.$$

Biz qarap atırǵan jaǵdayda $\mathbf{r} \cdot \mathbf{p} = xmv$ hám tolqınnıń teńlemesi minaday boladı:

$$\Psi = \psi_0 \cdot e^{-\frac{i}{\hbar}(Wt - xmv)}.$$

Bunday dástedegi bólekshelerdiń koordinataları haqqında neni aytıwǵa boladı? Bul sorawǵa juwap beriw ushın OX kósherindegi dx intervalında mikrobóleksheni tabıwdıń itimallıǵınıń

$$\Psi \cdot \Psi^* dx = \psi_0^2 dx \quad (4)$$

shamasına teń ekenliginen paydalanamız. Bul ańlatpada uzınlıq elementi bolǵan dx shaması 363-paragraftağı itimallıq ushın jazılǵan ańlatpadağı kólemniń elementin alıstıradı. ψ_0 diń shaması x tan ǵárezsiz bolǵanlıqtan bóleksheni dx intervalında tabıwdıń itimallıǵı turaqlı hám onıń mánisi intervaldıń OX kósherindegi qaysı orında alınǵanlıǵınan ǵárezsiz. Demek, OX kósheriniń boyında jatqan qálegen noqatta bóleksheni tabıwdıń itimallıǵı birdey boladı. Solay etip, eger bólekshe belgili tezlikke iye bolatuǵın bolsa, onda ol belgili koordinataǵa iye bolmaydı eken. Bul "anıqsızlıq qatnaslarına" sáykes keledi. Bul qatnaslarǵa sáykes mikrobóleksheniń tezligin dál beriw usı bóleksheniń koordinatasındağı tolıq anıqsızlıqtı payda etedi.

Biraq kvantlıq-mexanikalıq teoriyada keńisliktiń kishi bóliminde lokalizaciyalanǵan mikrobóleksheni táriyiplewge boladı. Onıń ushın usı kishi oblastta nolge teń bolmaǵan, al keńisliktiń basqa bólimlerinde nolge teń ψ funkciyası menen táriyiplenetuǵın tolqınlıq processti ("tolqın frontın") qaraw kerek. Bunday jaǵdayda $\psi\psi^* dv$ shaması bóleksheni dv kóleminde anıqlawdıń itimallıǵın anıqlaydı. Bóleksheniń tabıwdıń itimallıǵı tek usı kishi oblastta nolden ózgeshe, yaǵnıy bólekshe keńisliktiń kishi bóliminde "lokalizaciyalanǵan". Bunday "tolqın paketin" hár qıylı tolqın uzınlıqları λ lerge iye tolqınlardı qosıw jolı menen anıqlanadı. Biraq hár bir λ tolqın uzınlıǵına bóleksheniń óziniń tezligi sáykes keledi hám sonlıqtan

anıqsızlıq qatnasları boyınsha endi bóleksheleđin tezlikleri dál anıqlanbağan bolıwı kerek. Sáykes matematikalıq esaplaw (2-a) qatnaslarǵa dál alıp keledi.

§ 365. Potencial qutıdaǵı bólekshe. Potencial barer arqalı ótiw. Energiyanıń kvantlanıwına mısál sıpatında mikrobólekshe potencial qutınıń ishinde jaylasatuǵın jaǵdaydı qaraymız. Ápiwayılıq ushın qutını sheksiz biyik hám tik potencial barerler menen sheklengen hám onıń ishinde bólekshe tek OX kósheriniń baǵıtında qozǵala aladı dep esaplaymız. Meyli, shuqırdıń keńligi a shamasına teń bolsın. Bunday jaǵdayda koordinata x tıń

$$0 < x < a$$

bolǵan mánislerinde bólekshe erkin hám onıń potenciallıq energiyası nolge teń. Bunday jaǵdayda koordinatalardıń $0 > x$ hám $x > a$ teńsizliklerin qanaatlandıratuǵın mánisleriniń oblastınıń sırtında potenciallıq energiyanıń shaması sheksiz úlken (382-súwret). Usınday potenciallıq shuqırdı "potencial shuqır" dep ataymız. Bóleksheńiń tolıq energiyasın W arqalı belgilep, onıń ushın Shredinger teńlemesin jazamız:

$$\Delta\psi + \frac{2m}{\hbar^2} W\psi = 0.$$

Másele bir ólshemli bolǵanlıqtan, Laplas operatorı ψ den koordinata x boyınsha alınǵan ekinshi tártipli tuwındıǵa alıp kelinedi hám Shredinger teńlemesi mınaday túrge iye boladı:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} W\psi = 0.$$

Ornına qoyıw jolı menen bunday teńlemenıń sheshiminiń mınaday funkciya bolıp tabılatuǵınlıǵın ańsat tekserip kóriwge boladı:

$$\psi = Ae^{ikx} + Be^{-ikx}. \quad (1)$$

Bul ańlatpada

$$k = \sqrt{\frac{2mW}{\hbar^2}} \quad (2)$$

hám A menen B - iqtıyarlı turaqlılar.

Kórsetkishli funkciyalardı trigonometriyalıq funkciyalar menen almastırıp, (1)-funkciyası mınaday túrde jaza alamız:

$$\psi = (A + B) \cos kx + i(A - B) \sin kx. \quad (1a)$$

Qutınıń shegaralarında potenciallıq energiyanıń shaması sheksiz úlken bolǵanlıqtan, bóleksheńiń qutınıń diywalları arqalı ótiwiniń itimallıǵın nolge teń; bunnan, $\psi\psi^*$ shamasınıń diywallardıń sheklerin tısta da, diywaldıń ózinde de nolge teń bolatuǵınlıǵın kelip shıǵadı. Bul jaǵday $x < a$ hám $x > a$ teńsizligi orınlanganda ψ funkciyasınıń óziniń nolge teń bolatuǵınlıǵın ańǵartadı. $x = a$ noqatında $\psi(x)$ funkciyasınıń nolge teń bolıwı ushın (1-a) teńliktegi kosinusı bar aǵzanıń joq bolıwı kerek. Sonlıqtan A hám B turaqlılarınıń

$$A + B = 0$$

shártin qanaatlandırwı kerek. Bunnan $A = -B$ teńligi kelip shıǵadı hám nátiyjede (1-a) ańlatpası mınaday túrge enedi:

$$\psi(x) = i2A \sin kx.$$

$x = a$ noqatında $\psi(x)$ funkciyasınıń nolge teń bolıwı talabı k nıń san mánisi ushın shárt qoyadı, atap aytqanda k nıń mánisi

$$ka = n\pi \quad (3)$$

shártin qanaatlandırwı kerek. Bul teńlikte n qálegen pútin san; eń aqır-ayaǵında $\psi(x)$ funkciyası ushın mınaday ańlatpaǵa iye bolamız:

$$\psi(x) = i2A \sin \frac{n\pi}{a} x.$$

k shaması energiyanıń W mánisi menen baylanıslı bolǵanlıqtan, (3)-shárt energiyanıń kvantlanıwın beredi. (2) boyınsha k nıń mánisin paydalanıp

$$W = \frac{\hbar^2}{2m} k^2$$

añlatpasın alamız hám bul ańlatpaǵa (3)-teńlik boyınsha onıń mánisin qoyıp,

$$W = n^2 \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ma^2} \quad (4)$$

formulasına iye bolamız. Solay etip, $\psi(x)$ funkciyasına qoyılatuǵın shegaralıq shártler tolıq energiya W niń qálegen mánislerinde emes, al (4)-qatnastı qanaatlandıratuǵın mánislerinde ǵana qanaatlandırıladı eken. Biz qutıdaǵı bóleksheniń energiyasınıń kvantlangan ekenligin kóremiz. Eger (4)-formulaǵa $n = 1, 2, 3, \dots$ mánislerin qoyatuǵın bolsaq, onda energiyanıń qáddilerin alamız. Qońsılas qáddilerdiń arasındaǵı qashıqlıq mınaǵan teń:

$$\Delta W = (n+1)^2 \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ma^2} - n^2 \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ma^2} = (2n+1) \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ma^2}.$$

Kórinip turǵanıday, qáddilerdiń arasındaǵı ayırma n niń ósiwi menen ósedı eken (383-súwret) hám bóleksheniń massası m nen hám qutınıń keńligi a dan ǵárezli. Bul shamalardıń mánislerine ǵárezli kvantlanıwdıń tutqan ornınıń hár qıylı bolıwı múmkin. Mısalı, atomnıń ólshemlerindey bolǵan qutıdaǵı potencial qutıdaǵı elektrondı alamız. Bunday jaǵdayda:

$$m = 9,1 \cdot 10^{-28} \text{ g}, \quad a = 10^{-8} \text{ sm}.$$

Bunday sharayatlardaǵı energiya qáddileriniń shaması mınaǵan teń boladı:

$$W = n^2 \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ma^2} = n^2 \frac{(6,6 \cdot 10^{-27})^2}{8 \cdot 9 \cdot 10^{-28} \cdot 10^{-16}} \cong n^2 \cdot 6 \cdot 10^{-11} \text{ erg}.$$

Bul mánisti $n = 1$ bolǵan jaǵday ushın ádettegi temperaturalardaǵı ($T = 300 \text{ K}$) klassikalıq elektronlıq teoriya boyınsha esaplangan ortasha kinetikalıq energiya menen salıstıramız:

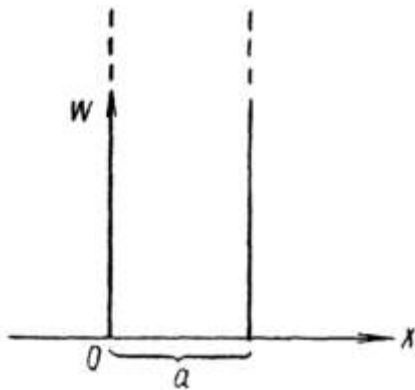
$$W_k = \frac{3}{2} kT = \frac{3}{2} \cdot 1,37 \cdot 10^{-16} \cdot 300 \cong 7 \cdot 10^{-14} \text{ erg}.$$

Bul mánislerdi salıstırıp, biz qáddilerdiń keskin túrde kórinetuǵınlıǵın hám olardıń arasındaǵı qashıqlıqtıń ádettegi temperaturalardaǵı elektronlardıń kinetikalıq energiyasınıń shamasınan úlken ekenligin kóremiz.

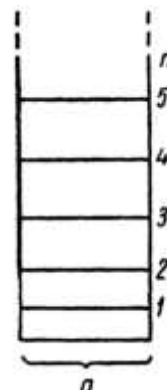
Eger uzınlıǵı 1 sm bolǵan qutınıń ishindegi elektrondı alatuǵın bolsaq, onda energiya qáddileriniń arasındaǵı qashıqlıq ushın mınaday sanlı mánislerdi alamız:

$$W = n^2 \frac{(6,6 \cdot 10^{-27})^2}{8 \cdot 9 \cdot 10^{-28} \cdot 1} \cong n^2 \cdot 6 \cdot 10^{-27} \text{ erg}.$$

Bunday jaǵdayda energiya qáddileri bir biri menen sonshama jaqın turadı, sonlıqtan energiyanı úzliksiz ózgeredi dep esaplawǵa boladı. Biz úlken uchastkada elektronnıń erkin qozǵalatuǵınlıǵın, onıń energiyalarınıń qáddileriniń arasındaǵı qashıqlıq qanshama kishi bolsa, energiyanıń kvantlanıwınıń sonshama kem bilinetuǵınlıǵın kóremiz. a shamasınıń sanlı ózgerisi bir birinen sapalıq jaqtan ayrılatuǵın sheshimlerdi beredi.



382-súwret. Keńligi a bolǵan sheksiz biyik diywallarǵa iye potencial qutı.



383-súwret. Potencial qutınıń ishindegi energiyanıń qáddileri.

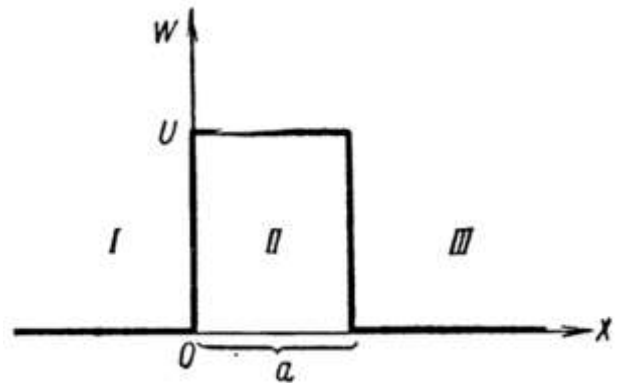
Biz joqarida qarağan máselede energiyanıń kvantlanıwı tolqın funkciyasına qoyılatuǵın shegaralıq shártlerdi esapqa alǵan jaǵdaydaǵı Shredinger teńlemesiniń sheshiminiń nátiyjesi sıpatında alındı.

Makroskopiyalıq hám mikroskopiyalıq bólekshelerdiń qásiyetleriniń sapalıq jaqtan ayırması olardıń potencial barer menen ushırıawında keskin túrde kórinedi. Bul jaǵdaydı tómendegi mısalda túsindiremiz. Mexanikalıq bólekshe OX kósheriniń boyında potencial barer menen bólingen kúsh maydanında qozǵaladı dep boljayıq. 384-súwrette kórsetilgen jaǵdayda bul potencial barer mınaday jaǵdayda payda bolǵan: $x < 0$ hám $x > a$ teńsizlikleri orınlanatuǵın barlıq jaǵdaylarda potenciallıq energiya nolge teń hám x tıń

$$0 \leq x \leq a$$

mánislerinde U shamasına teń.

384-súwret.
Potencial barer.



Eger bóleksheniń tolıq energiyası $W < U$ teńsizligin qanaatlandıratuǵın bolsa, onda klassikalıq kóz-qarastan bólekshe $x < a$ bolǵan I oblastta yamasa $x > a$ bolǵan III oblastta qozǵala aladı. Barer oblastı bolǵan II oblastqa bólekshe óte almaydı, sebebi bul oblastta onıń kinetikalıq energiyası bolǵan $W_{kin} = W - U$ shamasınıń teris bolıwı kerek bolıp shıǵadı. Al, bunday jaǵdaydıń orın alıwı múmkin emes. Tolıq energiyası W potencial barerdiń "biyikligi" U dan kishi bolǵan bólekshe klassikalıq kóz-qarastan I oblasttan barer arqalı III oblastqa óte almaydı. Al qozǵalıw halı Shredinger teńlemesiniń járdeminde ańlatılatuǵın bólekshede awhal pútkilley basqasha boladı. Bul jaǵdayda ψ tolqın funkciyasınıń mánisi II oblastta da nolge teń emes, usınıń saldarınan bóleksheniń barerdiń ishi arqalı ótiwiniń itimallıǵı nolge teń bolmaydı. Demek, energiyası barerdiń biyikliginen kishi bolǵan mikrobóleksheniń barer arqalı sıǵırıp ótiwge qábiletli. Bul qubılıstıń mısalı sıpatında radioaktiv atomnıń yadrosınan α -bóleksheleriniń ushıp shıǵıwın kórsetiwge boladı (372-paragraf). Kvantlıq-mexanikalıq esaplaw bólekshelerdiń barer arqalı ótiwiniń itimallıǵınıń sanlı mánisin tabıwǵa múmkinshilik beredi.

Bóleksheniń I oblasttan II oblastqa kiriwiniń itimallıǵı barerdiń keńligi a nıń úlkeyiwi menen eksponenciallıq nızam boyınsha kemeyetuǵınlıǵın kórsetedi. Usınıń menen birge bul itimallıqtıń shaması energiyalardıń ayırması $U - W$ dan kúshli ǵárezli. $U - W$ ayırmasınıń shaması qansha kishi bolsa, yaǵnıy W energiya qáddiniń biyikligi menen potenciallıq barerdiń biyikligi U dıń arasındaqı ayırma qansha kishi bolsa, barer arqalı ótiwdiń de itimallıǵı sonshama úlken boladı. Mısalı, eger energiyalardıń ayırması $U - W$ shamasınıń mánisi bir neshe elektronvoltlerge teń, al barerdiń keńligi atomlardıń ólshemleri menen barabar bolsa ($a \cong 10^{-8} \text{ sm}$), onda barer arqalı ótiwdiń itimallıǵı ádewir úlken boladı.

Mikrobólekshelerdiń potenciallıq barer arqalı "síńip ótiwi" faktı kóp sanlı tájiriybelerde tastıyıqlanadı. Solay etip, kvantlıq mexanika klassikalıq kóz-qarastan túsiniksiz bolǵan jáne bir qubılıstı túsindire aladı.

Mikrobólekshelerdiń potentsiallıq barer arqalı "sińip ótiwi" olardıń tolqınlıq qásiyetleri menen tıgız baylanısqa. Bul qubilis tolqınlardıń optikalıq jaqtan tıgızraq bolǵan ortalıqlardı bólip turǵan juqa qatlam arqalı ótiwine usaydı. Bunday jaǵdayda nurlıq optikanıń kóz-qarasları boyınsha tolıq ishki shaǵılısıw qubılısınıń orın alıwı kerek (252-paragraf).

Keń barerler hám energiyalardıń úlken ayırmaları ushın barer arqalı ótiwdiń itimallıǵı nolge teń. Bunday jaǵdayda kvantlıq-mexanikalıq teoriyanıń nátiyjeleri klassikalıq mexanikanıń nátiyjelerine sáykes keledi.

§ 366. Kvantlıq mexanikanıń kóz-qarasları boyınsha vodorod atomı. Bor teoriyası boyınsha vodorod atomınıń hám oǵan uqsas bolǵan ionlardıń energiya qáddilerin elektronnıń koordinataları hám impulsleri baǵınatuǵın kvantlanıw qaǵıydalarınan tiykarında tabılatuǵınlıǵın kórdik. Bul kvantlıq shártlerdiń energiyanıń múmkin bolǵan mánisleri ushın

$$W = -\frac{RhcZ^2}{n^2} \quad (1)$$

añlatpasınıń alınıwına alıp keldi. Bul añlatpada R - Ridberg turaqlısı hám n - pútin san (bas kvant sanı). Kvantlıq mexanikanıń kóz-qarasları boyınsha mäseleni basqasha qoyıw kerek. Energiyanıń (1)-mánisleri Shredinger teńlemesin qarawdan alınadı. Yadronıń massasın elektronnıń massasınan júdá úlken dep esaplap, atomnıń salmaq orayı yadronıń ornına sáykes keledi dep esaplaymız. Elektronnıń yadronıń maydanındaǵı potentsiallıq energiyası

$$U = -\frac{e^2Z}{r}$$

túrinde jazıladı hám Shredinger teńlemesi mınaday túrge iye boladı:

$$\Delta\psi + \frac{2m}{\hbar^2} \left(W + \frac{e^2Z}{r} \right) \psi = 0. \quad (2)$$

(2)-teńlemenı sferalıq r, ϑ, φ koordinatalarında sheshiw hám tolqın funkciyasın usı koordinatalardıń funkciyası $\psi = \psi(r, \vartheta, \varphi)$ túrinde izlew kerek. x, y, z koordinataları r, ϑ, φ koordinataları menen bılaysınsha baylanısqa:

$$x = r \sin \vartheta \cdot \cos \varphi, \quad y = r \sin \vartheta \cdot \sin \varphi, \quad z = r \cos \vartheta.$$

Sferalıq koordinatalarda (2)-teńleme mınaday túrge iye boladı:

$$\begin{aligned} \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \vartheta} \frac{\partial}{\partial \vartheta} \left(\sin \vartheta \frac{\partial \psi}{\partial \vartheta} \right) + \\ + \frac{1}{r^2 \sin^2 \vartheta} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \varphi^2} + \frac{2m}{\hbar^2} \left(W + \frac{e^2Z}{r} \right) \psi = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

(3)-teńleme ózgeriwshilerdi ayırıw jolı menen sheshiledi. $\psi(r, \vartheta, \varphi)$ funkciyasın radius-vektor r diń funkciyası menen ϑ, φ múyeshleriniń funkciyasınıń kóbeymesinen ibarat dep boljaymız:

$$\psi(r, \vartheta, \varphi) = R(r) \cdot Y(\vartheta, \varphi).$$

ψ diń bul mánisin (3)-teńlemege qoyıp, bunnan keyin alınǵan nátiyjeni $R(r) \cdot Y(\vartheta, \varphi)$ kóbeymesine bólip hám r^2 shamasına kóbeytip, mınaday teńlemenı tabamız:

$$\begin{aligned} \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial R}{\partial r} \right) + \frac{1}{Y \sin \vartheta} \frac{\partial}{\partial \vartheta} \left(\sin \vartheta \frac{\partial Y}{\partial \vartheta} \right) + \\ + \frac{1}{Y \sin^2 \vartheta} \frac{\partial^2 Y}{\partial \varphi^2} + \frac{2mr^2}{\hbar^2} \left(W + \frac{e^2Z}{r} \right) = 0. \end{aligned}$$

Bul teńlemenıń bir bólimi tek r den, al ekinshi bólimi tek ϑ menen φ den ǵárezli. Eger teńlemenıń eki bólimi qarama-qarsı belgide alınǵan turaqlı shamaǵa iye bolǵan jaǵdayda ǵana olardıń qosındısı nolge teń boladı. Solay etip, mınaday teńlemenıń orınlanıwı kerek:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial R}{\partial r} \right) + \frac{2mr^2}{\hbar^2} \left(W + \frac{e^2Z}{r} \right) = \lambda, \quad (4)$$

$$\frac{1}{Y \sin \vartheta} \frac{\partial}{\partial \vartheta} \left(\sin \vartheta \frac{\partial Y}{\partial \vartheta} \right) + \frac{1}{Y \sin^2 \vartheta} \frac{\partial^2 Y}{\partial \varphi^2} = -\lambda. \quad (5)$$

Bul teńlikte λ - turaqlı shama. Differentsiallıq teńlemeler teoriyasında bul teńlemelerdiń ekewiniń de olarǵa kiretuǵın W hám λ shamalarınan belgili bir mánislerinde bir mánisli, shekli hám úziksiz sheshimlerge iye bolatuǵınlıǵı kórsetiledi.

(5)-teńleme

$$\lambda = l(l+1), \quad l = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

shárti orınlanatuǵın jaǵdaydaǵı l -tártpılı shar funkciyaları bolǵan $Y_{lm}(\vartheta, \varphi)$ funkciyasınıń járdeminde sheshiledi.

Bir birinen sıızılıǵı gárezsiz bolǵan $2l+1$ dana Z -tártpılı hár qıylı shar funkciyaları bar boladı. Sonlıqtan $Y_{lm}(\vartheta, \varphi)$ ańlatpasındaǵı m indeksi tómendegidey $2l+1$ dana mániske iye boladı:

$$m = l, l-1, \dots, 0, \dots, -l. \quad (7)$$

$\lambda = l(l+1)$ teńligi orınlanǵan jaǵdayda (4)-teńleme mınaday túrge iye boladı:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial R}{\partial r} \right) + \frac{2mr^2}{\hbar^2} \left(W + \frac{e^2 Z}{r} - \frac{l(l+1)\hbar^2}{2mr^2} \right) R = 0. \quad (4a)$$

$W < 0$ bolǵan jaǵdayda $r \rightarrow \infty$ sheginde

$$W = -\frac{me^4 Z^2}{2\hbar^2(n'+l+1)^2} \quad (8)$$

teńligi orınlanǵanda ǵana bul teńleme shekimlerge iye boladı. Bul formulada n' - pútin san. Bunnan $n' + l + 1$ shamasınıń de pútin n shamasına teń bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı. $\frac{me^4}{2\hbar^2} = R_{\text{hc}}$ ekenligin inabatqa alıp (R arqalı Ridberg turaqlısı belgilengen), mınaday ańlatpanı alamız:

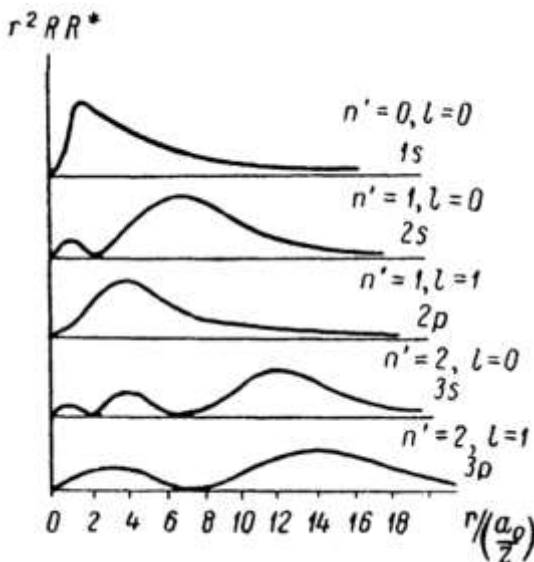
$$W = -\frac{R_{\text{hc}} Z^2}{n^2}.$$

Bul ańlatpa (1)-ańlatpaǵa sáykes keledi.

Solay etip, qanday da bir qosımsha talaplardı qoymay-aq Shredinger teńlemesinen vodorod atomınıń hám oǵan uqsas bolǵan ionlardıń energiyasınıń mánisi (1)-ańlatpanıń járdeminde ańqlanatuǵın bir qatar energiyalıq hallarda tura alatuǵınlıǵı kelip shıǵadı.

Hár bir stacionar hal úsh n' , l hám m pútin kvant sanlarınıń járdeminde táriyiplenedi. Al energiyanıń mánisi tek $n' + l$ summasınan ǵana gárezli hám m sanınan gárezli emes. $n' \geq 1$ teńsizligi orınlı bolǵanlıqtan $n \geq l + 1$ hám usıǵan sáykes berilgen n kvant sanında l kvant sanı $l = 0, 1, 2, \dots, n-1$ shamalarına teń boladı.

Energiyanıń $W > 0$ bolǵan mánislerinde W niń múmkin bolǵan mánisleriniń oblastı úziksiz oblast bolıp tabıladı. Bul jaǵday ionizaciya potencialınıń sheklerin tısta jaylasatuǵın oblastlar ushın baqlanadı.



385-súwret.

$r^2 R R^*$ funkciyasınıń r den gárezligi.

Kólem elementi dv nıń ishinde elektrondı tabıwdıń itimallıǵı $\psi\psi^* dv$ ǵa teń. dv nı sferalıq koordinatalarda $dv = r^2 \sin^2 \vartheta \, dr \, d\vartheta \, d\varphi$ túrinde jazadı. Bunnan keyin ψ di $R(r) \cdot Y(\vartheta, \varphi)$ túrinde jazıp, elektrondı tabıwdıń itimallıǵı ushın mınaday ańlatpanı jazamız:

$$\psi\psi^* dv = R R^* r^2 \cdot Y \cdot Y^* \sin^2 \vartheta \cdot dr \, d\vartheta \, d\varphi. \quad (9)$$

385-súwrette $r^2 R R^*$ shamalarınń grafıǵı kórsetilgen. Bul shamalardı (9)-ańlatpadaǵı tek radius-vektor $\mathbf{r}$ diń san mánisinen gárezli bolǵan kóbeytiwshi beredi. Abscissa kósherine $r/\left(\frac{a_0}{Z}\right)$ shaması

qoyılğan, bul ańlatpada $a_0 = \hbar^2/me^2$ shaması Bor teoriiyası boyınsha vodorod atomındaǵı birinshi dóńgelek orbitanıń radiusına sáykes keledi (343-paragraf). $\psi\psi^*dv$ itimallıǵınıń keńisliktegi tarqalıwın anıqlaw ushın $Y \cdot Y^*$ kóbeymesin de esapqa alıw kerek. SHar funkciyasınıń ańlatpasına φ múyeshinen ǵárezlik tek $e^{im\varphi}$ kóbeytiwshisi menen beriledi. Bunnan $Y \cdot Y^*$ shamasınıń φ den ǵárezsiz ekenligi kelip shıǵadı, sebebi $e^{im\varphi}e^{-im\varphi} = 1$. Solay etip, $Y \cdot Y^*$ shaması tek ϑ múyeshiniń funkciyası bolıp tabıladı. Hár qıylı l menen m ler ushın $Y \cdot Y^*$ funkciyasınıń túri 386-súwrette polyar diagrammalar túrinde kórsetilgen. $Y \cdot Y^*$ shamasınıń keńisliktegi tarqalıwı 386-súwrettegi iymekliklerdi OZ kósheriniń dógereginde aylandırǵanda alınatuǵın aylanıw figuralarınıń túrine iye boladı. $Z = 0$ ushın $Y \cdot Y^*$ funkciyası sharlıq simmetriyaǵa iye boladı.

$\psi\psi^*dv$ itimallıǵınıń tarqalıwın Bordıń atomdaǵı orbitalar haqqındaǵı modellik kóz-qaras penen salıstırıwǵa boladı. 385-súwretten n kvant sanı qanshama úlken bolǵanda elektrondı tabıwdıń itimallıǵınıń yadrodan úlken qashıqlıqlarda sezilerliktey mánislerdi saqlaytuǵınlıǵı kórinip tur. Bul Bor teoriiyasınıń úlken n kvant sanlarına iye orbitalardıń úlken ólshemlerge iye bolatuǵınlıǵı jónindegi juwmaǵına sáykes keledi. $n = 1, l = 0$ halı ushın itimallıqtıń maksimumı Bordıń birinshi dóńgelek orbitası ótetuǵın $r = a_0/Z$ shamasına sáykes keledi.

Kvantlıq mexanika tek atomlıq sistemanıń múmkin bolǵan energiyaları bolǵan W lerdi ǵana emes, al qozǵalıw muǵdarınıń momenti $\mathbf{p}$ nıń hám onıń sırttan túsirilgen baǵıtqa túsirilgen proekciyaları p_z tiń mánislerin de tabıwǵa múmkinshilik beredi. Bul nátiyjelerdiń qalayınsha alınatuǵınlıǵına toqtamay, tek nátiyjelerdi keltiremiz. Teoriya n', j, m kvant sanları menen táriyiplenetuǵın halda turǵan atom ushın qozǵalıw muǵdarınıń momentiniń

$$p_z = m\hbar$$

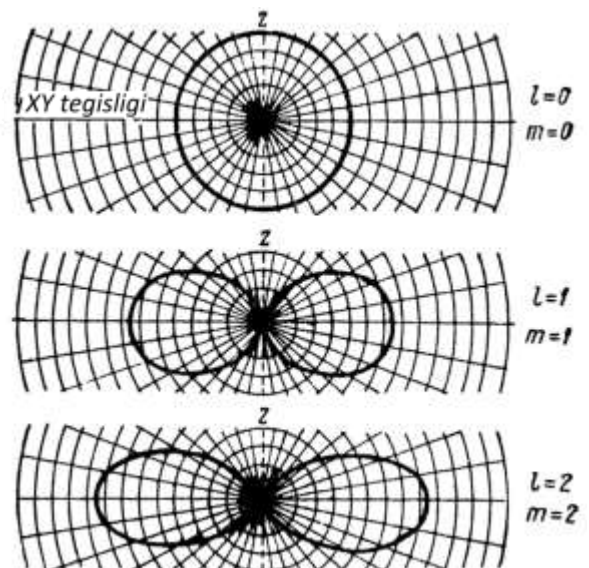
mánislerin qabıl etetuǵınlıǵın kórsetedi. Solay etip, m pútin sanı óziniń mánisi boyınsha Bor teoriiyasındaǵı atomnıń momenti $\mathbf{p}$ nıń keńisliktegi orientaciyasın anıqlaytuǵın "magnit" kvant sanına sáykes keledi eken.

$\mathbf{p}$ momentiniń múmkin bolǵan absolyut mánisi

$$p = \hbar\sqrt{l(l+1)}$$

shamasına teń boladı. Bul jaǵday dubletlik spektrdiń strukturasınıń túsindiretuǵın vektorlıq modelde qabıl etilgen qozǵalıw muǵdarınıń momenti $\mathbf{p}$ nıń mánisleri tastıyqlanadı (349-paragraf). Bordıń eń dáslepki teoriiyasınıń $\mathbf{p}$ ushın $p = n_\varphi\hbar$ mánisin bergenligin eske salamız. Bul jaǵdayda n_φ shaması l den bir shamasına ayırmaǵa iye edi ($n_\varphi = l + 1$).

386-súwret.
 $Y Y^*$ funkciyaları ushın polyar
diagrammalar.



§ 367. Klassikalıq hám kvantlıq statistikalar. I tomda kórsetilip ótilgenindey, kóp sanlı bóleksheler menen baylanıslı bolǵan máselelerde esaplawdıń statistikalıq usılları paydalanıladı. Misalı, usınday esaplawlardıń nátiyjesinde bólekshelerdiń energiyalar boyınsha tarqalıw nızamı

(Bolcman nızamı) yamasa bólekshelerdiń tezlikler boyınsha tarqalıwı nızamı (Maksvell nızamı) tabıldı.

Kvantlıq statistikalıq fizikaǵa shekemgi statistikalıq fizikanıń úlken jetiskenliklerine qaramastan, bir qatar máselelerdi sheshkende klassikalıq statistikanıń nátiyjeleri tájiriybelerde alınǵan nátiyjeler menen sáykes kelmey qaldı. Tájiriybe menen esaplawdıń bir birine keskin túrde sáykes kelmewlerdiń biri jıllılıq sıyımlıǵınıń teoriyasına tiyisli. Bul teoriyadaǵı qattı denelerdiń jıllılıq sıyımlıǵınıń temperaturadan ǵárezli ekenligi túsindirilmey qaldı (I tom, 93-paragraf). Statistikalıq teoriyadaǵı ekinshi sátsizlik metallardıń elektr ótkizgishligine tiyisli. Klassikalıq statistikanıń kóz-qarasları boyınsha (II tom, 163-paragraf) metallardıń elektr ótkizgishligin júzege keltiretuǵın erkin elektronlar jıllılıq sıyımlıǵınıń shamasın toqtı ótkizbeytuǵın denelerdiń jıllılıq sıyımlıǵınan úlken etiwi kerek. Al bul jaǵday tájiriybede tastıyqlanbaydı. Bul sátsizliklerdiń jıyñaǵı statistikalıq esaplawlardı kvantlıq kóz-qaraslardıń tiykarında qaytadan kórip shıǵıwdı talap etti. Bunday qayta qarap shıǵıw kvantlar teoriyası menen tolıq sáykes keletuǵın *kvantlıq statistika* dep atalatuǵın statistikanıń dóretiliwine alıp keldi. Bul statistikada klassikalıq statistikanıń jetiskenlikleri saqlandı hám ol joqarıda keltirilgen qarama-qarsılıqlarǵa iye bolmadı.

Klassikalıq hám kvantlıq statistikalardıń arasındaǵı ayırmanı túsiniw ushın fizikadaǵı statistikalıq usıllardıń tiykarǵı jaǵdayların tallaymız. Dáslep Bolcman statistikasına itibar beremiz. Onıń tarqalıw nızamın biz bir neshe ret paydalandıq. Biz V kóleminde jaylasqan N bóleksheden turatuǵın sistemanı kóz aldımızǵa elesleteyik. Bólekshelerdiń mexanikalıq halı olardıń koordinataları menen tezliklerin beriw menen anıqlanadı. Eger N bóleksheniń har birine belgili koordinatalar menen tezlikler beriletuǵın bolsa, onda sistemanıń halı berilgen bolıp esaplanadı. *Statistikalıq qarawda bolsa, bólekshelerdiń sanınıń júdá kóp bolıwına baylanıslı biz sistemanıń halın anıqlaw ushın basqa usıldı paydalanamız: hár bir bóleksheniń koordinataları menen tezlikleri bazı bir sheklerde anıqlanadı.* Mısalı, biz bóleksheniń halın bergende onıń koordinatalarınıń x hám $x + \Delta x$, y hám $y + \Delta y$, z hám $z + \Delta z$ shamalarına teń intervallarda, al tezlikleriniń v_x hám $v_x + \Delta v_x$, v_y hám $v_y + \Delta v_y$, v_z hám $v_z + \Delta v_z$ shamalarına teń intervallarda jatatuǵınlıǵın kórsetemiz.

Bólekshelerdiń halların esaplawdı geometriyalıq kóz-qaraslardıń járdeminde illyustraciyalawǵa boladı. x, y, z koordinataların hám tezliktiń v_x, v_y hám v_z proekciyaların altı ólshemli "keńisliktegi" ulıwmalastırılǵan dekart koordinataları sıpatında qaraymız. *Bul "keńislik" koordinatalar menen tezliklerdiń fazalıq keńisligi dep ataladı.* Bunday oyımızdaǵı keńisliktegi noqat koordinatalar menen tezliktiń proekciyalarınıń belgili mánisleri menen táriyiplenedi. Solay etip, dál anıqlanǵan mexanikalıq haldaǵı qálegen bólekshe biziń keńisligimizde noqattı anıqlaydı. Onıń ulıwmalastırılǵan koordinataları biz alǵan bóleksheniń x, y, z koordinatalarına hám tezliktiń v_x, v_y hám v_z proekciyalarına teń. Bóleksheniń *halın statistikalıq táriyiplegende usı haldı súwretleytuǵın noqattıń fazalıq keńisliktiń shegaraları x hám $x + \Delta x$, v_x hám $v_x + \Delta v_x$ h.t.b. shamalar menen sheklengen $\Delta\tau$ kóleminiń ishinde jaylasqanlıǵın ǵana kórsetiwge boladı.* Bul elementar kólemniń shaması mınaǵan teń:

$$\Delta\tau = \Delta x \Delta y \Delta z \Delta v_x \Delta v_y \Delta v_z.$$

Bólekshelerdiń múmkin bolǵan barlıq hallarına sáykes keletuǵın barlıq fazalıq keńislikti $\Delta\tau_i$ elementar kólemlerge (qutılarǵa) bólemiz. Usınday barlıq elementar qutılardıń kólemleriniń qosındısı bolǵan $\sum_i \Delta\tau_i$ shaması fazalıq keńisliktiń barlıq kólemine teń.

Barlıq sistemanıń halların statistikalıq táriyiplew fazalıq keńisliktiń hár bir $\Delta\tau_i$ qutısınıń ishindegi noqatlar sáykes keletuǵın bólekshelerdiń sanın kórsetiwge alıp klinedi.

Eger elementar qutınıń ólshemleri kishi bolsa, onda hár bir qutını usı qutınıń ishindegi koordinataları menen tezlikleriniń proekciyaları usı qutınıń ishindegi bóleksheniń ortasha energiyası menen táriyiplewge boladı. Qutılardıń energiyaların $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \dots$ arqalı, al sáykes

qutılardağı bólekshelerdiń sanın $N_1, N_2, N_3, \dots$ arqalı belgileyik. Bunday jaǵdayda $N_1, N_2, N_3, \dots$ sanların beriw bólekshelerdiń energiyalar boyınsha tarqalıwın beredi.

$N_1, N_2, N_3, \dots$ sanlarınıń hár qıylı mánisleri menen anıqlanatuǵın sistemanıń hár qıylı halları úlken yamasa kishi bolǵan itimallıq penen júzege keliwi múmkin. *Eń úlken itimallıq penen táriyiplenetuǵın haldıń jıyǵı júzege keldi dep esaplaw tábiyiy.* Solay etip, másele eń úlken itimallıq sáykes keletuǵın bólekshelerdiń energiyalar boyınsha taraqlıwın tabıwǵa alıp klinedi. Sáykes esaplawlar Bolcman formulasına alıp keledi. Bul tarqalıw boyınsha energiyası berilgen $\varepsilon, \varepsilon + d\varepsilon$ intervalında jatqan bólekshelerdiń sanı dN_ε mınaǵan teń:

$$dN_\varepsilon = N_0 \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{1}{(kT)^{3/2}} \cdot e^{-\frac{\varepsilon}{kT}} \cdot \sqrt{\varepsilon} d\varepsilon. \quad (1)$$

Bul teńlikte N_0 - bólekshelerdiń tolıq sanı.

Bul klassikalıq teoriyada elementar qutıda bólekshelerdiń jetkilikli dárejedegi kóp sanınıń bolıwı kerek degen talaptan basqa onıń ólshemleri hesh nárese menen sheklenbegen. Bunday jaǵdayda qutılardıń ólshemleri qanshama kishi bolsa, sistemanıń halı sonshama tolıǵıraq táriyiplenedi. Dáslepki qoyılǵan shekler boyınsha qutıdağı bólekshelerdiń sanı hesh nárese menen sheklenbegen hám itimallıq teoriyasınıń nızamları boyınsha statistikalıq túrde anıqlanadı.

Kvantlıq statistikadaǵı jaǵday bunday emes. Bul jaǵdayda elementar qutınıń kólemi iqtıyarlı túrde kishi etip ala almaymız. "Anıqsızlıq qatnasları" boyınsha (364-paragraf) $\Delta x, \Delta v_x$ "shekleriniń" arasında belgili qatnas bar, atap aytqanda $\Delta x \cdot \Delta v_x \cong \frac{h}{m}$ h.t.b. qatnasları orın aladı. Bul fakt koordinatalar menen tezliklerdiń fazalıq qutısınıń

$$\Delta \tau_i = \Delta x \Delta y \Delta z \Delta v_x \Delta v_y \Delta v_z = \frac{\hbar^3}{m^3} \quad (2)$$

shamasına teń degen boljawda ańlatpasın tabadı.

Usınıń menen birge kvantlıq teoriyada birdey bólekshelerdiń bir birinen parqınıń joq ekenligi esapqa alınadı. Aqırında, kvantlıq teoriyada bólekshelerde yarım pütün kvant sanı menen (elektronlar, protonlar h.t.b.) yamasa pütün kvant sanı menen táriyiplenetuǵın (fotonlar) spin momentleriniń bar ekenligin esapqa alıw kerek.

Yarım pütün spinlik momentke iye bóleksheler Pauli principine baǵınadı. Bul princip boyınsha berilgen hár bir energiya qáddinde spinlik momentleriniń baǵıtları menen bir birinen ayrılatuǵın eki bóleksheden artıq bólekshelerdiń bolıwı múmkin emes. Bul Fermi tarqalıwı dep atalatuǵın bólekshelerdiń energiyalar boyınsha tarqalıwına alıp keledi⁴⁹:

$$dN_\varepsilon = \frac{\sqrt{2} \cdot V m^{3/2}}{\pi^2 \hbar^3} \cdot \frac{\sqrt{\varepsilon}}{A e^{\varepsilon/kT} + 1} d\varepsilon. \quad (3)$$

Bul ańlatpada V - barlıq bóleksheler iyelegen kólem hám A - bólekshelerdiń sanınan, olardıń massasınan hám temperaturasınan gárezli bolǵan shama. Kvantlıq teoriyasınıń kóz-qarası boyınsha (3)-tarqalıwdı yarım pütün spinlik momentke iye bolǵan bóleksheler (elektronlar hám basqa da elementar bóleksheler) ushın (1)- Bolcman tarqalıwınıń ornına paydalanıw kerek. Elektr ótkizgishlik teoriyasında Fermi nızamın paydalanıwdı II tomdaǵı 163-paragrafta kórsetken edik. Sol paragrafta Fermi tarqalıwı Bolcman tarqalıwı menen salıstırıldı hám kishi tıǵızlıqlar menen joqarı temperaturalarda Fermi tarqalıwınıń Bolcman tarqalıwı menen is júzinde sáykes keletuǵınlıǵı kórsetildi.

Pütün spinlik momentine iye bolǵan yamasa spinlik momenti bolmaǵan bóleksheler ushın (α -bóleksheleri, jup massalıq hám zaryadlıq sanlarǵa iye bolǵan yadrolar, bazı bir molekulalar) tarqalıw Boze-Eynshteyn formulası dep atalatuǵın mınaday formula menen beriledi:

$$dN_\varepsilon = \frac{\sqrt{2} \cdot V m^{3/2}}{\pi^2 \hbar^3} \cdot \frac{\sqrt{\varepsilon}}{A e^{\varepsilon/kT} - 1} d\varepsilon. \quad (4)$$

⁴⁹ Gáp Fermi-Dirak statistikası haqqında aytıp atır (Awdarıwshılar).

Bul formula Fermi formulasınan tek bólshektiń bóliminde 1 diń belgisi menen ayrıladı.

Fermi hám Boze-Eynshteyn statistikalarınń arasındaqı ayırmanı hám olardıń klassikalıq Bolcman statistikasına qatnasın birdey bolǵan úsh bóleksheni úsh hal boyınsha jaylastırıw mısasında kóriwge boladı. Bul hallar spinlik momentlerdiń hár qıylı baǵıtların da esapqa aladı dep boljaymız. Sebebi, Pauli principini boyınsha bir halda bir bóleksheden artıq bólekshelerdiń bolıwı múmkin emes.

Álbette, úsh bóleksheniń úsh qáddi boyınsha hár qıylı tarqalıwlarınń sanı onǵa teń; bul tarqalıwlarıń barlıǵı XXVII kesteniń joqarǵı úsh qatarında kórsetilgen.

Bólekshelerdiń individuallıq ózgeshelikleriniń bolıwına ruqsat etetuǵın klassikalıq statistikaniń kóz qarası boyınsha tórtinshi tarqalıwdan baslanıp, toǵızınshıda tamam bolatuǵın altı tarqalıwdıń hár biri úsh usıldıń járdeminde júzege keliwi múmkin. Mısalı, tórtinshisi mınaday usıl menen júzege keledi:

1. 1-halda 1- hám 2-bóleksheler, 2-halda 3-bólekshe
2. 1-halda 2- hám 3-bóleksheler, 2-halda 1-bólekshe
3. 1-halda 1- hám 3-bóleksheler, 2-halda 2-bólekshe

Tap usınday jaǵday onınshısına shekemgi basqa da tarqalıwlarǵa tiyisli. Onınshı tarqalıwdıń altı usıl menen júzege keliwi múmkin. Bolcman boyınsha bul individullıq tarqalıwlarıń hár birine birdey statistikalıq salmaq beriledi. Bul jaǵdayda, mısalı, tórtinshı tarqalıwdıń statistikalıq salmaǵı birinshi tarqalıwdıń statistikalıq salmaǵınan úsh ese úlken, al onınshınıń statistikalıq salmaǵı birinshisinikine salıstırǵanda altı ese úlken (XXVII kesteniń tórtinshı qatarına qarańız). Sonlıqtan, klassikalıq kóz-qarastan ayırım tarqalıwlarıń itimallıqları birdey emes. Mısalı, tórtinshı tarqalıwdıń itimallıǵı birinshi tarqalıwdıń itimallıǵınan úsh ese úlken, al eń aqırǵısınıń itimallıǵı birinshisinikinen altı ese úlken. Birinshi hár bir úsh tarqalıwdıń itimallıǵı $1/27$ ge, eń sońǵısınıń itimallıǵı $6/27$ ge, al qalǵanlarınıń hár biriniń itimallıǵı $3/27$ ge teń.

XXVII keste.

1-hal	3	0	0	2	2	1	0	1	0	1
2-hal	0	3	0	1	0	2	2	0	1	1
3-hal	0	0	3	0	1	0	1	2	2	1
Bolcman	1	1	1	3	3	3	3	3	3	6
Boze-Eynshteyn	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Fermi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Joqarıda aytılp ótilgenindey, kvantlıq teoriyanıń kóz-qarasları boyınsha birdey bóleksheleri bir birinen ayırıwǵa bolmaydı. Mısalı, tórtinshı tarqalıw haqqında tájiriye mınanı bere aladı: úsh bóleksheniń ekewi birinshi qáddide, birewi ekinshi qáddide jaylasadı. Boze hám Eynshteyn boyınsha barlıq sanlıq tarqalıwlarǵa birdey statistikalıq salmaq beriledi hám XXVII keste keltirilgen sanlıq tarqalıwlarǵa $1/10$ ǵa teń birdey itimallıq sáykes keledi. Eger bólekshe yarım pütün spinlik momentke iye bolsa hám soǵan sáykes, Pauli principine baǵınatuǵın bolsa, onda barlıq on tarqalıwlarıń ishindegi eń sońǵısınıń bolıwı múmkin. Bunnan, Fermi boyınsha, eń sońǵısınan basqa barlıq tarqalıwlarǵa nolge teń statistikalıq salmaq beriledi. Usıǵan sáykes, yarım pütün spin momentine iye bólekshe ushın eń sońǵı haldan basqa hallardıń barlıǵı ushın itimallıq nolge teń. Eń sońǵı haldıń itimallıǵı 1 ge teń - bul úsh bóleksheniń úsh hal boyınsha múmkin bolǵan birden-bir tarqalıwı bolıp tabıladı.

XXXII BAP

YADROLARDIŇ TÁBIYIY HÁM JASALMA AYLANIŞLARI

§ 368. Atom yadrosı hám onıń xarakteristikası. Joqarıda biz (340-paragraf), atom yadrosınıń elektronınıń pútin san eselengen óń $E = Z|e|$ zaryad penen táriyiplenetuǵınıń kórdik. Zaryadlıq san dep atalatuǵın Z sanı Mendeleevtiń dáwirlik sistemasındaǵı elementtiń qatar sanına teń. Atom yadrosınıń ekinshi xarakteristikası bolıp onıń M_y massası xızmet etedi. Ol elementtiń atomlıq salmaǵı menen baylanıslı. I tomdaǵı 43-paragrafta biz ximiyada qanday da bir elementtiń atomlıq salmaǵı haqqında gáp etkende onıń atomınıń massası M_A nıń $\frac{1}{16}M_O$ ǵa qatnası qabil etiledi, M_O arqalı kislorod atomınıń massası belgilengen⁵⁰. Ximiyalıq birikpelerde atomlıq salmaqlar hár qıylı elementlerdiń kislorodtı almasıratuǵın salmaqlıq qatnaslarda anıqlanatuǵın bolǵanlıqtan atomlıq salmaqlar ximiyada atomlardıń izotoplıq quramın esapqa almaǵan haldaǵı atomlardıń ortasha qásiyetin táriyipleydi. Haqıyqatında, birdey zaryadlıq san Z ke iye elementlerdiń kópshiligi hár qıylı bir neshe izotopqa, yaǵnıy hár qıylı M_A massalarǵa iye atomlardıń bir neshe sortına iye boladı. Sonlıqtan atomlıq salmaq túsiniǵı ayqınlastırıwdı talap etti. Biz qanday da bir elementtiń taza izotopınıń atomlıq salmaǵı A degende atomnıń massası M_A nıń $\frac{1}{16}M_O$ shamasına qatnasın túsinemiz. Bul belgilewlerde M_O arqalı kislorodtıń eń kóp tarqalǵan (sonıń menen birge eń jeńil) izotopınıń massası. Kislorodtıń usı izotopınıń atomlıq salmaǵı 16,00000 ge teń dep qabil etiledi. Usınday usıl menen anıqlanǵan taza izotoplardıń atomlıq salmaqları mass-spektrografiyalıq usıllardıń járdeminde ótkerilgen ólshewlerde anıqlanadı.

Atomlıq salmaǵı $A = 16$ bolǵan kislorodtıń massasınıń absolyut shamasın (grammlardaǵı) molekulalıq salmaq μ dı hám Avagadro sanı N di biliw arqalı tabıwǵa boladı:

$$M_O = \frac{\mu}{N} = \frac{16,00}{6,023 \cdot 10^{23}} = 26,576 \cdot 10^{-24} \text{ g.}$$

Atomlıq salmaqtıń bir birligine mınaday massa sáykes keledi:

$$\frac{26,576 \cdot 10^{-24}}{16} = 1,662 \cdot 10^{-24} \text{ g.}$$

Bunnan qálegen izotoptıń atomınıń massası M_A nıń absolyut mánisi grammlarda

$$M_A = 1,662 \cdot 10^{-24} A$$

formulasınıń járdeminde esaplanadı.

Elektronnıń massası atomlardıń ishindegi eń jeńili bolǵan vodorod atomınıń massasınan derlik eki mır ese jeńil bolǵanlıqtan qálegen izotoptıń yadrosınıń massası M_Y barlıq atomnıń massası M_A da júdá az shamaǵa ayrıladı. Biraq, sonda da, házirgi waqıtlardaǵı ólshewlerdiń dálliginde bul ayırma sezilerliktey hám, sonlıqtan, bazı bir esaplawlarda onıń shamasın esapqa alıw kerek boladı. Normal atomnıń elektronlıq qabıǵına kiretuǵın elektronlardıń sanı Z ke teń bolǵanlıqtan, M_Y menen M_A nıń arasında mınaday qatnas orın aladı:

$$M_Y = M_A - Zm.$$

⁵⁰ "Atomlıq salmaq" eski atama bolıp tabıladı. Házirgi waqıtları "Salıstırmalı atomlıq massa" dep atalatuǵın bul shama massanıń atomlıq birliklerinde ańǵartılǵan atomnıń massasınıń mánisi bolıp tabıladı. Bul shama berilgen elementtiń atomınıń massasınıń neytral bolǵan uglerodtıń ^{12}C izotopınıń massasınıń $\frac{1}{12}$ úlesine teń. Anıqlamasına sáykes salıstırmalı atomlıq massa ólshem birligine iye emes shama bolıp tabıladı (Awdarıwshılar).

Bul teńlikte m - elektronńıń massası. Atomlıq salmaqıń birliklerinde elektronńıń massası $5,48 \cdot 10^{-4}$ shamasına teń. Vodorod atomında elektronńıń úlesine ulıwmalıq atomlıq salmaqıń 0,05 procenti sáykes keledi. Basqa atomlar ushın bul úlestiń shaması onnan da kishi.

XIX ásirdiń baslarında barlıq elementlerdiń atomları quramalı qurılısqa iye hám olardıń barlıǵı da vodorod atomınan quralǵan degen gipoteza usınılǵan edi. Biraq, keyinirek, elementlerdiń atomlıq salmaqları vodorodtıń atomlıq salmaǵınan pútin san ese úlken bolmaǵanlıǵı sebepli bul gipotezadan bas tartıwǵa tuwrı keldi. Izotoplardıń ashılıwı bul faktti biykarlaǵanday bolıp kórindi: hár qanday elementlerdiń atomlıq salmaqlarınıń pútin sanǵa teń bolmawın olardıń quramalı izotoplıq quramǵa iye bolıwı menen túsindiriwge bolar edi. Biraq dál mass-spektrograflıq ólshewler taza izotoplar ushın da atomlıq salmaqlardıń pútin san eselengen vodorodtıń atomlıq salmaǵına teń emes ekenligin kórsetti (yamasa kislorodtıń 1/16 bóliminiń). Taza izotoplardıń atomlıq salmaqlarınıń pútin sannan ayırması júdá kishi. Biraq, sonda da, olardıń bar ekenligi haqıyqat hám júdá joqarı dálilikte ólshengen.

XXVIII keste de Mendeleevtiń dáwirlik sistemasınıń dáslepki 11 elementleriniń stabilli (ornıqlı) izotoplarınıń atomlıq salmaqları keltirilgen.

Taza izotoptıń atomlıq salmaǵına jaqın pútin sandı *massalıq san* dep ataydı. Biz onı M arqalı belgileybiz. M massalıq san zaryadlıq san Z penen bir qatarda yadronıń tiykarǵı xarakteristikası bolıp tabıladı. Hár qıylı izotoplardıń yadroları sáykes ximiyalıq elementtiń belgisi menen belgilenedi, onıń oń tárepine joqarıǵa massalıq san, al shep tárepine tómengen zaryadlıq san jazıladı. Misalı, massalıq sanı 7 ge teń litiydiń izotopı ${}^7_3\text{Li}$ túrinde, al sol litiydiń massalıq sanı 8 ge teń bolǵan izotopı ${}^8_3\text{Li}$ túrinde belgilenedi⁵¹. Keyinirek biz massalıq sannıń yadronıń quramına kiretuǵın elementar bólekshelerdiń sanın anıqlaytuǵınlıǵın kóremiz.

Vodorodtıń eń jeńil izotopınıń yadrosı eń ápiwayı yadro bolıp tabıladı (proton). Onıń ushın zaryadlıq san da, massalıq san da birge teń.

XXVIII keste de keltirilgen maǵlıwmatlardan izotoplardıń atomlıq salmaqlarınıń usı salmaqlarǵa eń jaqın bolǵan vodorod atomınıń pútin san eselengen atomlıq salmaǵınan azmaz kishi ekenligin ańsat kóriwge boladı. Misalı, vodorodtıń atomlıq salmaǵınıń tórt eselengen mánisi 4,03248 shamasına, al geliydiń salmaǵınıń 4,00388 shamasına teń ekenligi kórinip tur. Bunday jaǵdayda, geliy atomı tórt vodorod atomınan turadı dep esaplanganda, onda geliydiń hár bir moli ushın massanıń 0,0286 g shamasına kem ("defekt") bolıwı orın aladı. Keyinirek biz yadrolardıń quramına protonlar menen bir qatarda vodorodtıń eń jeńil izotopınıń quramında joq bolǵan bólekshelerdiń de (neytronlar, 380-paragraf) kiretuǵınlıǵın kóremiz. Biraq, usınday jaǵdayǵa qaramastan, *yadrolardıń massası onıń quramına kiretuǵın elementar bólekshelerdiń massalarınan kishi*. Hár bir yadro belgili bolǵan massanıń defekti Δm menen táriyiplenedi.

301-paragrafta biz salıstırmalıq teoriyasınıń massa menen energiyanıń arasındaǵı qatnastı ornatatuǵınlıǵın kórdik. Sistemanıń massasınıń Δm shamasına ózgerisi sistemanıń energiyasınıń

$$\Delta W = \Delta m \cdot c^2 \quad (2)$$

shamasına ózgeriwine sáykes keledi. Bul teńlikte c arqalı jaqtılıqtıń boslıqtaǵı tezligi belgilengen. Bunnan yadronıń massasınıń Δm shamasına teń defektiniń elementar bólekshelerden bul yadro quralǵanda bólinip shıǵatuǵın energiyasınıń shamasın beretuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Yadronıń massası onıń quramına kiretuǵın elementar bólekshelerdiń massalarınıń qosındısınan kishi. Joǵalǵan massanıń esabınan yadro payda bolǵanda júdá kóp muǵdardaǵı energiya bólinip shıǵadı.

⁵¹ Házirgi waqıtları kópshilik oqıw hám ilimiy ádebiyatlarda bunday izotoplardı ${}^7_3\text{Li}$ hám ${}^8_3\text{Li}$ túrinde belgileydi, yaǵnıy massalıq san da, zaryadlıq san da elementtiń belgisiniń shep tárepinde jazıladı (Awdarıwshılar).

Izotoplardıń atomlıq salmaqları

Z	Iztop	Tábiyiy aralaspadaǵı %	Atomlıq salmaq	Z	Iztop	Tábiyiy aralaspadaǵı %	Atomlıq salmaq
1	H ¹	99,98	1,00812	7	N ¹⁴	99,62	14,00750
1	D ²	0,02	2,01472	7	N ¹⁵	0,38	15,00489
2	He ³	~10 ⁻⁴	3,01701	8	O ¹⁶	99,76	16,00000
2	He ⁴	100	4,00388	8	O ¹⁷	0,04	17,00450
3	Li ⁶	7,9	6,01690	8	O ¹⁸	0,20	18,00470
3	Li ⁷	92,1	7,01804	9	F ¹⁹	100	19,00452
4	Be ⁹	100	9,01497	10	Ne ²⁰	90,00	19,99881
5	B ¹⁰	18,4	10,01605	10	Ne ²¹	0,27	21,00018
5	B ¹¹	81,6	11,01286	10	Ne ²²	9,73	21,99864
6	C ¹²	98,9	12,00398	11	Na ²³	100	22,99680
6	C ¹³	1,1	13,00766				

Massanıń atomlıq salmaqtıń bir birligine teń ózgerisi energıyanıń

$$\Delta W = 1,662 \cdot 10^{-24} \cdot 9 \cdot 10^{20} \text{ erg} = 1,496 \cdot 10^{-3} \text{ erg}$$

shamasına ózgerisine sáykes keledi.

Eger $1 \text{ eV} = 1,601 \cdot 10^{-12} \text{ erg}$ ekenligin esapqa alsaq, bul shamanı elektron-voltlerde kórsetiwge boladı:

$$\Delta W = \frac{1,496 \cdot 10^{-3}}{1,601 \cdot 10^{-12}} \text{ eV} = 931,8 \text{ MeV}. \quad (2)$$

Bul teńlikte *MeV* arqalı 10^6 eV ke teń megaelektronvolt belgilengen. Yadronıń quramına kiretuǵın bir elementar bólekshe ushın esaplangan massanıń defekti (yaǵnıy $\Delta m/M$ shaması) yadrolardıń kópshiligi ushın shama menen atomlıq salmaqtıń birliginiń 0,009 bólegin quraydı hám bul shama (2)-teńlik boyınsha $8,5 \text{ MeV}$ ke teń. Bul shamanı ximiyalıq reakciyalarda bólinip shıǵatuǵın energiya menen salıstırıw qızıqlı. Ximiyalıq reakciyalarda 2—3 eV energiya bólinip shıǵadı. Bunnan elementar bólekshelerden atom yadroları payda bolǵanda ximiyalıq reakciyalarda bólinip shıǵatuǵın energiyalardan millionlaǵan ese kóp energıyanıń bólinip shıǵatuǵınlıǵın kóremiz (reakciyalanatuǵın zattıń massasınıń bir birliginde). Bul energıyanıń shamaları júdá úlken bolǵanlıqtan, olar massalardıń sezilerliktey ózgerisleri menen baylanıslı. Ximiyalıq reakciyalarda da massanıń ózgerisi orın aladı, biraq bólinip shıǵarılatuǵın yamasa jutılatuǵın energiyalardıń shamasınıń kishi bolǵanlıǵı sebepli, massalardıń ózgerisin ámeliy jaqtan ólshewdiń múmkinshiligi bolmaydı.

Elementar bólekshelerden yadrolar payda bolǵanda úlken energıyanıń bólinip shıǵıwı atom yadrolarınıń oǵada bekkem dúziliske iye bolatuǵınlıǵın kórsetedi. Yadrolardı jasalma túrde bóliw menen baylanıslı qıyınshılıq usı jaǵday menen túsindiriledi.

Yadrolardıń tábiyiy bóliniwi (aylanısı⁵²) jerdiń betiniń qatlamında ushırasatuǵın elementlerdiń ishinde siyrek ushırasatuǵın Mendeleevtiń dáwirlik sistemasınıń aqırındaǵı eń awır elementlerde ushırasadı. Bunday aylanıslardı *tábiyiy radioaktivlik* dep ataydı.

§ 369. Tábiyiy radioaktivlik. 1896-jılı urannıń duzların izertlegen francuz fizigi A.Bekkerel olardıń kózge kórinbeytuǵın hám fotoplastinkanıń qaratuwına alıp keletuǵın nurlardı shıǵaratuǵınlıǵın taptı. Uran nurların magnit maydanında izertlew olardıń úsh qurawshılardan

⁵² Biz yadrolıq fizikada "aylanıs" sózin bir nárseniń ekinshisine (mısalı, bir elementar bóleksheniń ekinshisine yamasa energıyanıń bir túrden ekinshi túrge aylanıwı) aylanıwın túsinemiz. (Awdarıwshılar).

turatuǵınlıǵın kórsetti. Olardıń biri oń zaryadlangan bóleksheler awısatuǵınday bolıp awısadı. Bul qurawshı α -nurları atamasın aldı. Ekinshi qurawshı teris zaryadlangan bólekshelerdey bolıp awısadı, al úshinshi qurawshı bolsa magnit maydanında qozǵalıstıń baǵıtın ózǵertpeydi. Bul qurawshılar sáykes β - hám γ -nurları atamalarına iye boldı.

Eki jıldan keyin Per Kyuri menen Mariya Kyuri-Skladovskaya *radiy* hám *poloniy* dep atalatuǵın jańa eki elementti ashtı. Olardıń uran sıyaqlı, biraq intensivligi úlken nurlardı shıǵaratuǵın belgili boldı. Usınıń menen birge olar radioaktivlik qásiyetke burın belgili bolǵan toriydiń de iye ekenligin taptı.

Bunnan keyingi izertlewler radioaktiv nurlardıń mınaday qásiyetlerge iye ekenligi belgili boldı:

a) biologiyalıq hám ximiyalıq tásir jasaydı, sonıń ishinde fotoplastinkanıń qarawıtıwın júzege keltiredi;

b) olar gazlerdi ionlastıradı;

c) kóp sanlı qattı hám suyıq denelerdiń fluorescenciyaǵın qozdaradı;

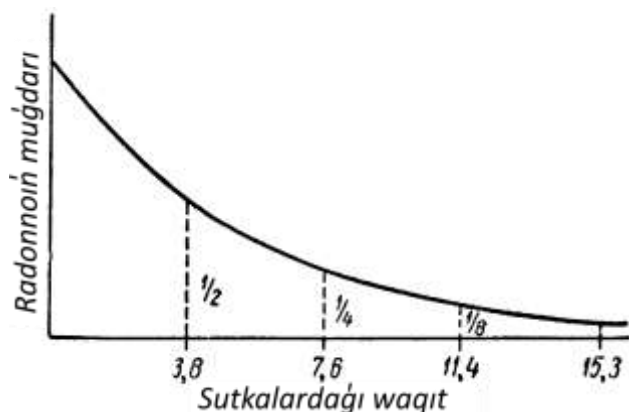
d) úlken ótiwshilik qábiletlikke iye.

Eń úlken ótiwshilik qásiyetke γ -nurları iye. Olar qalıń qattı deneler, solardıń ishinde metallar arqalı óte aladı. Eń kishi ótiwshilik qásiyetke α -nurları iye, biraq olar qattı denelerdiń juqa qatlamı, misalı, shıyshe arqalı óte aladı.

Radioaktiv zatlardıń temperaturası barlıq waqıtta qorshaǵan ortalıqtıń temperaturasınan joqarı boladı. Bul radioaktiv processtıń úziksiz energiya shıǵarıw menen júretuǵınlıǵın kórsetedi.

1908-jılı Rezerford hám onıń xızmetkerleri spektroskopiyalıq usıllardıń járdeminde radiydiń duzı ($RaCl_2$) bar kishkene ampulada usı ampulanıń ishinde burın bolmaǵan jańa eki gazdiń payda bolatuǵınlıǵın taptı. Olardıń biri geliydiń sızıqlarına sáykes keletuǵın spektrallıq sızıqlardı bergen; ekinshisiniń spektri sol waqıtları belgili bolǵan hesh bir elementtiń spektrine sáykes kelmegen. Bul jańa gaz *radiy emanaciya* dep ataldı. Keyinirek onı *radon* dep atadı. Onıń birinshi ataması onıń tek radiydiń qatnasında alıńǵanlıǵı menen baylanıslı. Házirgi waqıtları emanaciydiń bir neshe izotopları belgili. Bul gazdiń qásiyetlerin izertlew onıń inert gazlerdiń gruppasına kiretuǵınlıǵın kórsetti; $Z = 86$ zaryadlıq sanına hám $M = 222$ massalıq sanına iye. Bul baqlawlar radioaktivliktiń tábiyiy túrde júretuǵın atom yadrosınıń ıdırawı sıpatında túsindiriliwine alıp keldi. Usınday ıdırawdıń saldarında baslanǵısh element basqa elementke aylanadı. Radiy bolǵan jaǵdayda ıdıraw radiy atomınıń yadrosınan geliy atomınıń yadrosı menen birdey bolǵan α -bólekshesiniń shıǵarılıwına alıp keledi; neytrallasıwdıń saldarınan α -bólekshesiniń ádettegidey geliy atomına aylanadı. Yadronıń qalǵan bólimi jańa element bolǵan radonniń yadrosı bolıp tabıladı. Payda bolǵan radonniń yadrosınıń ózi radioaktivlik qásiyetke iye bolıp, waqıttıń ótiwi menen aylanıslarǵa ushıraydı.

Eger radiydi jabıq ampulaǵa salsa, onda ampuladaǵı radonniń muǵdarı dáslep tez ósedi, al bunnan keyin teń salmaqlıq muǵdarǵa jetisedi hám ózgerissiz qaladı. Bunday teń salmaqlıq radiyden payda bolǵan radonniń muǵdarı ıdırap atırǵan radonniń muǵdarına teń bolǵan jaǵdayda ornaydı. Eger radonniń bazı bir muǵdarın radiyden ayırıp, onı ayırım ampulaǵa salsa, onda usı ampuladaǵı radonniń muǵdarı 387-súwrette kórsetilgende grafiki túrinde súwretlengen nızam boyınsha úziksiz kemeyedi. 3,825 sutkadan keyin dáslepki radonniń jartısı, jáne 3,825 sutkadan keyin dáslepki radonniń sheregi qaladı h.t.b.



387-súwret.
Radonnoñ ıdıraw iymekligi.

$\tau = 3,825$ sutka waqıt aralıǵı yarım ıdıraw dáwiri dep ataladı. Eger m_0 arqalı radonnoñ dáslepki muǵdarın belgilesek, onda onıñ muǵdarınıñ waqıt t niñ ótiwi menen kemeyiw nızamı mınaday túrge iye boladı:

$$m = m_0 e^{-\lambda t}. \quad (1)$$

Bul teńliktegi λ - radioaktiv ıdırawdıñ turaqlısı dep atalatuǵın konstanta. Eger dt waqıtınıñ ishinde ıdıraytuǵın yadrolardıñ sanı dN bar bolǵan atomlardıñ sanına proporcional dep esaplasa, onda bul nızamnıñ túri ańsat túsindiriledi:

$$-dN = \lambda N dt. \quad (2)$$

Bul teńlikte λ - turaqlı shama. Sońǵı teńlikti bılayınsha kóshirip jazamız:

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt.$$

Integrallaw arqalı mınaday teńlikte alamız:

$$\ln N = -\lambda t + C. \quad (3)$$

Bul teńlikte C - integrallaw turaqlısı. $t = 0$ teńligi orınlı bolǵanda $\ln N_0 = C$ teńligine iye bolamız. Bul teńlikte N_0 - atomlardıñ dáslepki sanı. C niñ alınǵan mánisin paydalanıp, (3)-formulanı

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$$

túrinde yamasa kórsetkishli funkciyaǵa ótip

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (4)$$

formulasına iye bolamız. Bul formula empirikalıq (1)-formulaǵa sáykes keledi. Ekspontenciallıq nızamnıñ orınlanatuǵınlıǵı ordinata kósherine $\ln N$ shamasın, al abscissa kósherine waqıt t nı qoyıp tekserip kóriwge boladı. Bunday jaǵdayda (3)-qatnasqa sáykes tuwrı sıziq alınadı, al onıñ qıyalıǵı $tg \varphi = \lambda$ ıdıraw turaqlısın anıqlaydı (388-súwret). (4)-ıdıraw nızamı belgili bolǵan barlıq radioaktiv elementler ushın durıs.

ıdıraw turaqlısı λ niñ shamasın yarım ıdıraw dáwiri τ menen ańsat baylanıstırıwǵa boladı. Anıqlama boyınsha $t = \tau$ teńligi orınlı bolǵanda $N = \frac{1}{2} N_0$. Bunnan (4)-ańlatpa boyınsha mınaǵan iye bolamız:

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda \tau}.$$

Bul ańlatpanı logarifmlep

$$\lambda \tau = \ln 2$$

yamasa

$$\tau = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (5)$$

qatnasın alamız.

Endi radioaktivli A zattan ("ana" zattan) payda bolğan B radioaktiv zatınıń teń salmaqlıq muǵdarın anıqlaymız. B zatınıń payda bolğan atomlarınıń sanı dN' óziniń absolyut mánisi boyınsha ana zat A nıń ıdırağan atomlarınıń sanına teń. Demek, onıń mánisi (2) boyınsha

$$dN' = \lambda N dt$$

shamasına teń boladı. Bul teńliktegi λ menen N shamaları ana zatqa tiyisli. Usınday waqıttıń ishindegi B zatınıń ıdırağan atomlarınıń sanı mınağan teń:

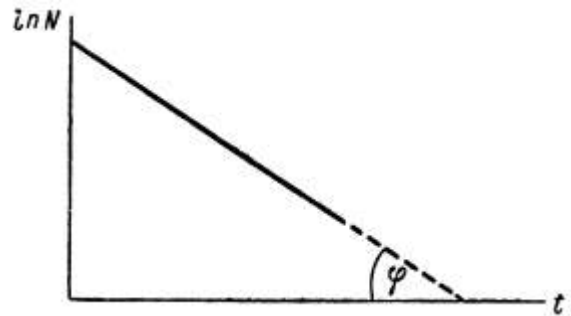
$$-dN'' = \lambda' N' dt.$$

Bul teńliktegi λ' hám N' shamaları B zatına tiyisli. Teń salmaqlıq $dN' = dN''$ teńligi orınlangan jaǵdayda orıyadı. Bunnan

$$\lambda N = \lambda' N'_0 \quad (6)$$

teńligine iye bolamız. Bu I teńlikte N'_0 arqalı teń salmaqlıq haldaǵı B atomlarınıń sanı belgilengen.

388-súwret.
In N shamasınıń waqıttan ǵárezliginiń
ıymekligi.



Eger N hám N'_0 shamaları belgili bolsa, onda (6)-qatnas ıdıraw turaqlılıarınıń birewi boyınsha (λ yamasa λ') ekinshisin tabıwǵa múmkinshilik beredi. Júdá tez ıdıraw yamasa júdá ástelik penen ıdıraw orın alǵanda (4)-formulanı is júzinde paydalanıwǵa bolmaytuǵın jaǵdayda λ ni anıqlaw ushın (demek yarım ıdıraw dáwiri τ dı) paydalanıladı. Baqlawlar hár qıylı radioaktiv zatlar ushın yarım ıdıraw dáwiriniń júdá hár qıylı bolatuǵınlıǵın kórsetedi. Mısalı, uran ushın yarım ıdıraw dáwiri $4,4 \cdot 10^9$ jılǵa; radon ushın, joqarıda kórsetilgendeı, $\tau = 3,825$ sutka; RaC' arqalı belgilenetuǵın element ushın yarım ıdıraw waqıtınıń shaması barı-joǵı 10^{-6} sek.

ıdırağan yadrolar menen bar yadrolardıń sanı (2) arasındadı qatnas *statistikalıq xarakterge* iye; bul qatnas tek júdá úlken bolğan N ushın durıs. Berilgen hár bir yadronıń ıdırawı tosınnan júzege keletuǵın waqıya bolıp tabıladı. Bunnan ıdıraytuǵın yadrolardıń sanınıń fluktuaciylarınıń bolıwınıń kerek ekenligi kelip shıǵadı.

Meyli, t waqıtınıń ishinde yadrolardıń sanı turaqlı dep esaplawǵa bolatuǵınday dárejede ástelik penen ıdıraytuǵın radioaktiv zat bar bolsın. Baqlaw waqıtı t nı birdeı bolğan k dana δt waqıtlarına bólemiz. Sonlıqtan $t = k\delta t$. δt waqıtınıń ishinde ıdıraytuǵın atomlardıń ortasha sanı

$$\delta \bar{n} = \lambda N \delta t$$

shamasına teń boladı. Bul teńlikte N arqalı biz qarap atırǵan radioaktiv zattıń atomlarınıń sanı belgilengen. Haqıyqatında, ayırım δt_i waqıtlarınıń ishinde ıdıraytuǵın atomlardıń sanı δn_i ortasha bolğan $\delta \bar{n}$ shamasına teń emes:

$$\delta n_i = \delta \bar{n} + \Delta.$$

Bul teńlikte Δ - ortasha sannan awısıw; awısıwdıń shaması oń da, teris te boladı hám olardıń barlıq baqlaw waqıtı t nı ishindegi summası nolge teń boladı. Itimallıqlar teoriyasında úlken k lardaǵı berilgen Δ awısıwınıń itimallıǵı p mınaday formula menen beriledi:

$$p = \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta\bar{n}}} \cdot e^{-\frac{\Delta^2}{2\delta\bar{n}}}. \quad (7)$$

Δ nıń úlken awısıwları siyrek ushırasadı. (7)-formulanıń durıs ekenligin radioaktiv nurlanıwdıń tásirindegi gazdıń ionlasıwın yamasa scintillyaciyanıń járdeminde δt_i waqıtlarınıń ishinde ıdırağan yadrolardıń sanın ólsheıw jolı menen tekserip kóriwge boladı (371-paragraf). Usınday túrdegi ólsheıwler

(7)-formulanıń durıs ekenligin kórsetti hám usınıń menen yadrolardıń ıdırıwınıń tosattan júzege keletuǵınlıǵın tastıyıqladı.

§ 370. Awısıw qaǵıydası. Radioaktiv ıdıraw basqa qálegen process sıyaqlı elektr zaryadlarınń saqlanıw nızamı, massa menen energiyanıń saqlanıw nızamlarına sáykes júredi. Birinshi nızam boyınsha payda bolǵan bólekshelerdiń zaryadlarınń qosındısı dáslepki yadronıń zaryadına teń. Ekinshi nızamdı bilayınsha jaza alamız: eger M_y atomnıń dáslepki yadrosınıń massası, al M_i payda bolǵan bólekshelerdiń massası bolsa, onda

$$M_y = \sum_i M_i + \frac{\Delta W}{c^2} \quad (1)$$

teńligi orınlı boladı. Bul teńlikte W - ıdırawdı bólinip shıqqan energiyanıń muǵdarı, c - jaqtılıqtıń boslıqtaǵı tezligi. Tábiyiy radioaktivlikte ΔW energiya atomlıq salmaqtıń úlken bolmaǵan úleslerindegi massaǵa sáykes keletuǵın bolǵanlıqtan, onda (1)-teńlikten *payda bolǵan bólekshelerdiń massalıq sanlarınıń qosındısınıń dáslepki yadronıń massalıq sanına teń bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı.*

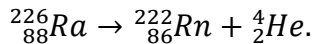
Bizlerdiń joqarıda kórsetkenimizdey, radiydiń radioaktivlik aylanısı α -bólekshesiniń shıǵarılıwına alıp keledi; bunday processti α -ıdıraw dep ataydı. ıdırawdıń ekinshi tipi β -nurlarınıń shıǵarılıwı menen baylanıslı. Radioaktiv zatlardıń nurlarınıń magnit maydanındaǵı awısıwın izertlew boyınsha ótkerilgen tájiriybeler β -nurlarınıń júdá tez qozǵalatıǵın elektronlardıń aǵısı ekenligin kórsetti. Solay etip, β -ıdıraw dáslepki yadrodan elektronnıń shıǵarılıwına alıp klinedi. Nurlardıń úshinshi sortı bolǵan γ -nurları óziniń tábiyatı boyınsha qısqa tolqınlı rentgen nurlarına sáykes keletuǵın elektromagnit nurlanıw bolıp tabıladı. Bul nurlar α - yamasa β -ıdırawı menen birgelikte júredi.

Zaryadlardıń saqlanıw nızamı menen massalıq sanlardıń qosındısınıń turaqlı bolıw nızamı *awısıw qaǵıydası* dep atalatuǵın qaǵıydanı anıqlawǵa múmkinshilik beredi. Bul qaǵıyda boyınsha berilgen α - yamasa β -ıdırawdıń nátiyjesinde qanday elementtiń payda bolatuǵınlıǵın anıqlawǵa boladı. α -ıdırawdı dáslepki yadrodan geliy atomınıń yadrosı ${}^4_2\text{He}$, yaǵnıy zaryadlıq sanı 2 hám massalıq sanı 4 ke teń bólekshe shıǵarıladı. Sonlıqtan, payda bolǵan jańa element dáslepki elementke qaraǵanda eki birlikke kishi bolǵan zaryadlıq sanǵa hám tórt birlikke kem massalıq sanǵa iye bolıwı kerek. Dáslepki yadronı X simvolı menen, al payda bolǵan yadronı Y simvolı menen belgilep, α -ıdıraw processin tómendegidey sxema túrinde jazamız:



Zaryadlıq san elementtiń Mendeleevtiń dáwirlik sistemasındaǵı ornın anıqlaytuǵın bolǵanlıqtan, (2)-sxemadan *α -ıdırawdıń nátiyjesinde Mendeleevtiń dáwirli sistemasında dáslepki elementten eki orın aldında turatuǵın jańa elementtiń payda bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı.*

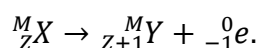
α -ıdırawǵa misal sıpatında radiydiń (${}^{226}_{88}\text{Ra}$) α -bólekshesin shıǵarıwınıń nátiyjesinde emanaciy ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ ǵa aylanıwı xızmet ete aladı:



Radonnıń massalıq sanı radiydiń massalıq sanınan 4 birlikke kem hám sonlıqtan ol Mendeleevtiń dáwirli sistemasında radiyden (siltili jer elementi) eki orınǵa aldıda turatuǵın inert gaz bolıp tabıladı.

β -ıdırawdı dáslepki elementtiń yadrosınan elektron shıǵarıladı. Elektronnıń massası vodorod atomınıń massasınan derlik eki mırnı ese kishi. Sonlıqtan elektronnıń massalıq sanı shama menen nolge teń. Elektronnıń zaryadı san mánisi boyınsha protonnıń zaryadına teń, biraq teris. Sonlıqtan elektron ushın $Z = -1$ shamasın beriw kerek.

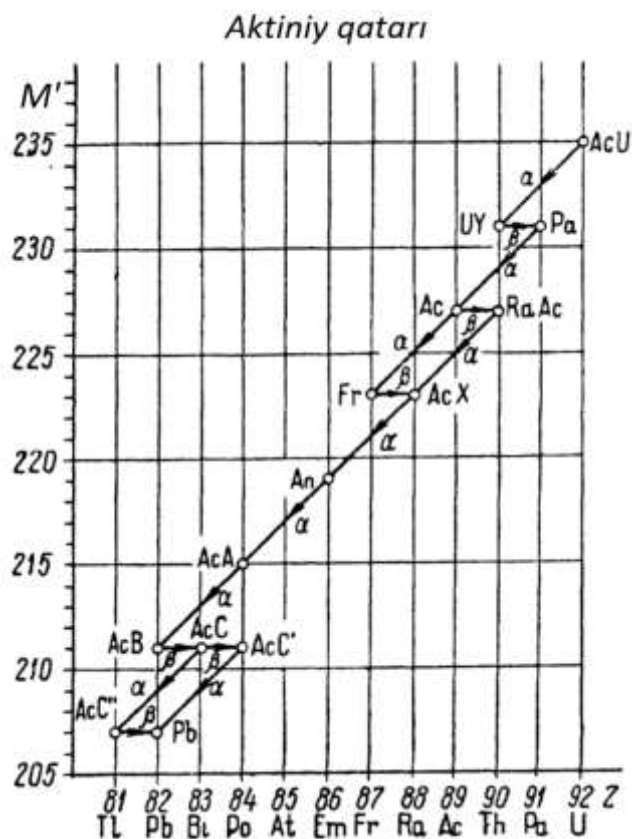
Usıǵan baylanıslı elektrondı ${}^{-1}_1e$ simvolı menen belgileybiz. Bunday jaǵdayda β -ıdırawdıń sxeması mınaday túrge iye boladı:

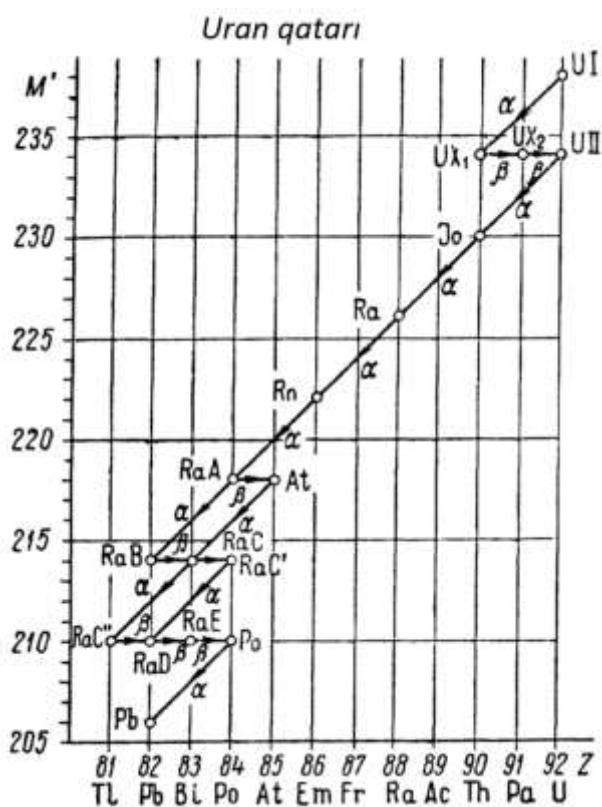
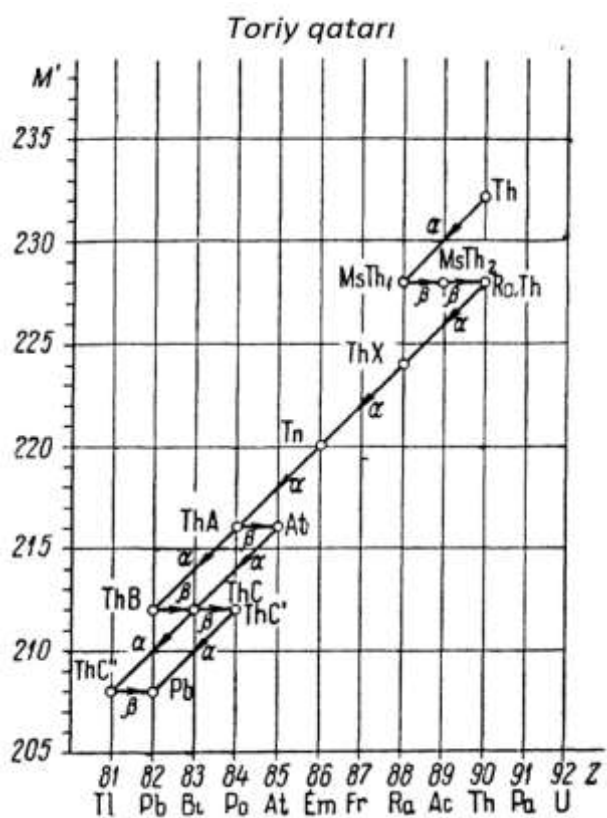


Jaña yadroniń massalıq sanı dáslepki yadronıń massalıq sanına teń, al onıń zaryadlıq sanı bir birlikke úlken. Nátiyjede β -ıdırawda Mendeleevtiń dáwirlik sistemasında dáslepki elementten bir orın keyin turatuǵın jaña element payda boladı.

Joqarıda keltirilgen eki qaǵıyda jerdiń qabıǵındaǵı awır elementlerdiń tábiyiy radioaktivliginde bolıp ótetuǵın bunnan keyingi barlıq izbe-iz aylanıslardı tolıq túsiniwge múmkinshilik beredi. Radioaktiv elementlerdiń *úsh qatarı* yamasa *úsh semeystvosı* bar eken. Olardıń baslawshıları mınalar: uran $^{238}_{92}\text{U}$, toriy $^{232}_{90}\text{Th}$, *aktinouran* (*AcU*) dep atalatuǵın uranniń izotopı $^{235}_{92}\text{U}$. Sońǵı qatar aktiniylik qatar dep ataladı.

389-súwrette barlıq úsh radioaktivli qatardaǵı izbe-iz aylanıslar kórsetilgen. Abscissa kósherine Z zaryadlıq san, al ordinata kósherine massalıq san M qoyılǵan. Bul diagrammada α -ıdıraw shepke hám tómenge qaray jılıwǵa alıp keledi, al β -ıdıraw bolsa gorizont baǵıtındaǵı ońǵa qaray jılıwdı boldıradı. Qatarlardıń úshewi de qorǵasınırıń ($Z = 82$) stabilli (yaǵnıy radioaktivli emes, ornıqlı) izotopı menen tamamlanadı. Bul qatarlardıń ayırım aǵzalarınń atamaları tariyxıy qalıplesken: γ pan- X_1 (UX_1), γ pan- X_2 (UX_2); radiy A , radiy B (RaA hám RaB); mezotoriy ($MsTh_1$ hám $MsTh_2$) h.t.b. Olardıń barlıǵı da zaryadlıq sanları $Z = 92$ menen $Z = 81$ diń arasındaǵı elementlerdiń izotopları bolıp tabıladı. Mısalı, radon ($^{222}_{86}\text{Rn}$), toron ($^{220}_{86}\text{Tn}$) hám aktinon ($^{219}_{86}\text{An}$) $Z = 86$ bolǵan (emanaciy) inert gazdiń hár qıylı úsh izotopı bolıp esaplanadı. ThC' hám AcC'' arqalı belgilenetuǵın toriylik hám aktiniylik qatarlardıń aǵzaları tallıydıń eki radioaktiv izotopları bolıp tabıladı ($M = 208$ hám 207). Al tallıydıń ózi tábiyiy túrde eki stabilli izotopqa iye ($^{203}_{81}\text{Tl}$ hám $^{205}_{81}\text{Tl}$).





389-súwret. Radioaktivli qatarlardagi aylanislar.

Qatarlardıń úshewi de tarmaqlanıwlarǵa iye. Bul jaǵday bir elementtiń α - hám β -ıdırawlarǵa qábiletli bolǵanlıǵı sebepli júzege keledi. Mısalı, uran qatarında $^{214}_{83}Ra$ elementi β -ıdıraw jolı menen $^{214}_{84}RaC'$ ge yamasa α -ıdıraw jolı menen $^{210}_{81}RaC''$ ke aylanıw qábiletligine iye. Bunnan keyin RaC' α -ıdırawǵa, al RaC'' β -ıdırawǵa ushıraydı; bul eki ıdırawdıń da bir element $^{210}_{82}RaD$ nıń (qorǵasınnıń radioaktiv izotopı) payda bolıwına alıp keledi. Bunnan keyin $^{227}_{89}Ac$ den baslanatuǵın jáne de bir tarmaqlanıwdı qaraymız. Basım kópshilik jaǵdaylarda (99%) bul elementtiń yadrosı β - bólekshesin shıǵaradı hám $^{227}_{90}RaAc$ ge aylanadı (torıydıń izotopı). Biraq ayırım jaǵdaylarda $^{227}_{89}Ac$ izotopı α -bólekshesin shıǵaradı hám $Z = 87$ hám $M = 223$ elementine aylanadı; bul Mendeleev tárepinen boljap ayılǵan ekaceziy (franciy) elementiniń radioaktivli izotopı (bul elementtiń stabilizotopı joq). Uran menen torıydıń radioaktivli qatarlarında kóp bolmaǵan muǵdarda $Z = 85$, $M = 218$ hám $Z = 85$, $M = 216$ yadroları da payda boladı. Olar Mendeleev tárepinen boljap ayılǵan ekaıod (astatin) elementiniń radioaktivli izotopları bolıp tabıladı.

Úsh qatardıń barlıǵı da yarım ıdıraw dáwiri júdá úlken bolǵan elementlerden baslanadı: $^{238}_{92}U$ izotopınıń yarım ıdıraw dáwiri $\tau = 4,4 \cdot 10^9$ jıl; torıy ushın $\tau = 1,8 \cdot 10^{10}$ jıl hám AcU ushın dáwir $\tau = 4 \cdot 10^8$ jıl. Bul jaǵday jerdiń qabıǵında radioaktiv elementlerdiń bar bolıw faktın túsindiredi. Eski dáwirlerde jeńil elementlerden bul elementlerdiń payda bolıwı kerek. Jerdiń qabıǵına kelip túsip, olar barlıq tábiyiy-radioaktivli elementlerdiń tiykarın salıwshılar bolıp ıdıray baslaǵan. Olar payda bolǵan momentten biziń dáwirlerimizge shekem olar tolıǵı menen ıdırap úlgermegen. Radioaktiv elementler tabılatuǵın orınlarda qorǵasın sózsiz boladı, al qorǵasın bolsa olardıń ıdırawınıń eń aqırǵı ónimi bolıp tabıladı. Joqarıda aytılıp ótilgendeı, uran qatarı ^{206}Pb menen, torıy qatarı ^{208}Pb menen hám aktiniy qatarı ^{207}Pb menen pitedi. Usıǵan sáykes, uran rudalarında ($^{238}_{92}U$ hám $^{235}_{92}U$ izotoplarına iye) ^{206}Pb menen ^{207}Pb izotoplarınıń aralaspasına, al torıy rudası taza ^{208}Pb izotopına iye boladı. Bul jerdiń qabıǵındaǵı stabilizotoplardıń ayırım túrde birden-bir ushırasıwı bolıp tabıladı.

Joqarıda kórsetilgen radioaktiv elementlerden basqa júdá hálisiz radioaktivlikke kaliy ($\tau = 1,3 \cdot 10^9$ jıl), rubidiy ($\tau = 6,5 \cdot 10^{10}$ jıl) hám samariy ($t = 6,7 \cdot 10^{11}$ jıl) iye.

Házirgi waqıtları biz baska elementlerdiń kóp sanlı radioaktiv izotoplarınıń bar ekenligin bilemiz. Biraq, olar jerdiń qabıǵında tábiyiy túrde ushıraspaydı hám tek jasalma túrde alınadı. Bul jaǵday usı izotoplardıń barlıǵı ushın yarım ıdıraw dáwiriniń salıstırmalı kishi ekenligi menen túsindiriledi. Sonlıqtan, eger olar jerdiń qabıǵında qashan bolsa da bolǵan bolsa, olar usı waqıtlarǵa shekem tolıq ıdırap úlgergen.

§ 371. Radioaktiv qubılıslardı baqlaw usılları. Eń dáslep radiaktivlik α -, β - hám γ -nurlardıń fotografıyalıq plastinkaǵa tási yamasa hawanı ionlastırwı boyınsha baqlandı. Hár qıylı radioaktiv elementlerdiń tási ionizaciyanı qozdırwı qábiletligi boyınsha bahalanǵan. 1910-jılı radiologiya boyınsha xalıq aralıq kongress radioaktivliktiń birligi sıpatında radonniń 1 g taza radiy menen teń salmaqlıq haldaǵı aktivligin qabıl etti. Bul birlik 1 *kyuri* dep ataldı. Usı birlik penen bir qatarda onıń tuwındı birlikleri bolǵan millikiyuri hám mikrokıyuri paydalanıladı.

Bul usıllardan basqa radioaktiv nurlanıw usı nurlar tárepinen qattı denelerde payda etiletuǵın fluorescenciya boyınsha da anıqlandı.

Radioaktiv ıdırawdı bólinip shıǵatuǵın úlken energiyalar ayırım α hám β -bólekshelerin registricıyalawǵa múmkinshilik beredi. Solay etip, radioaktivlik oblastta ayırım elementar processlerdi baqlawdıń sáti túsedi. Bul jaǵday yadrolıq fizikanıń házirgi waqıtlardaǵı barlıq rawajlanıwında áhmiyetli orındı iyeleydi.

Ayırım bólekshelerdi registraciyalawdıń hár qıylı usılların qaraymız.

1. Scintillyaciya usılı. Ayırım bólekshelerdiń registraciyalawdıń bul eń ápiwayı usılı bir bóleksheniń kelip urılıwınıń saldarınan fluorescenciyanatuǵın zattıń (mısalı, kúirtli cinktiń) shıǵarılǵan jaqtılıqtıń intensivliginiń adamnıń kózi menen (adaptaciya halında, 306-paragraf) sezgendey dárejede úlken bolatuǵınlıǵına tiykarlanǵan. Eger kúirtli cinkten islengen ekrandı α -

bóleksheleriniń jolina jaylastırıp, onı úlken bolmaǵan úlkeytiwdi beretuǵın mikroskop penen qaraǵanda mikroskoptıń kóriw maydanında ayırım jıltıldılar - scintillyacıyalar kórinedi. Hár bir jıltıldı bir α -bólekshesiniń ekranǵa kelip urılıwına sáykes keledi. Solay etip, ekranǵa kelip túsetuǵın α -bóleksheleriniń sanın tikkeley sanaw hám ekranniń betindegi qaysı orınǵa kelip túskenligin anıqlaw múmkin.

Scintillyacıyalar usılın tez ushatuǵın β -bólekshelerin registraciyalaw ushın da paydalanıwǵa boladı.

Flyuorescencianıwshı ekranǵa kelip túsetuǵın α -bóleksheleriniń sanın tikkeley sanaw berilgen radioaktiv derek tárepinen barlıq táreplerge shıǵarılatuǵın α -bóleksheleriniń sanın anıqlawǵa múmkinshilik beredi. Onıń ushın baqlanǵan scintillyacıyalar sanın $4\pi/\omega$ ǵa kóbeytiw kerek. Bul jerde ω arqalı radioaktiv preparat jaylasqan orınnan ekran kórinetuǵın denelik múyesh belgilengen. Usınday usıl menen 1 g radiydiń (Ra) bir sekunda $3,7 \cdot 10^{16}$ α -bólekshesin shıǵaratuǵınlıǵı anıqlandı.

Sońǵı sandı bilip, radioaktiv ıdırawdaǵı payda bolǵan geliydiń sanı boyınsha Avagadro sanı N di anıqlawǵa boladı. Eger biz radiydiń bazı bir muǵdarın α -bóleksheleri shıǵıp kete almaytuǵın jabıq ıdısqa salsaq, onda ıdista geliy jıynala baslaydı. Uran qatarın qarawdan (389-súwret) Ra den keyin α -bólekshelerin shıǵaratuǵın Rn , RaA hám RaC' elementleriniń bar ekenligin kóremiz. Usı úsh aǵzada qatardı qarawdı toqtatıwǵa boladı, Sebebi RaD salıstırmalı úlken yarım ıdıraw dáwirine iye boladı ($\tau = 22$ jıl) hám sonlıqtan baqlaw júdá kóp waqıt dawam etpeytuǵın bolǵan jaǵdayda α -aktivlikke iye bolǵan bunnan keyingi element (Po) tek júdá kishi muǵdarda ǵana jıynaladı. Teń salmaqlıq halında barlıq tórt Ra , Rn , RaA hám RaC' qatar waqıt birliğinde birdey sandaǵı α -bólekshelerin shıǵaradı. Olardıń jıyñaǵınıń sanı $n = 3,7 \cdot 10^{10} \cdot 7 \text{ g}^{-1} \text{ sek}^{-1}$ shamasına teń. Usı α -bóleksheleriniń esabınan ıdista geliy jıynaladı. Tikkeley ólsheuler 1 g radiyde bir jılda 172 mm^3 kólemindegi geliydiń jıynalatuǵınlıǵın kórsetedi. Bul hár sekundaǵı moller ushın mınaday sandı beredi:

$$\nu = \frac{172}{22,4 \cdot 10^6 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600} = 2,43 \cdot 10^{-13} \text{ mol/sek.}$$

Bunnan Avagadro sanı ushın mınaday mánisti alamız:

$$N = \frac{n}{\nu} = \frac{14,8 \cdot 10^{10}}{2,43 \cdot 10^{-13}} = 6,07 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}.$$

Bul shama baqlawlardıń qáteliklerdiń sheklerinde basqa usıllar menen alınǵan N ge sáykes keledi.

Házirgi waqıtları scintillyacıyalar usılı scintillyacıyalanıwshı esaplaǵıshlarda qollanıladı. Scintillyacıyalıq esaplaǵısh fotokóbeytkishtiń tikkeley aldına jaylastırılǵan lyuminesciyalanatuǵın kristaldan turadı (306-paragrafqa qarańız). Ol scintillyacıyalar jaqtılıǵınıń tásirinde registraciyanatuǵın toq impulsın payda etedi. Fosforescenciyanatuǵın zatlar júdá kóp. Olardıń ishinde júdá kishi waqıt jaqtılıq shıǵaratuǵın organikalıq zatlar kóp (shama menen 10^{-9} sek); fotokóbeytkishtegi toq impulsiniń uzaqlıǵı onnan da kishi, shama menen 10^{-10} sekunda quraydı. Bul jaǵdaylar birinen soń biri júdá kishi waqıt aralıǵında ótetuǵın jıltıldılardı registraciyalawǵa múmkinshilik beredi, solay etip, ásbap waqıt boyınsha úlken ajrata alıw qábiletligine iye boladı. Scintillyacıyalıq esaplaǵıshlar ionizaciyalıq esaplaǵıshlarǵa salıstırǵanda bólekshelerdiń hár qıylı túrlerin baqlawda effektivligi joqarı. Sonday fosforlar bar, olardıń jaqtılıq shıǵarıwı scintillyacıyanı júzege keltiretuǵın bóleksheniń energiyasına proporcional. Bul esaplaǵıshtı bóleksheniń energiyasın ólsheu ushın paydalanıwǵa múmkinshilik beredi.

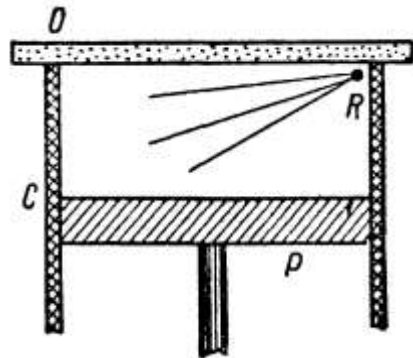
2. Vilson kamerası. Vilson kamerasınıń háreketi gazlerde ionlardıń puwlardıń kondensaciyasınıń orayları bolıp tabılatuǵınlıǵına tiykarlanǵan. Eger gaz benen birge asa toyıǵan puwlar bar keńislik arqalı jolında ionlardı payda ete alatuǵın tez ushatuǵın bóleksheniń ótse, onda payda bolǵan ionlardıń átirapında mayda tamshılar payda boladı. Kamerada bóleksheniń traektoriyasınıń izi dumannıń jıńıshke jolaǵı túrinde qalıplesedi. Jetkilikli dárejedegi qaptaldan jaqtılandırıw bolǵanda usınday izlerdi kóz benen tikkeley kóriwge yamasa súwretke túsiriwge boladı.

390-súwrette Vilson kamerasınıń sxeması berilgen: C - ishinde gaz benen suwdır yamasa basqa suyıqlıqtıń toyınǵan puwları bar cilindr tárizli ıdıs; joqarıdan cilindr shiyshe ayna O menen jabılǵan. C cilindrinde P porsheni qozǵala aladı. P porshenin úlken tezlik penen tómengené túsirgende gaz adiabatlıq ráwishte keńeyedi, usınıń nátiyjesinde ol salqınlaydı hám puwlar asa toyınǵan halǵa keledi. Eger ıdısqa R radioaktiv preparatınıń júdá az muǵdarı alıp kelinetuǵın bolsa, onda usı radioaktiv preparat tárepinen shıǵarılǵan bóleksheler óziniń traektoriyasınıń boyındaǵı gazdı ionlastıradı hám usı ionlarda payda bolǵan duman traektoriyaları kórinetuǵın etedi. 6-súwrette (qosımshaǵa qarańız) ThC preparatınan shıqqan α -nurlarınıń jollarınıń izleriniń fotosúwreti keltirilgen.

Vilson kamerası β -nurlarınıń izlerin de baqlawǵa múmkinshilik beredi. β -bóleksheleri óziniń jolınıń uzınlıǵınıń bir birliginde α -bólekshelerine qaraǵanda az salı ionlardı payda etetuǵın bolǵanlıqtan olardıń izleri α -bóleksheleriniń izlerine salıstırǵanda jıńışke boladı. Salıstırma kishi tezlikler menen qozǵalatuǵın β -bóleksheleri iymeygen izlerdi beredi. Sebebi olar gazdıń atomları menen soqlıǵısqa ózleriniń baǵıtın jeńil ózgertedi; tez qozǵalatuǵın β -bóleksheler tuwrı sızıqlı jollardı beredi. Solay etip, Vilson kamerasındaǵı izlerdiń sırtqı túri boyınsha baqlanatuǵın bóleksheniń tábiyatı haqqında gáp etiwge boladı.

390-súwret.

Vilson kamerasınıń dúzilisiniń sxeması.



Birinshi ret D.V.Skobelcın tárepinen jetilistirilgen usıl Vilson kamerasın usı kameranıń kósherine parallel bolǵan turaqlı magnit maydanına jaylastırǵan jaǵdayda alınadı. Bunday jaǵdayda β -bólekshelerdiń traektoriyası vintlik sızıqtıń bir bóliminen turadı (α -bóleksheleri ushın olardıń massasınıń úlken bolatuǵınlıǵına baylanıslı traektoriyanıń mayısıwı kishi). β -bóleksheler magnit maydanınıń baǵıtına perpendikulyar qozǵalǵan eń ápiwayı jaǵdayda onıń traektoriyası doǵa tárizli boladı hám onıń radiusı R mınaǵan teń (II tomdaǵı 217-paragrafqa qarańız):

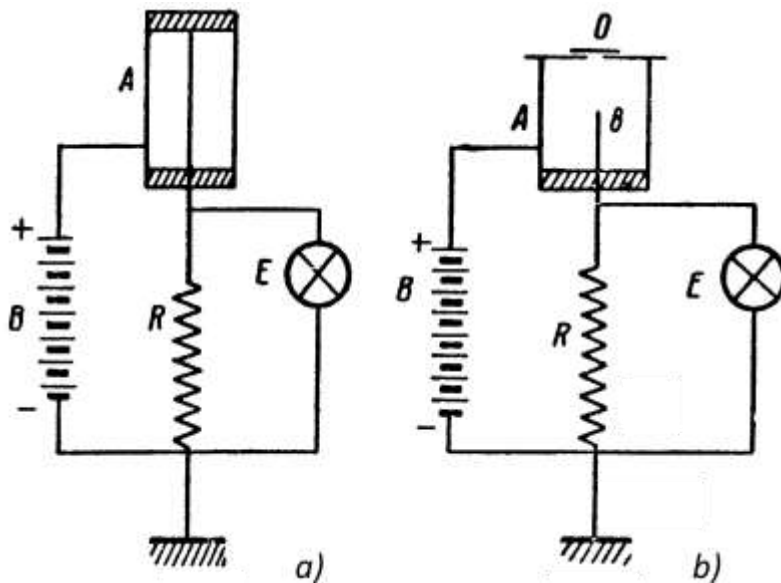
$$R = \frac{c}{e/m} \cdot \frac{v}{H}. \quad (1)$$

Bul ańlatpada H - magnit maydanınıń kernewligi, v - bóleksheniń tezligi.

β -bóleksheler (elektronlar) ushın e/m qatnasınıń shaması belgili bolǵanlıqtan, (1)-formula boyınsha v tezligin hám soǵan sáykes, baqlanatuǵın β -bólekshesiniń kinetikalıq energiyasın anıqlawǵa boladı. Tez qozǵalatuǵın β -bóleksheleri ushın olardıń massasınıń tezlikten gárezligin esapqa alıw kerek.

3. Ionizaciyalıq esaplaǵıshlar. Bólekshelerdiń ionizaciyalıq esaplaǵıshı házirgi waqıtları keń túrde paydalanılatuǵın ásbap bolıp tabıladı. Sabaqlı (391-a súwret) yamasa ushlı (391-b súwret) esaplaǵıshlardıń bolıwı múmkin. Sabaqlı esaplaǵısh tiykarları izolyator menen jabılǵan cilindr tárizli A trubkasınan ibarat. Trubkanıń kósheri boyınsha metall sabaq tartılǵan. Esaplaǵısh tómengi basımdaǵı qanday da bir gaz benen toltırılǵan (10 - 20 sm sınap baǵanasınıń basımında). Esaplaǵıshtıń sabaǵı jer menen júdá úlken R qarsılıǵı arqalı tutastırıladı. Sabaq penen trubkanıń diywallarınıń arasında B batareyasınıń járdeminde esaplaǵıshtıń ishindegi gazdıń tesip ótiw

potencialına salıstırǵanda ádewir kishi bolǵan V potenciallar ayırması payda etiledi⁵³. Esaplaǵıstırın ishine tez qozǵalatuǵın bólekshe kirip kelgende ol gazdıń ionizaciyasın júzege keltiredi. Nátiyjede V potenciallar ayırmasınıń tásirinde gazdıń tesiliwi orın aladı⁵⁴. Esaplaǵısh arqalı toq óte baslaydı hám R qarsılıǵınıń boyına kernewdiń túsiwi orın aladı. Bul kernewdiń shaması E elektrometriniń járdeminde ólshenedi. Esaplaǵıstırın parametrleri onıń ishindegi ionlasıwdıń toqtawı menen razryad toqtaytuǵınday etip saylap alınadı. Solay etip, esaplaǵıshqa hár bir tez qozǵalatuǵın bóleksheniń kelip túsiwi qısqa waqıttı toqtır (impulstıń) payda bolıwına alıp keledi. Házirgi waqıtları esaplaǵıshlar ádette radiotexnikalıq kúsheytiw sxemalarına tutastırıladı, al bul sxemalar bolsa bóleksheniń hár bir kelip túsiwin mexanikalıq esaplaǵıstırın yamasa fotoplenkada registraciyanatuǵın jaqtılıq jıltıldılarınıń járdeminde belgilewge múmkinshilik beredi.



391-súwret.
Esaplaǵıshlardıń sxeması.
a) sabaqlı esaplaǵısh;
b) ushlı esaplaǵısh.

Ushlı esaplaǵıshqa (391-b súwret) sabaq B iynesi menen almasırlıǵan. A trubkasınıń aldırǵı ushı O sańlaǵı bar qaqqap penen, al bul O qaqqapındaǵı sańlaq bólekshelerdiń esaplaǵıshqa kire alıwı ushın juqa folga menen jabılǵan. Ushlı esaplaǵıstırın ishindegi gazdıń basımı kishi bolıwı da, atmosferalıq basımǵa teń bolıwı da múmkin. Bul ushlı esaplaǵıstırın islew principi sabaǵı bar esaplaǵıstırın islew principi menen birdey.

Toqtır kúshi bólekshelerdiń tásirinde payda bolǵan ionlardıń sanına proporcional bolǵan esaplaǵıshlardı proporcionallıq esaplaǵıshlar dep ataydı. Olar α -bóleksheleriniń tásirin ázzirek ionlastıratuǵın β -bólekshelerinen ayırıwǵa múmkinshilik beredi. Proporcionallıq esaplaǵıstırın jumıs islewin onıń tek kúshli ionlastırıtıwǵın bólekshelerdi (α -bólekshelerin) registraciyalay alatıwında etip saylap alıw múmkin.

Esaplaǵıshlar γ -nurların baqlaw ushın da jaramlı. Olar ózleri payda etken ekinshi elektronlar (fotoelektronlar, komptonlıq elektronlar) boyınsha registraciyanadı.

Esaplaǵıshlardı geypara waqıtları sáykes keliw sxeması boyınsha da paydalanadı. Bul sxema mınadan ibarat: kúsheytiwshi radiotexnikalıq dúzilis eki (yamasa onnan da kóp sanlı) esaplaǵıshlardaǵı bir waqıttaǵı impulslerdi ǵana registracilaydı. Demek, tek eki esaplaǵısh arqalı ushıp ótetuǵın tek bir bóleksheni ǵana belgileydi.

⁵³ Rus tilindegi "probivnoy potencial" ("tesip ótetuǵın potencial") sóziniń ornına "tesip ótiw potencialı" sózi paydalanıldı (Awdarıwshılar).

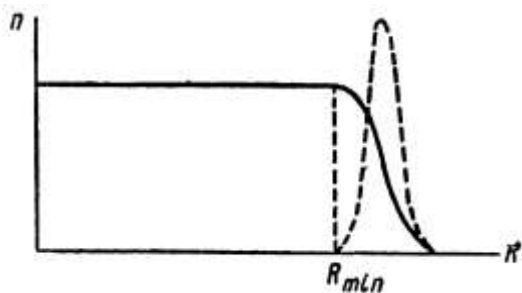
⁵⁴ YAǵnıy "proisxodit probay gaza" - "gazdıń tesiliwi orın aladı" (Awdarıwshılar).

4. Qalıń qatlamlı fotoplastinkalar usılı. Bul usıl sovet fizikleri L.V. Misovskiy hám A.P.Jdanov tárepinen islep shıǵıldı.

Usıl bromlı gúmistiń α -bólekshesi ushın ótken dáneshesindegi ıdırawınıń orın alatuǵınlıǵına tiykarlangan. Sonlıqtan fotografiyalıq emulsiyanıń qalıń qatlamında (qalıńlıǵı 50-300 mkm) qayta islegennen keyin bóleksheniń birinen soń biri jaylasqan qarawıtqan noqatlar túrindegi izi alınadı. Bul izler mikroskopta kórinedi. Usıldıń artıqmashlıǵı onıń qosıw tásiri bolap tabıladı. Bóleksheniń tásirindegi bromlı gúmistiń ıdırawı bazı bir waqıttır ishinde saqlanadı, sonlıqtan bir plastinka birewinen soń ádewir waqıt keyin ótken kóp sanlı bólekshelerdi de registraciyalaw ushın paydalanıw múmkin.

§ 372. Alfa-ıdıraw. Radioaktiv elementler tárepinen shıǵarılǵan α -bóleksheleriniń baslangısh tezlikleri shama menen 10^9 sm/sek shamasında. Bunday tezlik bir neshe MeV energiyaǵa sáykes keledi.

Qanday da bir zat arqalı ótkende α -bólekshe azmazdan energiyasın joǵaltadı hám bul jaǵday aqırǵı esapta onıń toqtawına alıp keledi. Vilson kamerasında hár qıylı radioaktiv elementler ushın hawadaǵı (normal basımdaǵı) α -bóleksheleriniń traektoriyalarınıń izleriniń uzınlıǵı shama menen 2,6 den 11,5 sm ge shekem jetedi. Jolınıń usınday uzınlıǵında α -bólekshe bunnan keyin hawanı endi ionlastıra almaytuǵınday dárejede óziniń tezligin joǵaltadı. Berilgen radioaktiv zat ushın barlıq izlerdiń uzınlıǵı shama menen birdey. Bul jaǵday berilgen sorttaǵı yadrolardan shıǵatuǵın α -bóleksheleriniń tezlikleriniń bir tekli ekenligin ańǵartadı. α -bólekshesiniń jolınıń uzınlıǵı onıń *juwırıp ótiw* uzınlıǵı dep ataladı. 392-súwrette (tutas iymeklik) R diń berilgen mánisine teń yamasa onnan úlken bolǵan qashıqlıqtı ótken α -bóleksheleriniń sanı n niń R shamasınan ǵárezligi kórsetilgen. Kórinip turǵanıday, bazı bir R_{min} shamasına shekem bólekshelerdiń sanınıń is júzinde turaqlı boladı. Bunnan keyin berilgen radioaktiv zat shıǵaratuǵın α -bóleksheleriniń sanı $R > R_{min}$ jolın ótken keyin tez kemeyedi. Bul berilgen radioaktiv zat tárepinen shıǵarılatuǵın α -bóleksheleriniń juwırıp ótiw jolınıń júdá úlken bolmaǵan sheklerde variaciyalanatuǵınlıǵın kórsetedi. Punktir iymeklik bóleksheler sanınıń juwırıp ótiw uzınlıǵı boyınsha tarqalıwın beredi.



392-súwret.
 α -bóleksheleriniń juwırıp ótiw iymekligi.

α -bóleksheleri zatlar arqalı ótkende olardıń energiyasınıń joǵalıwı tiykarınan elektronlar menen soqlıǵısıwdıń nátiyjesinde boladı. Bunday jaǵdayda hár bir ayırım soqlıǵısıwda α -bólekshe tek óziniń energiyasınıń úlken bolmaǵan bólimin ǵana joǵaltadı. Toliq toqtaw ushın júdá kóp sanlı soqlıǵısıwdıń júzege keliwi kerek. Juwırıp ótiw uzınlıqlarınıń hár qıylı bolıwı fluktuaciyalıq xarakterge iye boladı hám juwırıp ótiw jolınıń uzınlıǵına salıstırǵanda úlken emes.

Juwırıp ótiw jolınıń uzınlıǵı R shama menen α -bólekshesiniń dáslepki tezliginiń kubına proporcional:

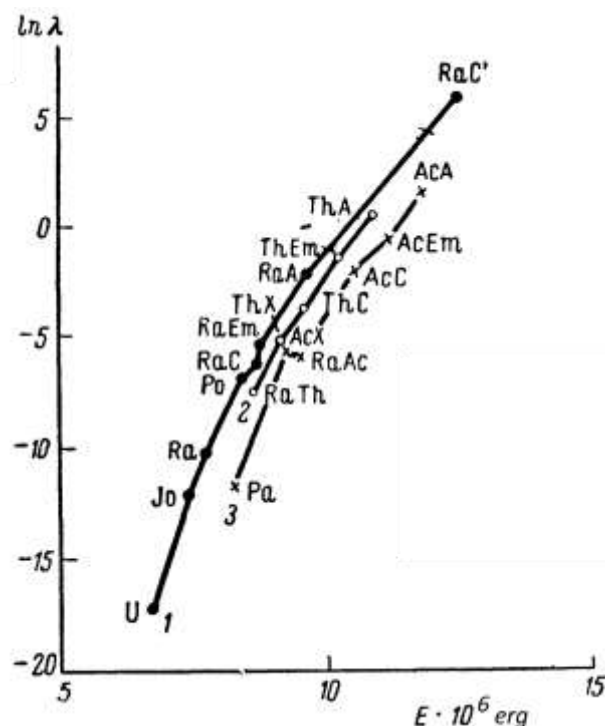
$$R \cong av^3. \quad (1)$$

Bul qatnas orta tezliktegi α -bóleksheleri ushın durıs. Tez qozǵalatuǵın α -bóleksheleri ushın juwırıp ótiw jolınıń uzınlıǵı shama menen v^4 ke proporcional ósedi.

α -bóleksheleriniń tezliklerin dál ólshew magnit maydanındaǵı olardıń awısıwı boyınsha ólshewge boladı. Birinshi ret P.L.Kapicaǵa bunday ólshewlerdi orınlawdıń sáti tústi. Ol kernewligi júdá úlken bolǵan (bir neshe jüz mır ersted) magnit maydanın qısqa waqıttır ishinde alıw ushın

arnawlı dúzilisti dóretti. Magnit maydanındaǵı ólshewler berilgen radioaktiv zattıń, ulıwma aytqanda, tezlikleri bir birinen úlken bolmaǵan ayırmaǵa iye α -bóleksheleriniń bir neshe gruppaların shıǵaratuǵınlıǵın kórsetti. Hár bir gruppanıń sheklerinde tezlikler júdá bir tekli. Usınıń menen bir qatarda, berilgen element ushın ádettegidey juwırıw jolına iye α -bóleksheleri menen bir qatarda kóp bolmaǵan muǵdarda uzın aralıqlarǵa juwırıp ótetuǵın α -bóleksheleri de bar boladı eken. Mısalı, α -bóleksheleriniń hár bir millionınıń ishinde shama menen 28 bóleksheshe 7 sm shamasındaǵı juwırıp ótiw jolına hám 11 sm juwırıp ótiw jolına 5 bóleksheshe iye boladı eken.

393-súwret.
Gayger-Nettol nızamı:
Urannıń (1), torıydıń (2) hám aktiniydıń (3)
qatarları.



α -bólekshesiniń dáslepki tezligi menen radioaktiv elementlerdiń yarım ıdıraw waqıtı τ dıń arasında belgili bolǵan baylanıs orın aladı: *yarım ıdıraw dáwiri qansha kishi bolsa, radioaktiv element sonshama tezirek qozǵalatuǵın α -bólekshelerin shıǵaradı eken*. Bul baylanıs sanlıq jaqtan empirikalıq materialdı tallawdıń tiykarında tabılǵan Geyger-Nettol nızamı dep atalatuǵın nızam boyınsha ańǵartıladı⁵⁵:

$$\ln \lambda = A \ln R + B. \quad (2)$$

Bul teńlikte R - α -bóleksheleriniń juwırıp ótiw jolınıń uzınlıǵı, λ - radioaktiv ıdırawdıń turaqlısı, A - bazı bir universallıq turaqlı, B - berilgen radioaktiv qatar ushın tán bolǵan turaqlı. $R \cong av^3$ teńligi orınlı bolǵanlıqtan, (2)-qatnas kishi yarım ıdıraw dáwirine iye bolǵan yadrolardıń tez qozǵalatuǵın α -bólekshelerin shıǵaratuǵınlıǵın ańǵartadı.

Geyger boyınsha juwırıp ótiwdiń uzınlıǵı mınaǵan teń:

$$R = av^3 = a'E^{3/2}.$$

Bul teńlikte v arqalı α -bóleksheleriniń tezligi, E arqalı energiya, a hám a' arqalı turaqlı shamalar belgilengen. Sonlıqtan, mınaday teńlik orınlı boladı:

⁵⁵ Házirgi waqıtları α -bóleksheleriniń energiya menen radioaktiv yadronıń yarım ıdıraw dáwiriniń arasındaǵı funkcionallıq nızamdı ańǵartatuǵın Geyger-Nettol nızamın (X.V.Geyger, Dj.Nettol) bilayınsha jazadı:

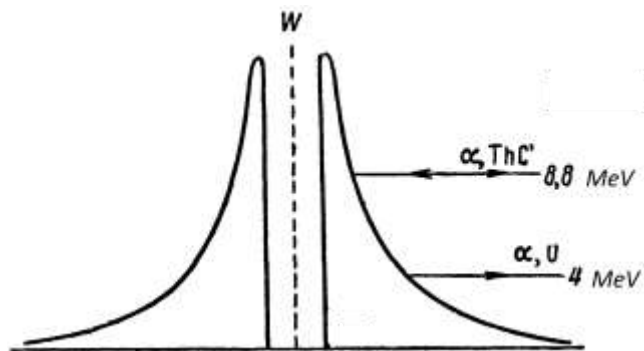
$$\lg T_{1/2} = a \frac{Z}{\sqrt{E}} + b.$$

Bul teńlikte E - α -bólekshesiniń energiya, $T_{1/2}$ - radioaktiv yadronıń yarım ıdıraw dáwiri, Z - zaryadlıq san (yadronıń qatar sanı), a menen b - konstantalar (Awdarıwshılar).

$$\ln \lambda = A' \ln v^3 + B = A'' \ln E + B. \quad (2a)$$

Bul formula energiyanıń λ menen bir waqıtta ósiw tendenciyasın ańǵatadı. $\ln \lambda = f(E)$ iymeklikleri 393-súwrette kórsetilgendey túrge iye boladı. Tájiriybeler (2-a) teńlemeniniń birinshi juwıqlawda ǵana qanaatlandırılatuǵınlıǵın kórsetedi.

α -bóleksheleriniń shashırawı boyınsha ótkerilgen tájiriybeler (340-paragraf) α -bóleksheler menen qanday da bir atomnıń yadrosınıń arasında $10^{12} - 10^{13}$ sm qashıqlıqlarǵa shekemgi aralıqlarda Kulonlıq iyterilis kúshiniń húkim súretuǵınlıǵın kórsetedi. Jeńil yadrolarda shashırarǵanda 10^{-12} sm qashıqlıqta Kulon nızamınıń biraz buzılauǵınlıǵı baqlanadı: iyterilis kúshleriniń shaması Kulon nızamı dál orınlanatuǵın jaǵdaydaǵıǵa salıstırǵanda kishi. Jaǵday kulonlıq iyterilis kúshi menen bir qatarda qosımsha tartılıs kúshi payda bolǵanday bolıp kórinedi. Biraq usınday jaǵdayǵa qaramastan, eger siyrek usharasatuǵın ayırım jaǵdaylardı esapqa almaǵanda (375-paragraf) α -bóleksheleriniń atomlardıń yadroları menen soqlıǵısıwı serpimli ótedi. Bul mınanı ańǵatadı: yadronıń dógeriginde potenciallıq barer bar bolıp, onıń maksimallıq biyikligi ushıp keletuǵın α -bólekshesiniń baslanǵısh kinetikalıq energiyasınan úlken. Usınıń menen birge, α -ıdıraw processı awır elementlerdiń yadrolarında α -bóleksheleriniń bar ekenligin kórsetedi. Demek, yadronıń ishinde potenciallıq shuqırdıń bolıwı kerek. Yadronıń ulıwmalıq potenciallıq maydandı 394-súwrette kórsetilgen iymekliktiń járdeminde kórsetiw múmkin. Iymekliktiń sırtqı bólimleri giperbolalar bolıp tabıladı hám bul jaǵday yadronıń sırtındaǵı maydannıń kulonlıq xarakterge iye ekenligin kórsetedi.

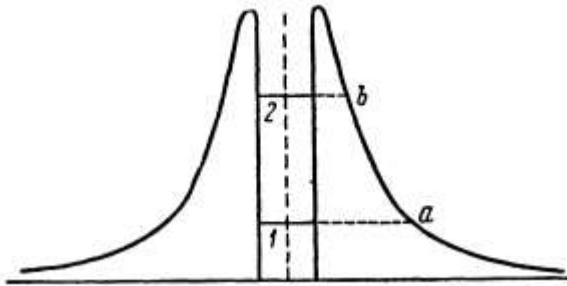


394-súwret.
Urannıń potenciallıq bareri.

Eksperimentlerde alınǵan maǵlıwmatlardı tallaw yadronıń ıdırawınıń saldarınan payda bolǵan α -bóleksheleriniń tezlikleriniń klassikalıq mexanikanıń kóz-qaraslarına sáykes kelmeytuǵınlıǵın kórsetedi. Misal sıpatında urannıń α -ıdırawın qaraymız. Tájiriybeler, ThC' yadroları tárepinen shıǵarılauǵın energiyası 8,8 MeV bolǵan júdá tez ushatuǵın α -bóleksheleriniń uran yadrolarınan Kulon nızamına sáykes shashıratuǵınlıǵın kórsetedi. Demek, uran yadrosınıń potenciallıq bareriniń biyikligi 8,8 MeV ten joqarı jaylasqan bolıwı kerek (394-súwret). Klassikalıq kóz-qaraslar boyınsha, bunday jaǵdayda uran yadrolarınan ushıp shıǵatuǵın α -bóleksheleriniń 8,8 MeV ten úlken energiyaǵa iye bolıwınıń kerek ekenligi kelip shıǵadı. Sebebi onıń yadrodan ushıp shıǵıwı ushın potencial barer arqalı ótiwi kerek. Haqıyqatında, uran tárepinen shıǵarılauǵın α -bóleksheleriniń energiyası barı-joǵı 4 MeV ke teń. Klassikalıq kóz-qarastan pútkilley túsiniksiz bolǵan bul jaǵday kvantlıq mexanikada túsindiriledi. 365-paragrafta aytılıp ótilgenindey, kvantlıq mexanikada potenciallıq barer arqalı ótiwdiń belgili itimallıǵı bar. Solay etip, *yadrolardan α -bóleksheleriniń shıǵarılıwı processı kvantlıq-mexanikalıq xarakterge iye boladı.*

Kvantlıq mexanikadan barerdiń keńligi b qanshama kishi bolsa, onda bóleksheniń barer arqalı ótiwiniń itimallıǵınıń úlken bolatuǵınlıǵı belgili. 395-súwrette potenciallıq barerdiń keńligi d nıń onıń tómengi bóliminde úlken, al joqarı bóliminde kishi ekenligi kórinip tur. Eger qanday da bir radioaktiv yadroda α -bóleksheler tereńdegi qáddide jaylasqan bolsa, onda onıń barer arqalı ótiwiniń itimallıǵı kishi; bul usınday yadronıń úlken yarım ıdıraw dáwirine iye bolatuǵınlıǵın ańǵatadı;

usınıń menen birge bólekshe bári bir barer arqalı ótetuǵın bolsa, onda ol potenciallyq iymekliktiń tómengi a iymekliginde jaylasadı hám yadro menen iyterilis kúshleriniń esabınan bólekshe alatuǵın tezlik kishi, al, kerisinshe, eger bólekshe 2-jokarǵı qáddide jaylasqan bolsa, onda barer arqalı ótiwiniń itimallıǵı úlken hám usınıń menen birge onıń yadrodan shıqqannan keyingi tezligi úlken boladı. α -bólekshe biyik qáddide jatatuǵın yadro kishi yarım ıdıraw dáwirine iye boladı hám tezligi joqarı bolǵan α -bólekshelerin shıǵaradı. Solay etip, kvantlıq teoriya Geyger-Nettol nızamınan kelip shıǵatuǵın qatnaslarǵa tikkeley alıp keledi. α -ıdıraw processin qatań túrde sanlı táriyiplew ushın yadronıń potenciallyq iymekliginiń túrin dál biliw kerek boladı.



395-súwret.

Yadrodaǵı α -bóleksheleriniń qáddileri.

§ 373. γ -nurlarınıń spektrleri hám ishki konversiya. Kóp sanlı radioaktiv elementlerdiń ıdırawı (α -ıdırawı da, β -ıdırawı da) γ -nurlarınıń shıǵarılıwı menen júredi. Bunday jaǵdayda shıǵarılǵan γ -nurlarınıń ózi ıdıraǵan yadronıń óziniń elektronlıq qabıǵındaǵı fotoeffektke júzege keltire aladı. Bul processti *ishki konversiya*, al γ -nurlarınıń tásirinde ushıp shıqqan elektronlardı *konversiya elektronları* dep ataydı. Ishki konversiya processiniń itimallıǵı joqarı hám onıń mánisiniń 100 % ke jetiwi múmkin; bunday jaǵdayda eń birinshi γ -nurları pútkilley baqlanbaydı, al tek konversiya elektronları ǵana baqlanadı. Konversiya elektronlarınıń energiyası bolǵan eV shaması menen γ -fotonnıń energiyası $h\nu$ menen ádettegi fotoeffektte orın alatuǵın qatnastırń járdeminde beriledi:

$$eV = h\nu - A. \quad (1)$$

Bul teńlikte A arqalı elektrondı berilgen qabıqtan julıp alıw ushın islengen jumıs belgilengen.

γ -fotonlarınń energiyası úlken bolǵanlıqtan, (1)-qatnas boyınsha konversiya elektronlarınıń tezlikleri de úlken boladı. Bul tezliklerdiń shaması β -bóleksheleriniń, yaǵnıy tikkeley yadrodan shıǵatuǵın elektronlardıń tezlikleri menen barabar. Usınıń nátiyjesinde kóp waqıtlar dawamında konversiya elektronların β -bóleksheler menen shatastırdı. Bul tábiyiy radioaktivlik qubılısın tallawdı qıyınlastırdı.

Elektronlardıń haqıyqatında da konversiya elektronları bolıp tabılatuǵınlıǵı (1)-teńliktiń tiykarında júrgiziledi. Atomnıń qabıǵınan elektrondı julıp alıw jumısınıń shaması sáykes qáddilerdegi elektronlardıń energiyasına teń. Awır atomlarda ishki elektronlar energiyaları rentgenoskopiyalıq maǵlıwmatlar boyınsha belgili bolǵan jabıq K -, L -, M -, N qabıqlarında jaylasqan. Solay etip, eger yadro jiyiligi ν bolǵan monoxromat γ -nurların shıǵaratuǵın bolsa, onda energiyalarınń mánisleri tómendegidey bolǵan konversiya elektronlarınıń shıǵıwı kerek:

$$eV_1 = h\nu - W_K, eV_2 = h\nu - W_{L_I}, eV_3 = h\nu - W_{L_{II}}, \dots \quad (2)$$

Bul teńlikte W_K , W_{L_I} , $W_{L_{II}}$ arqalı yadrosı γ -nurların shıǵarǵan atomnıń rentgen qáddileriniń energiyaları belgilengen.

XXIX kesteniń birinshi baǵanasında $RaB \rightarrow RaC$ ıdırawında baqlanǵan konversiya elektronlarınıń kiloelektronvoltlerdegi energiyaları keltirilgen; ekinshi baǵanada $Z = 83$ zaryadlıq sanına teń atomnıń qabıǵındaǵı elektronlardıń qabıqlarınıń W energiyaları qoyılǵan. Tórtinshi baǵanada bolsa konversiya elektronlarınıń energiyaları $h\nu - A$ berilgen. Bul jaǵdayda $h\nu$ diń shaması 52,91 keV shamasına teń dep alınǵan. Kórinip turǵanıday, birinshi hám tórtinshi baǵanalarda keltirilgen mánisler bir biri menen baqlawlardıń qátesi sheklerinde sáykes keledi.

Bunnan (2)-qatnastırn orınlanatuǵınlıǵı kelip shıǵadı. 52,91 keV shaması dáslepki γ -fotonnırn energiyası bolıp tabıladı.

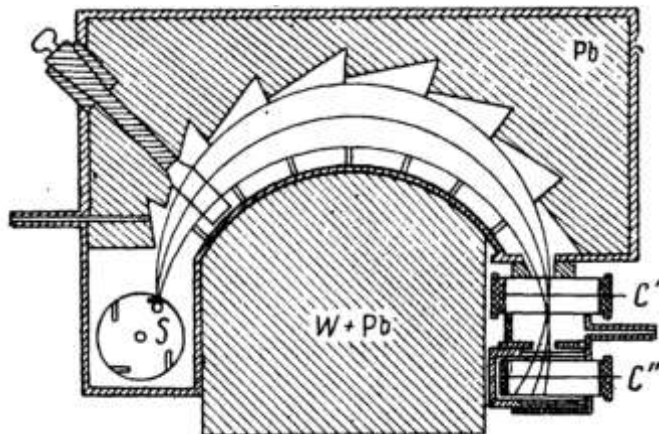
XXIX keste.

$Z = 83$ bolǵan jaǵdaydaǵı elementtın hár qıylı qabıqlarınan shıqqan konversiya elektronlarınn energiyası

Baqlanǵan inversiya elektronlarınn kiloelektronvollardegi energiyası	$Z = 83$ bolǵan jaǵdaydaǵı atomnırn qáddilerinn energiyası W	Qáddi	Konversiya elektronlarınn esaplanǵan $h\nu - A$ energiyaları.
36,74	16,34	L_I	36,57
37,37	15,67	L_{II}	37,24
39,63	13,38	L_{III}	39,53
48,85	3,99	M_I	48,92
49,10	3,68	M_{II}	49,23
49,66	3,17	M_{III}	49,74
51,90	0,93	N_I	51,98

XXIX keste de keltirilgen materialdı qarap shıǵıw qaysı atomnırn - dáslepki yamasa aqırǵı atomnırn γ -nurların shıǵaratuǵınlıǵı máselesin sheshiwge múmkinshilik beredi. Qarap atırılǵan $RaB \rightarrow RaC$ radioaktivlik processı β -ıdıraw processı bolıp tabıladı. Bunday jaǵdayda $Z = 82$ zaryadlıq sanına iye element zaryadlıq sanı $Z = 83$ bolǵan elementke ótedi. Demek, $Z = 83$ bolǵan elementtın energiya qáddileri paydalanılatuǵın bolsaq, onda (2)-qatnas orınlanadı. Bunnan γ -nurlarınn aqırǵı RaC elementinın shıǵaratuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Eksperimentallıq maǵlıwmatlardı bunnan keyingi tallaw barlıq belgili bolǵan jaǵdaylarda α - hám β -ıdırawlarda payda bolǵan γ -nurlarınn ıdırawdıń saldarınan alınǵan yadro tárepinen shıǵarılatuǵınlıǵın kórsetedi.

Yadro bir emes, al jiyilikleri hár qıylı ν_i shamaları teń bolǵan bir neshe γ -nurların shıǵara aladı. (2)-teńlikke sáykes, bunday sızıqlardıń hár qaysısına óziniń konversiya elektronlarınn gruppası sáykes keledi. γ -nurlarınn jiyilikleri ádette konversiya elektronlarınn tezlikleri boyınsha (2)-teńliktiń tiykarında anıqlanadı. 396-súwrette konversiya elektronlarınn tezliklerin anıqlaw ushın xızmet etetuǵın A.I.Alixanovtın magnitli spektrografı kórsetilgen. Spektrografta kóldeneń magnit maydanınn járdemindegi fokusirovka usılı paydalanıladı (II tom, 217-paragraf). Radioaktiv S preparatı tárepinen shıǵarılatuǵın elektronlardıń traektoriyaları súwret tegisligine perpendikulyar bolǵan magnit maydanınn tásirinde belgili R radiusındaǵı dóńgelektiń doǵaların payda etedi. Bul elektronlar sáykes keliw sxeması boyınsha isleytuǵın C' hám C'' esaplaǵıshlarına kelip túsedi.



396-súwret.
A.I.Alixanovtıń magnitli spektrografı.

Ásbaptıń úlken massaǵa iye bolǵan diywalları esaplaǵıshlardı joqarıda kórsetilgen dóńgeleklerdiń doǵalarınan basqa traektoriyalar boyınsha uship keletuǵın bólekshelerden qorǵaydı. Sáykes keliwler sxeması tosınnan bolatuǵın signallardan qorǵaydı. Magnit maydanınıń berilgen H kernewliginde esaplaǵıshlarǵa tezlikleri belgili v bolǵan elektronlar ǵana kelip túsedi. H kernewligin ózgerter otırıp hár qıylı tezliklerge iye bolǵan elektronlardı izbe-iz registraciyalawǵa boladı.

D.V.Skobelcın Qompton qubılısın tebiw elektronlarınıń tezlikleri boyınsha γ -nurlarınıń tolqın uzınlıǵın anıqlaw ushın qollandı⁵⁶.

Tebiw elektronlarınıń tezlikleri kóldeneń magnit maydanına jaylastırılǵan Vilson kamerasındaǵı olardıń tezlikleriniń mayısıwı boyınsha anıqlanǵan. Bir qatar jaǵdaylarda γ -tolqınlarınıń tolqın uzınlıqları kristallardaǵı difrakciya boyınsha rentgen nurlarınıń tolqın uzınlıqların ólshegendey etip ólshengen. γ -nurlarınıń tolqın uzınlıqları shama menen $0,2 \cong 0,01$ Å sheklerinde jatadı. γ -spektriniń sıziqları tómengi dárejedegi monoxromatlıq penen ayrıladı.

Yadrosı γ -nurların shıǵaratuǵın atom sıziqlı rentgen spektrin de shıǵaradı. Sebebi, konversiya processiniń júzege keliwiniń sebebinen ol ishki elektronlarınıń birin joǵaltadı hám onıń qabıqlarındaǵı basqa elektronnıń bosǵan orınǵa kóshiwi múmkin.

γ -nurlarınıń shıǵarılıwı yadrolardıń qozǵan halda tura alatuǵınlıǵın kórsetedi. Yadronıń qurılısınıń detallarına itibar bermey-aq, biz γ -nurlarınıń shıǵarılıwında atomnıń elektronlıq qabıqlarınıń jaqtılıq penen rentgen nurların shıǵarǵandaǵı energiyanıń qatnaslarǵa sáykes keletuǵın energiya qatnasların orın alatuǵınlıǵın tastıyıqlay alamız. Eger W menen W' hár qıylı energiyalıq hallardaǵı yadronıń energiyaları bolıp tabılatuǵın bolsa, onda usı hallardıń arasındaǵı ótiwlerde jiyiligi

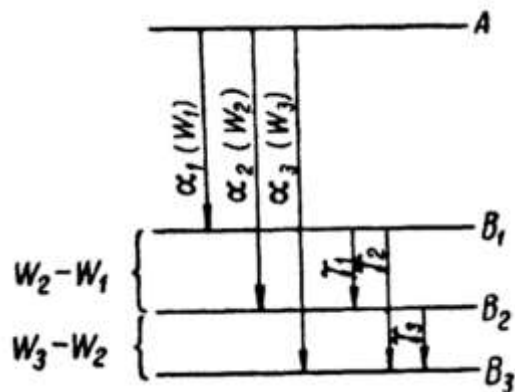
$$\nu = \frac{W'}{h} - \frac{W}{h}$$

shamasına teń bolǵan γ -nurı shıǵarıladı.

⁵⁶ "Elektronı otdachi" sózi qaraqalpaq tiline "tebiw elektronları" túrinde awdarıldı (Awdarıwshılar).

397-súwret.

Dáslepki hám payda bolǵan yadrolardıń
energiya qáddileri.

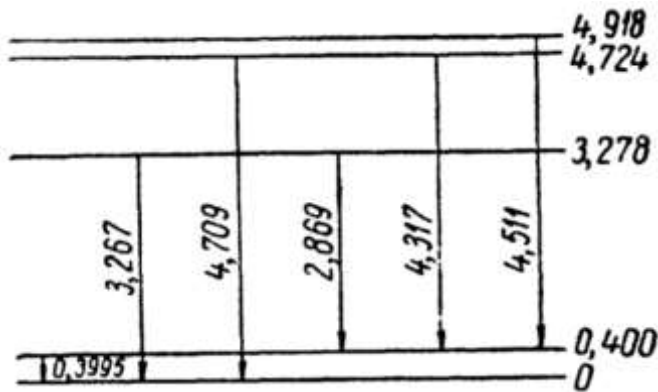


Payda bolǵan yadroda hár qıylı energiya qáddileriniń bolıwı hár qıylı tezliklerge iye bolǵan α -bóleksheleriniń bir neshe gruppalarınıń payda bolıwına sáykes keledi. Baslanǵısh yadro belgili bolǵan A energiya qáddinde jaylasadı (397-súwret) hám energiyaları W_1 , W_2 hám W_3 , tezlikleri α_1 , α_2 hám α_3 gruppalarına kiretuǵın α -bólekshelerin shıǵaradı dep boljayıq. Bunday jaǵdayda payda bolǵan yadro B_1 , B_2 hám B_3 energiya hallarınıń birinde jaylasadı. Onıń energiyalarınıń ayırmaları $W_2 - W_1$ hám $W_3 - W_2$ shamalarına teń boladı. Bul qáddilerdiń arasındaǵı ótiwler γ -nurlarınıń shıǵarılıwına alıp keledi. γ -nurlarınıń jiyilikleri (3)-qatnas penen anıqlanatuǵın bolǵanlıqtan, bunnan payda bolǵan elementtiń γ -nurlarınıń jiyilikleriniń dáslepki elementten shıqqan α -bóleksheleriniń energiyalarınıń ayırması boyınsha esaplanatuǵınlıǵın alamız. Bul juwmaq bar bolǵan empirikalıq materiallar menen tastıyqlanadı. Mısal xızmetin $ThC' \rightarrow ThC''$ ótiwdegi α -ıdıraw xızmet ete aladı. ThC' yadrosı hár qıylı bolǵan bes tezliktegi α -bólekshelerin shıǵaradı. Bul α -bóleksheleriniń energiyalarınıń ayırması boyınsha ThC'' yadrosınıń energiya qáddileriniń sxemasın dúziwge boladı. Alınǵan sxema 398-súwrette kórsetilgen. Bul qáddilerdiń arasında formallıq jaqtan 10 ótiwdiń júzege keliwi múmkin. Haqıyqatında ThC'' yadrosı ushın 398-súwrette strelkalar menen sáwlelendirilgen hár qıylı bolǵan altı jiyilikke iye γ nurları baqlanadı. Álbette, qalǵan ótiwler "qadaǵan" etilgen ótiwler bolıp tabıladı.

XXX kestedede 398-súwrettegi sxema boyınsha esaplanǵan hám baqlawlarda alınǵan joqarıda ayılǵan altı γ -nurlarınıń energiyaları keltirilgen.

$h\nu$ shamasınıń esaplanǵan hám baqlawlarda alınǵan mánisleri bir biri menen baqlawdıń qátelikleriniń sheklerinde sáykes keledi. Yadronıń qozǵan halda turıw waqıtı júdá kishi. Payda bolǵan yadrolar qozǵan hallarǵa iye bolmaytuǵın jaǵdaylarda β -ıdıraw γ -nurlarınıń shıǵarılıwına alıp kelmeydi.

Yadrolardıń qozǵan halınıń bar ekenligi uzaq qashıqlıqlarǵa ushatuǵın α -bólekshelerdiń bar bolıwı menen tastıyqlanadı. Qozǵan haldaǵı yadroǵa joqarı energiya qáddi sáykes keledi, sonlıqtan bul qáddiden potencial barer arqalı ótetuǵın α -bólekshe úlken tezlikke hám usıǵan sáykes uzın júrip ótiw jolına iye boladı (395-súwret). Qozǵan halda turıwdıń kishi waqıtı uzaq aralıqlarǵa óte alatuǵın α -bóleksheleriniń sanınıń kishi ekenligin túsindiredi.



398-súwret.
ThC'' yadrosınıń energiya qáddileriniń
sxeması.

XXX keste.

ThC'' tıń γ -sızıqlarınıń energiyaları

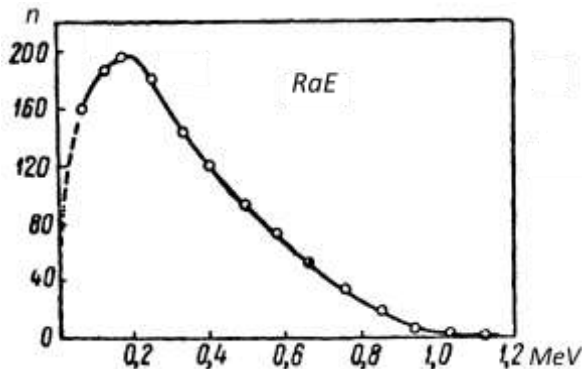
Esaplangan $h\nu$, eV $\times 10^{-5}$	Baqlangán $h\nu$, eV $\times 10^{-5}$
4,518	4,511
4,324	4,317
4,727	4,709
2,878	2,869
3,278	3,267
0,400	0,399

§ 374. Beta-ıdıraw. β -nurların úyreniw radioaktivlik qubılısınıń qıyın mashqalalarınıń biri bolıp tabıladı. γ -nurlarınıń konversiyasınıń saldarınan payda bolatuǵın ekinshi elektronlar yadrodan shıǵarılatuǵın birinshi elektronlarǵa (β -bóleksheleri) qosıladı. Konversiya elektronlarınıń kelip shıǵıwı anıqlangannan keyin ǵana β -bóleksheleriniń ózleri haqqındaǵı isenimli maǵlıwmatlar payda boldı. Hár qıylı radioaktiv zatlar menen ótkerilgen ólshewler β -ıdırawdıń hár bir aktinde yadrodan bir elektronnıń (β -bólekshe) ushıp shıǵatuǵınlıǵın kórsetti.

β -bóleksheleriniń tezlikler boyınsha tarqalıwın úyreniw magnit maydanındaǵı awısıw usılınıń járdeminde ótkerildi. Bul tarqalıwdıń tutas spektr menen táriyiplenetuǵınlıǵı belgili boldı: β -bóleksheler bazı bir joqarǵı shegaradan nolge shekemgi múmkin bolǵan barlıq energiyalarǵa iye boladı eken. 399-súwrette RaE ushın β -bóleksheleriniń energiya boyınsha tarqalıwınıń iymekligi kórsetilgen. Barlıq jaǵdayda tarqalıw bir maksimumǵa iye bir tegis ózgeretuǵın hám úlken energiyalar tárepinde jaqsı seziletuǵın iymeklik penen beriledi.

β -bólekshelerdiń tutas spektrin túsindiriw úlken qıyınshılıqlardı payda etti. α -ıdırawdı úyreniw yadrolardıń úzlikli bolǵan energiya hallarınıń úlken bolmaǵan sanına iye bolatuǵınlıǵın kórsetti. Radioaktivli qatarlarda α - hám β -ıdırawlar gezeklesetuǵın bolǵanlıqtan, β -ıdırawlarda da belgili bolǵan W_1 , W_2 , ... energiyalarınıń bólinip shıǵıwı kerek. Bunan β -bóleksheleriniń de α -bóleksheleri sıyaqlı belgili bolǵan tezliklerdiń bir yamasa sanı úlken bolmaǵan gruppaların payda etiwı kerek. Bul qıyınshılıqtı saplastıratuǵın eń ápiwayı gipoteza mınadan ibarat: dáslep yadrodan barlıq β -bóleksheler maksimalıq energiyanıń shamasına teń birdey energiya menen shıǵarıladı; energiyanıń bir bóliminiń joǵalıwı yadronıń sırtında júzege keletuǵın hám ekinshi gezektegi xarakterge iye processler menen baylanıslı. Biraq, bul gipoteza tuwrınan-tuwrı ótkerilgen kalorimetrlik tájiriybelerinde biykarlanadı. β -radioaktivlik elementtiń preparatı qalıń mıs diywallarǵa iye bolǵan kalorimetrge jaylastırıladı hám belgili waqıt aralıǵındaǵı bólinip shıqqan energiya ólshenedi. Diywallar β -nurların ótkizbeytuǵın bolǵanlıqtan, kalorimetrdiń β -ıdırawda

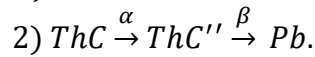
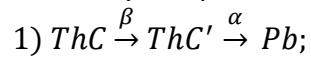
bólinip shıǵatuǵın tolıq energiyanı ólshewi kerek. Eger β -bóleksheleriniń birdey bolǵan baslanǵısh tezlikleriniń bolatuǵınlıǵı haqqındaǵı gipoteza durıs bolsa, onda kalorimetrdiń járdeminde ólshengen energiyanıń mánisi β -bóleksheleriniń maksimallıq energiyasına sáykes keliwi kerek. Haqıyqatında, alınǵan nátiye tutas spektrdegi ortasha energiyaǵa teń bolıp shıqtı.



399-súwret.
 β -bóleksheleriniń energiya boyınsha tarqalıwınıń iymekligi.

β -bólekshelerdiń spektriniń tutas ekenligin túsindiriwdegi qıyınshılıq *izbe-iz radioaktiv aylanıslardaǵı energiyanıń tolıq balansınıń β -bóleksheleriniń energiyasınıń maksimallıq mánisi menen anıqlanatuǵınlıǵına baylanıslı* tereńlesedi. Buni radioaktiv qatarlardaǵı tarmaqlarǵa bóliniwdiń birin qaraw menen kórsetiwge boladı. Mısal sıpatında, *ThC* elementinen baslap baslanatuǵın tarmaqlanıwdı qaraymız.

384-kórsetilgende, aylanıslardıń mınaday eki qatarınıń bolıwı múmkin:



Eki jaǵdayda da qorǵasınıń bir ornıqlı izotopı payda boladı.

Birinshi qatar tómendegidey energiyalardıń bólinip shıǵıwı menen táriyiplenedi (eV lerde):

$ThC \xrightarrow{\beta} ThC'$; β -bólekshelerdiń maksimallıq energiyası	$22,5 \cdot 10^5$
$ThC' \xrightarrow{\alpha} Pb$; α -bóleksheniń energiyası	$89,5 \cdot 10^5$
Jámi	$112,0 \cdot 10^5$

Ekinshi qatar mınaday energiyalar menen táriyiplenedi:

$ThC \xrightarrow{\alpha} ThC''$; α -bólekshelerdiń energiyası	$62,0 \cdot 10^5$
$ThC'' \xrightarrow{\beta} Pb_{(qozǵ)}$; β -bóleksheleriniń maksimallıq energiyası	$89,5 \cdot 10^5$
γ -nurlanıw; γ -fotonnıń energiyası	$32,0 \cdot 10^5$
Jámi	$112,0 \cdot 10^5$

Kórinip turǵanıday, eger β -bóleksheleriniń maksimallıq energiyasın esapqa alǵanda qatarlardıń ekewinde de birdey energiya bólinip shıǵadı. Kórsetilgen faktlerdi bir biri menen salıstırıp, biz mınanı alamız:

a) ayırım β -bóleksheleri hár qıylı energiyalarǵa iye boladı; kalorimetr β -bóleksheleriniń energiyalarınıń ortasha mánisine sáykes keletuǵın energiyanı ólsheydi;

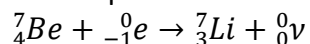
b) eger hár bir β -ıdırawda β -bólekshesiniń maksimallıq energiyasına teń energiya bólinip shıǵadı dep esaplangan jaǵdayda aylanıslardıń hár qıylı qatarlarındaǵı energiyanı durıs balansı alınadı.

...

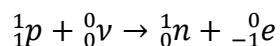
Payda bolǵan qıyınshılıqtan shıǵıw jolı mınaday gipotezada kórsetildi: hár bir β -ıdırawda elektron menen birge yadrodan elektr zaryadına iye emes hám júdá kishi massaǵa iye bolǵan bóleksheniń shıǵıwı kerek. Bul bólekshe *neytrino* atamasına iye boladı. Zaryadınıń joq bolıwına hám kishi massaǵa iye bolıwı sebepli úlken ótiw qásiyetine iye boladı. Bul jaǵday kalorimetrlik ólshewlerdiń nátiyjesin túsindiredi: kalorimetrdiń diywalları neytrinoń irke almaydı hám sonlıqtan kalorimetr tek β -bólekshesiniń energiyasın ǵana ólsheydi. Al ólshegen bul energiyanıń shaması aylanıstırnı tolıq energiyasınan kishi. Yadronıń β -ıdırawında bólinip shıǵatuǵın tolıq energiya eki bólekshe bolǵan elektron (β -bólekshe) menen neytrinoń arasında bólistiriledi. Elektronıń energiyası qansha úlken bolsa, neytrinoń energiyasın sonshama kishi boladı (hám kerisinshe).

Neytrinoń tikkeley baqlaw júdá qıyın. A.I.Leypunskiy β -ıdırawdaǵı yadro tárepinen alınatuǵın tepki boyınsha neytrinoń bar ekenligin tabıwǵa tırıstı. A.I.Alixanov penen A.I.Alixanyanlar neytrinoń tabıw ushın β -ıdırawǵa keri bolǵan *K*-tutıw dep atalatuǵın qubılıstı paydalanıwdı usındı.

K-tutıwda yadro atomnan óziniń *K*-qabıǵınan elektrondı jutadı hám yadro baslanǵısh yadrodan zaryadlıq sanı *Z* ten bir birlikke kishi bolǵan yadro payda boladı. Usınıń menen birge yadrodan neytrino ushıp shıǵadı. Qozǵalıstı muǵdarınıń saqlanıw nızamı boyınsha yadro tebiwdi seziwi kerek. Bunday qubılıs Allen tárepinen



yadrolıq reakciyasın paydalanıwdıń barısında haqıyqatında da tabıldı. Bul teńlikte ${}^0_0\nu$ simvoli arqalı neytrino belgilengen. Allen ${}^7_3\text{Li}$ yadrosınıń haqıyqatında da tebiwge ushıraytuǵınlıǵın baqlaǵan. Eń sońǵı waqıtta neytrino

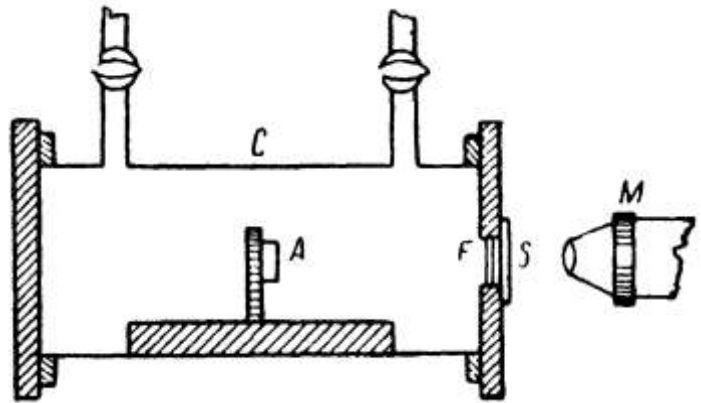


yadrolıq reakciyasında da, yaǵnıy neytrino menen ${}^1_1\text{p}$ protonnıń qosılıwında neytron ${}^1_0\text{n}$ menen ${}^0_{-1}\text{e}$ elektron payda bolatuǵın yadrolıq reakciyada baqlandı (376- hám 377-paragraflardı qarańız).

§ 375. α -bóleksheleriniń urılıwınıń saldarınan yadrolardıń bóliniwi. Radioaktiv emes elementlerdiń yadrolarınıń júdá bekkem bolatuǵınlıǵına baylanıslı olardı oǵada joqarı energiyaǵa iye sırtqı tásirlerde ǵana bóliwge boladı degen juwmaqqa alıp keledi. Bunday sırtqı tásir α -bólekshelerdiń urılıwınıń nátiyjesinde júzege keltiriledi. Tábiyiy-radioaktiv elementler ornıqlı yadrolardı bóliw ushın zárúrli bolǵan energiyanıń dereginiń xızmetin atqarıwı múmkin. Haqıyqatında da yadrolardıń eń dáslepki jasalma túrdegi aylanısı 1919-jılı Rezerford tárepinen α -bólekshelerin bombalawdıń nátiyjesinde ámelge asırıldı. Rezerfordtıń ásbapınıń sxeması 400-súwrette kórsetilgen. *C* kameronıń ishinde *A* tábiyiy-radioaktiv zattıń preparatı jaylasqan. Preparat jılastırıwshı mexanizmnıń ústinde jaylastırılǵan, bul jaǵday onı jılastırıwǵa múmkinshilik beredi. Kameranı hár qıylı gazler menen toltırıwǵa boladı. *F* ekranı *A* preparatı nurlandırǵan α -bólekshelerin juta alatuǵınday dárejede qalıń alyumiyniy folgadan soǵılǵan. *F* ekranınıń arǵı tárepine *S* fluorescenciyanatuǵın ekranı jaylastırılǵan bolıp, oǵan *M* mikroskopınıń járdeminde qaraǵan. Kameranı azot penen toltırǵanda α -bólekshelerin folga arqalı ótip *S* ekranına jete almaytuǵın jaǵdayda da scintillyaciýalar baqlanǵan. Kameranı kislorod yamasa CO_2 menen toltırǵanda scintillyaciýalar baqlanbaǵan. Rezerford azottı α -bóleksheleri menen bombalaǵanda úlken ótiw qábiletligine iye bóleksheler payda boladı hám scintillyaciýalar usı bólekshelerdiń tásirinde júzege kelgen dep boljadı.

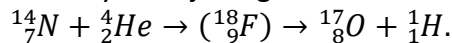
400-súwret.

Rezerfordtıń azot yadroların α -
bóleksheleriniń tásirinde bóleklerge
bóliniw qubılısın baqlaytuǵın
ásbabınıń sxeması.



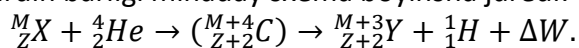
Magnitlik awısıw boyınsha ótkerilgen tájiriye bul bólekshelerdiń protonlar ekenligin kórsetti; olardıń hawadaǵı júriw jolınıń uzınlıǵı 40 sm ge shekem jetedi.

Protonlardıń payda bolıw processı Rezerford tárepinen bılayınsha túsindirildi: tez ushatuǵın α -bóleksheniń azot yadroları menen "mańlay" soqlıǵısıwında α -bólekshes azottıń yadrosınıń ishine kiredi hám zaryadlıq sanı 9 ǵa, al massalıq sanı 18 ge teń (ftordıń ornıqlı emes izotopı) ornıqlı emes yadronı payda etedi. Bul yadro protonǵa hám massalıq sanı 17 ge teń bolǵan kislorodqa ıdıraydı. Barlıq yadrolıq reakciyanı bılayınsha jazıwǵa boladı:

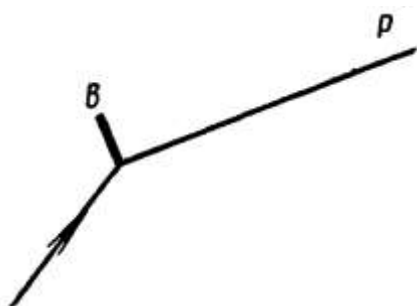


α -bólekshesiniń urılıwınıń saldarınan azot yadrosınıń aylanısı keyinirek Vilson kamerasında túsirilgen fotosúwretler boyınsha tastıyıqlandı. α -bóleksheleriniń izleriniń kóp sanlı fotosúwretlerdiń ishinde α -bóleksheniń jolı "vilka" - "shanışqı") menen tamam bolatuǵın birli-sarań jaǵdaylar da kóringen (401-súwret). Jańa eki iz payda bolǵan: uzın hám jıńışke p izi protonǵa hám qısqa jáne juwan iz B . Bul B izi tepkige ushıraǵan kislorod yadrosı ${}^{17}_8O$ nıń izi bolıp tabıladı. Azottaǵı súwretke túsirilgen shama menen 500 mıń α -bóleksheleriniń izleriniń ishinde vilkalar segiz jaǵdayda tabılǵan. Bunnan, α -bóleksheleriniń azottıń yadroları menen soqlıwısıwında α -bólekshesiniń azottıń yadrosına kiretuǵınday dárejede jaqın soqlıǵısıwınıń júdá siyrek bolatuǵınlıǵı (50 000 soqlıǵısıwdıń birewinde) kelip shıǵadı.

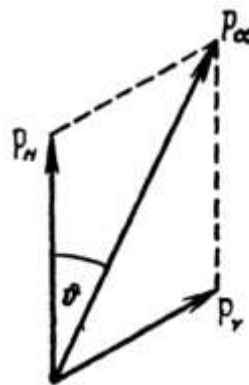
Tap sonday bolǵan reakciyalar bunnan keyin bir qatar elementlerde baqlandı (B, F, Al, Si, S, K h.b.); olardıń barlıǵı mınaday sxema boyınsha júredi:



Bul teńlikte (${}_{Z+2}^{M+4}C$) arqalı aralıqlıq ornıqlı emes yadro hám ΔW arqalı (${}_Z^MX$ hám ${}^4_2He$) reakciyasına shekemgi hám (${}_{Z+2}^{M+3}Y + {}^1_1H$) reakciyasınan keyingi bólekshelerdiń yadronıń ishindegi energiyalarınıń ayırmasına teń. ΔW shamasınıń oń belgisi reakciyada energiyanıń bólinip shıǵatuǵınlıǵın, al teris belgisi jutılatuǵınlıǵın ańǵartadı. Bunday reakciyalardı (α, p) túrinde ańǵartıladı. Bul qawsırmanıń ishindegi birinshi belgi bombalawshı bóleksheni (α -bólekshesin), al ekinshi belgi shıǵarılǵan bóleksheni (proton) ańǵartadı.



401-súwret. α -bóleksheleriniń jolınıń "vilka" tárizli iziniń payda bolıwı.



402-súwret. Yadronıń bóleklerge bóliniwinde qozǵalıǵ muǵdarınıń momentiniń saqlanıw nızamınıń orınlanıwı.

α -bóleksheleri menen bombalaǵanda yadrolardıń bóleklerge bóliniwinde energiyanıń saqlanıw nızamı da, qozǵalıǵ muǵdarınıń saqlanıw nızamı da orınlanadı. α -bólekshesiniń, protonnıń hám payda bolǵan yadronıń kinetikalıq energiyların sáykes W_α , W_H hám W_p arqalı belgileyik. Bunday jaǵdayda energiyanıń saqlanıw nızamı boyınsha

$$W_\alpha + \Delta W = W_H + W_Y \quad (1)$$

teńligi orınlı boladı. Tap sonday etip, α -bólekshesiniń, protonnıń hám payda bolǵan yadronıń qozǵalıǵ muǵdarların p_α , p_H hám p_Y arqalı belgileybiz. Qozǵalıǵ muǵdarınıń saqlanıw nızamı boyınsha

$$p_\alpha = p_H + p_Y \quad (2)$$

teńligin jazamız.

ϑ arqalı α -bólekshesiniń qozǵalıǵınıń baǵıtı menen shıǵarılgan protonnıń qozǵalıǵ muǵdarınıń baǵıtı arasındaqı múyeshti belgilep (402-súwret), (2)-teńliktiń tiykarında mınaǵan iye bolamız:

$$p_Y^2 = p_\alpha^2 + p_H^2 - 2p_\alpha p_H \cos \vartheta. \quad (3)$$

Kinetikalıq energiya menen qozǵalıǵ muǵdarınıń arasında $W = p^2/2M$ túrindegi qatnastır bar ekenligin esapqa alıp, (1)-teńlikti bılayınsha jazamız:

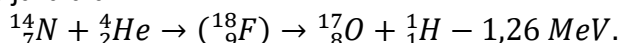
$$\frac{p_\alpha^2}{2M_\alpha} + \Delta W = \frac{p_H^2}{2M_H} + \frac{p_Y^2}{2M_Y}. \quad (4)$$

(3)- hám (4)-teńliklerden p_Y^2 shamasın qısqartıp,

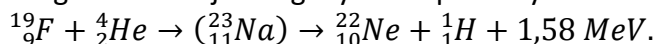
$$\Delta W = W_\alpha \left(\frac{W_\alpha}{W_Y} - 1 \right) + W_H \left(\frac{W_H}{W_Y} + 1 \right) - \frac{p_\alpha p_H}{M_Y} \cos \vartheta \quad (5)$$

teńligine iye bolamız.

α -bólekshesiniń kinetikalıq energiyası menen qozǵalıǵ muǵdarı olardıń juwırıp ótiw jolınıń uzınlıǵı boyınsha anıqlanadı; massalardıń qatnasları $\frac{W_\alpha}{W_Y}$ menen $\frac{W_H}{W_Y}$ ler belgili shamalar bolıp tabıladı. ϑ múyeshiniń shamasın "vilka" nıń fotosúwreti boyınsha ólsheuge boladı. Onıń ushın bólekshelerdiń izleriniń eki fotografiyalıq kameranıń járdeminde stereoskopiyalıq súwretin alıwǵa tuwrı keledi. Sebebi hár bir súwret izlerdiń fotoplastinkanıń tegisligindegi proekciyasın ǵana beredi. Solay etip, (5)-teńlik yadrolıq aylanıslardıń energiyasın tabıwǵa múmkinshilik beredi. Kórsetilgen aylanısta azottıń yadrosı 1,26 MeV energiyanı jutadı. Sonlıqtan, bul reakciyanıń sxemasın biz mına túrde jaza alamız:



Energiyanıń bólinip shıǵıwı menen júretuǵın yadrolıq reakciyalar da bar. Mısalı:



Yadroliq reaksiyanıń energiyasın basqa usıl menen de, atap aytqanda yadrolardıń massalarınń defekti boyınsha esaplawğa boladı (368-paragraf). Yadroliq reaksiyağa shekem bir massası M_X bolğan ${}^M_ZX$ yadroğa hám massası M_α ğa teń α bólekshesine iye bolğan edik; reaksiyadan keyin massası M_Y bolğan ${}^{M+3}_{Z+2}Y$ yadroğa hám massası M_p shamasına teń protonğa iye bolamız. Massalardıń tolıq defekti mınağan teń:

$$\Delta m = (M_X + M_\alpha) - (M_Y + M_p).$$

$\Delta W = \Delta m \cdot c^2$ qatnasına sáykes Δm shaması reaksiyanıń energiyasınıń ólshemi bolıp tabıladı. Azottıń bóleklerge bóliniwi ushın biz massalardıń tómendegidey mánislerin alamız:

Dáslepki bóleksheler	Payda bolğan bóleksheler
${}^4_2\text{He}; M_\alpha = 4,00386$	${}^1_1\text{H}; M_H = 1,00813$
${}^{14}_7\text{N}; M_N = 14,00753$	${}^{17}_8\text{O}; M_O = 17,00450$
$M_N + M_\alpha = 18,01139$	$M_O + M_H = 18,01263.$

Bul jaǵday ushın massalar defekti mınaday shamağa teń:

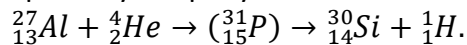
$$\Delta m = 18,01139 - 18,01263 = -0,00124.$$

Demek, payda bolğan bólekshelerdiń massası dáslepki bólekshelerdiń massasınan atomlıq salmaqtıń 0,00124 birligine úlken eken. Massanıń bul "úlkeyiwi" $\Delta W = \Delta m \cdot c^2$ energiyasınıń jutılıwınıń sebebinen júzege keldi. 368-paragrafta aytııp ótilgenindey, atomlıq salmaqtıń bir birligi 931,8 MeV energiyağa ekvivalent. Bunnan

$$\Delta W = -0,00124 \cdot 931,8 \text{ MeV} = -1,16 \text{ MeV}$$

shamasına iye bolamız. Bul shama qátelerdiń sheginde (5)-teńlik boyınsha alınğan shamağa sáykes keledi. Tap usınday sáykeslik basqa da yadroliq reaksiyalarda da orın alğan. Bul sáykes keliwler energiya menen massanıń arasındaqı $\Delta W = \Delta m \cdot c^2$ qatnasın tikkeley tekserip kóriwge múmkinshilik beredi. Usınıń menen birge olar yadroliq aylanıslardıń elementar aktlarındaǵı energiya menen qozǵalı muǵdarınıń saqlanıw nızamlarınıń orınlanatuǵınlıǵın tastıyıqlaydı.

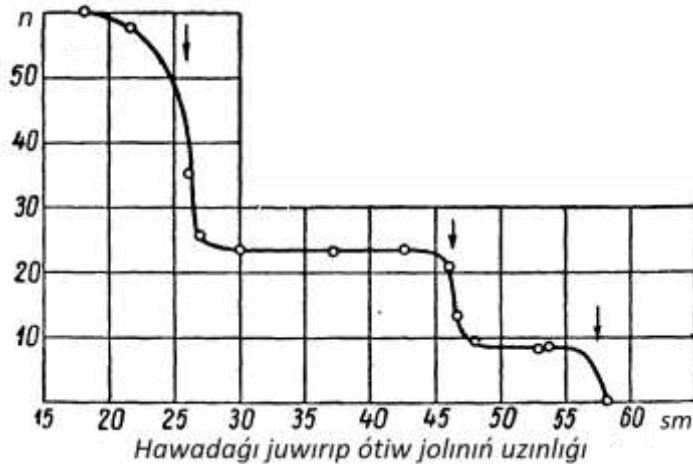
Eń aqırında jáne bir yadroliq reaksiyanı qaraymız:



Bul reaksiyalarda hár qıylı tezliklerge iye protonlar payda boladı eken. 403-súwrette berilgen R kesindisine teń hám onnan uzın bolğan jollardı ótken protonlardıń sanı berilgen. Kórinip turǵanıday, protonlardıń úsh gruppası bar. Olardıń birewi ushın juwırıp ótiw jolınıń uzınlıǵı 28 sm, al qalğan ekewinde - shama menen 47 sm hám 58 sm. Bul gruppalar bombalawshı α -bóleksheleriniń belgili bolğan tezliginde alınğan. α -bóleksheleriniń basqa tezliklerinde tap sol alyuminiy protonlardıń basqa gruppaların beredi. Alyuminiyden shıqqan protonlardıń juwırıp ótiw jolınıń eń úlken mánisi 66 sm ge jetedi. Belgili tezliklerge, usıǵan sáykes belgili energiyalarğa iye protonlardıń usınday gruppalarınń bolıwı payda bolğan yadronıń (biz qarap atırǵan jaǵdayda ${}^{30}_{14}\text{Si}$ diń) energiyasınıń hár qıylı qáddilerge iye bolatuǵınlıǵın kórsetedi. Eger shıǵarılǵan proton eń úlken energiyağa iye bolsa, onda payda bolğan yadro normal halda boladı; kishi tezlik penen qozǵalatuǵın protonlar shıqqan jaǵdayda yadro qozǵan halında qaladı. Yadronıń qozǵan halınan normal halǵa ótiwiniń nátiyjesinde γ -nurlarınıń shıǵarılıwı júzege keledi.

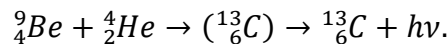
α -bóleksheniń soqlıǵıwshı yadronıń ishine kiriwiniń itimallıǵı onıń (α -bóleksheniń) tezliginen ğárezli. Eger α -bólekshesiniń energiyası bombalanıwshı yadronıń energiyasınıń qáddileriniń birine sáykes kelse, onda α -bóleksheniń yadronıń ishine kiriwiniń itimallıǵı kúshli ósedi: biz rezonanslıq bóleklerge bóliniw menen is alıp baramız. Alyuminiyde rezonanslıq bóleklerge bóliniw α -bóleksheleriniń 4,0; 4,49; 4,86 i 5,25 MeV shamalarına teń energiyalarında júzege keledi. α -bólekshesiniń kerek bolğan energiyasın saylap alıw júdá qıyın. Sonlıqtan, rezonanslıq bóleklerge bóliw α -bóleksheler menen jetkilikli dárejede qalıń bolğan nishanalardı bombalaǵanda baqlanadı. Tormozlanıwdıń saldarınan usınday nishananıń ishindegi α -bóleksheleri hár qıylı tezliklerge iye boladı hám nishananıń qanday da bir qatlamında α -bóleksheniń tezligi rezonanslıq

bóleklerge bóliwge jetkilikli boladı. Qalınlıqtıń shaması ózgergende protonlardıń shıǵıwı dáwirli túrde ózgeredi.



403-súwret.
Alyuminiy yadrosınıń bóleklerge bóliniwinde payda bolatuǵın protonlardıń juwırıp ótiw jolınıń uzınlıqları.

§ 376. Neytronlar. α -bóleksheleri menen bombalawdıń nátiyjesindegi yadrolardıń jasalma aylanısları elementar bólekshelerdiń jańa túri - neytronnıń ashılıwına alıp keldi. Neytron massası protonnıń massasına jaqın bolǵan neytral bólekshe bolıp tabıladı. Neytronnıń ashılıw tariyxı mınadan ibarat: 1930-jılı Bote berilliydi (${}^9_4\text{Be}$) α -bóleksheleri menen bombalaǵında júdá úlken ótiw qábiletligine iye bolǵan bóleksheniń payda bolatuǵınlıǵın taptı. Usı jaǵdayǵa baylanıslı mınaday boljaw usınıldı: payda bolǵan bólekshe γ -nuri bolıp tabıladı, α -bólekshesi ${}^9_4\text{Be}$ yadrosına birikkende uglerodtıń kúshli qozǵan ${}^{13}_6\text{C}$ izotopı payda boladı hám bul izotop normal halǵa ótkende úlken $h\nu$ energiyaǵa iye fotondı shıǵaradı. Solay etip, qubılıstı mınaday sxema boyınsha ótedi dep boljandı:



Bul jerde (${}^{13}_6\text{C}$) arqalı ${}^{13}_6\text{C}$ uglerod izotopınıń qozǵan halı belgilengen. Payda bolǵan nurlardıń qorǵasındaǵı jutılıwın ólshew hár bir fotonnıń shama menen 7 MeV energiyaǵa iye bolıwınıń kerek ekenligin kórsetti. 1932-jılı Iren Kyuri hám F.Jolio-Kyuriler eger alınǵan berilliy nurların parafin plastinkası arqalı ótiwge májbúrlese, onda olardıń ionlastırıwshı tásiriniń kúshli ósetuǵınlıǵın taptı. I.Kyuri menen F.Jolio-Kyurilerdiń tájiriyesiniń sxeması 404-súwrette kórsetilgen. Bul súwrette A - α -bóleksheleriniń deregi bolıp tabılatuǵın radioaktiv preparat jaǵılǵan metall disk; B - berilliy plastinkası, J - awızı juqa a folgası menen jabılǵan aynaǵa iye ionizaciyaq kamera. Berilliy tárepinen shıǵarılǵan úlken ótiwshilik qábiletligine iye bolǵan nurlanıw J kamerasındaǵı gazdıń júdá ázzi ionizaciyasın boldıradı. Eger kameranıń aldına parafinniń C qatlamın jaylastırsa, onda J kamerasındaǵı ionizaciya kúshli ósedı. Bul effektı bılayınsha túsındirdi: berilliy nurları parafinnen protonlardı ushırıp shıǵaradı hám olar kúshli ionlastırıwshı tásir jasaydı.

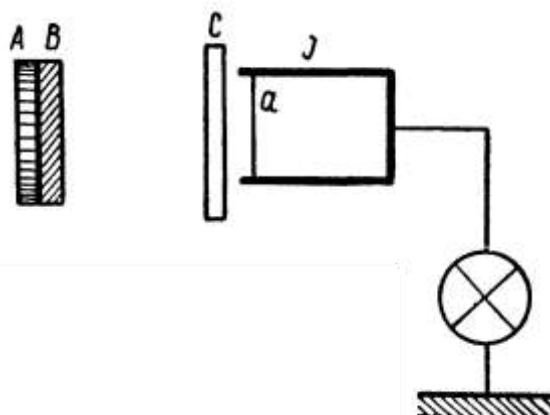
Qattı parafin ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ maylı qatardıń sheklik uglevodorodlarınń joqarǵı aǵzaları) qolem birliginde vodorod atomlarınıń kóp sanına iye. Sonlıqtan onnan protonlardı ushırıp shıǵarıwdıń itimallıǵı basqa qanday da bir zattan protonlardı ushırıp shıǵarıwdıń itimallıǵınan ádewir úlken.

Parafinnen julıp alınǵan proton ushın onıń hawadaǵı juwırıp ótiw jolınıń uzınlıǵı shama menen 40 sm bolıp shıqqan. Bul shama shama menen 5 MeV energiyaǵa sáykes keledi. Eger protondı γ -fotonınıń serpimli urılıwınıń saldarınan tezlenedi dep esaplasa, onda bul γ -fotonga shama menen 55 MeV energiyasın beriw kerek. Bul shama jutılıw boyınsha alınǵan shamadan álewir úlken. 55 MeV shaması massalar defektin anıqlaw tiykarında ótkerilgen esaplawlarǵa da sáykes kelmeydi. ${}^9_4\text{Be}$, ${}^4_2\text{He}$ hám ${}^{13}_6\text{C}$ tiń atomlıq salmaqların hám bombalawshı α -bóleksheleriniń energiyasın bilip, (1)-sxema boyınsha ótetuǵın processke sáykes keletuǵın massanıń defektiniń

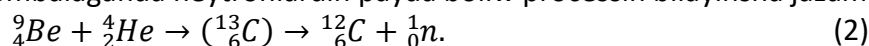
atomlıq salmaqtıń 0,01665 birligine, al onıń 15,5 MeV energiyaǵa ekvivalent ekenligi kelip shıǵadı. Solay etip, γ -fotonlarınń energiyasınıń 15,5 MeV ten úlken bolıwı múmkin emes.

404-súwret.

I.Kyuri menen F.Jolio-Kyuridiń tájiriyesiniń sxeması.



Keyinirek berilliydiń nurlanıwınıń basqa da yadrolardı tezlete alatuǵınlıǵı belgili boldı. Bunday jaǵdayda, eger bul nurlar γ -fotonlardan turatuǵın bolsa, onda bul fotonlarǵa tepki yadrolarınıń tábiyatı menen ǵárezli bolǵan energiyanı beriw kerek boladı. Mısalı, azottıń tepki yadroları payda bolǵan jaǵdayda, fotonlardıń 990 MeV shamasındaǵı energiyaǵa iye bolıwı kerek. CHedvik eger α -bólekshelerdiń bombalawınıń saldarınan berilliy tárepinen shıǵaralatuǵın nurlanıwdıń massası protonnıń massasına jaqın bolǵan neytral bólekshelerden turadı dep esaplasa, onda bul qıyınshılıqlardıń barlıǵınıń saplastırılatuǵınlıǵın kórsetti. Bizler bul bólekshelerdiń neytronlar atamasın alǵanın kórsetip óttik hám onı ${}_0^1n$ simvolınıń járdeminde belgileymiz Sebebi onıń zaryadlıq sanı nolge teń ($Z = 0$) hám massalıq sanı birge teń ($M = 1$). Bunday jaǵdayda berilliydi α -bóleksheleri menen bombalaǵanda neytronlardıń payda bolıw processin bılayınsha jazamız:



Elektr zaryadına iye bolmaǵanlıqtan, neytronlar atomlar jáne molekulalardıń qasınan ushıp ótkende, olar menen ázzi tásirlesedi hám bul jaǵday olardıń gazlerdi ázzi ionlastırıw hám uzaq aralıqlarǵa óte alıw qábiletligine iye ekenligin túsindiredi. Neytronlardıń atomlardıń yadroları menen soqlıǵısıwı energiya menen qozǵalıw muǵdarlarınń saqlanıw nızamları húkim súretuǵın serpimli sharlardıń soqlıǵısıwında xarakterge iye boladı. Bunnan, eger v arqalı neytronnıń baslanǵısh tezligi belgilengen bolsa, onda tepki yadrosınıń tezligi v' (oraylıq urılıwda) mınaǵan teń:

$$v' = \frac{2M_n}{M_n + M} v. \quad (3)$$

Bul teńlikte M_n - neytronnıń massası, M - tepki yadrosınıń massası.

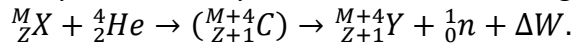
Neytronlardıń tezlikleri birdey bolǵan jaǵdayda massaları M_1 hám M_2 bolǵan hár qıylı bolǵan eki tepki yadrolar ushın v'_1 penen v'_2 ler (3)-teńlik boyınsha mınaday qatnastı payda etedi

$$\frac{v'_1}{v'_2} = \frac{M_n + M_2}{M_n + M_1}.$$

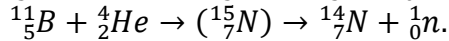
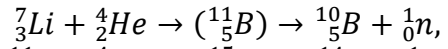
Bul qatnastan neytronnıń massası M_n di tabadı. Yadrolardıń hár qıylı juplarınıń neytronnıń massasınıń bir M_n mánisin beriw CHedviktiń berilliydiń nurlanıwınıń fotonlardan emes, al "salmaqlıraq" bolǵan bólekshelerden turatuǵınlıǵı haqqındaǵı gipotezasınıń durıs ekenligin tastıyıqlaydı. Házirgi waqıtlardaǵı maǵlıwmatlar boyınsha neytronnıń massası $M_n = 1,00893$ ke teń. Onıń shaması protonnıń massası $M_p = 1,00813$ ten azmaz úlken⁵⁷.

⁵⁷ Házirgi waqıtları neytronnıń massası ushın $M_n = 1,008\,664\,915\,95(49)$ mánisi, al protonnıń massası ushın $M_p = 1,007\,276\,466\,621(53)$ shaması qabıl etilgen (Awdarıwshılar).

(2)-reakciya yadrolardan neytronlardıń shıǵıwına alıp keletuǵın birden-bir reakciya emes. α -bóleksheleriniń bombalawınıń nátiyjesinde neytronlar payda bolatuǵın kóp sanlı jaǵdaylar bar. Bul reakciyalardı $[(\alpha, n)$ -reakciyalar] mınaday sxema menen kórsetiwge boladı:



Mısal sıpatında mınaday reakciyalardı kórsetemiz:

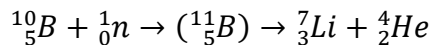


Kóp jaǵdaylarda neytron dı shıǵarǵannan keyin payda bolǵan yadro qozǵan halda turadı. Bunday jaǵdaylarda γ -nurlar shıǵarıladı. (α, n) -reakciyalarınń nátiyjesinde payda bolǵan neytronlar úlken energiyalarǵa iye boladı; bir qatar jaǵdaylarda orın úzliksiz spektrge iye boladı. Mısalı, beriliyden shıqqan neytronlar 13,7; 12,0; 7,6; 6,2 hám 4,6 MeV shamasındaǵı energiyalarǵa iye boladı.

Házirgi waqıtları erkin neytronnıń ornıqlı emes ekenligi belgili: ol protonǵa, elektronǵa hám neytrinoǵa ıdıraydı. Onıń jasaw waqıtı shama menen 30 minutqa teń⁵⁸.

Elektr zaryadına iye bolmaǵanlıqtan, neytron oń zaryadlanǵan yadro tárepinen iyterilmeydi hám oǵan jaqınlay hám onıń ishine ańsat kire aladı. Bunday jaǵdayda neytron yadrolıq aylanıstı júzege keltiredi. Yadrolıq aylanıslardıń tek tez qozǵalatuǵın neytronlardıń tásirinde ǵana emes, al tezlikleri atomlardıń jıllılıq qozǵalıslarınıń tezliklerine teń bolǵan áste qozǵalatuǵın neytronlardıń tásirinde de júretuǵınlıǵı kórsetildi. Neytronlardı vodorod bar qanday da bir zat (parafin, suw) arqalı ótkeriw arqalı ásteletiwge boladı. Proton menen hár bir serpimli soqlıǵısıwında, neytron oǵan óziniń energiyasınıń ádewir úlken bólimin beredi hám energiyasın atomlardıń jıllılıq qozǵalıslarınıń energiyasınıń shamasına teńleskenshe shekem tómendetedi.

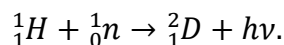
"Jıllılıq" tezliklerindeki neytronlar (n, α) tipindeki, yaǵnıy dáslepki yadro tárepinen neytron dı tutıp alıwdıń saldarınan α -bóleksheleri shıǵarılatuǵın reakciyalarǵa alıp keledi; usınday reakciyanıń mısalı sıpatında



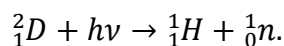
reakciyası xızmet ete aladı. Nátiyjede litiy dıń stabilli izotopı (${}_3^7Li$) hám geliy payda boladı. Bul reakciya neytronlardı tabıw ushın paydalanıladı. Ionizaciyalıq kameranıń diywallarına quramında bor bolǵan birikpe jaǵıladı. Bordıń neytron dı tutıp alıwı α -bólekshesiniń shıǵarılıwına alıp keledi. Al payda bolǵan α -bólekshesi onıń ionlastırıwshı tásiri boyınsha tabıladı.

(n, α) tipindeki reakciyalar menen bir qatarda neytron yadroǵa birigip, dáslepki yadronıń salmaǵı úlken bolǵan stabilli izotopınıń payda bolıwına da alıp keledi. Reakciya γ -nurlarınıń shıǵarılıwı menen júredi hám (n, γ) simvolı menen belgilenedi. Mısalı, neytron dı qosıp alıw jolı menen jeńil stabilli ${}_3^6Li$ izotopınan awır stabilli ${}_3^7Li$ izotopın alıwǵa boladı.

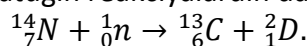
(n, γ) tipindeki reakciyaǵa ekinshi mısal sıpatında vodorodtıń awır izotopınıń (deytronnıń) payda bolıw reakciyasın keltiremiz⁵⁹:



Bul reakciya deytron dı eki elementar bólekshede bolǵan proton menen neytronnan turadı dep qarawdıń múmkin ekenligin kórsetedi. Bul kóz-qaras deytronnıń ótkir γ -nurlanıwdıń tásirinde kerı baǵıttaǵı ıdıraw processtıń orın alatuǵınlıǵı menen tastıyıqlanadı. Bunday process yadrolıq fotoeffekt qubılıs dep ataladı hám



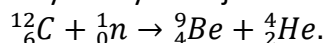
Dáslepki yadro deytron dı shıǵaratuǵın reakciyalardıń da júriwi múmkin. Mısalı:



⁵⁸ Neytronnıń jasaw waqıtı $880,0 \pm 0,9$ sek (shama menen 14,7 min). Ol protonǵa, elektronǵa hám elektronlıq antineytrinoǵa ıdıraydı (Awdarıwshılar).

⁵⁹ Deytron (deyton) vodorodtıń massalıq sanı $A = 2$ ge teń izotopı bolǵan deyteriy dıń yadrosı bolıp tabıladı (Awdarıwshılar).

Bir qatar jaǵdaylarda neytron payda bolatuǵın reakciyalarǵa keri bolǵan reakciyalar da baqlanadı. Mısalı, (2)- beriliydi α -bóleksheleri menen bombalawdıń nátiyjesinde neytron payda bolatuǵın reakciyaǵa keri bolǵan reakciya bılayınsha jazıladı:



Aqırında, yadronıń neytrondı tutıw itimallıǵınıń neytronlardıń tezliginen kúshli ǵárezlikke iye ekenligin atap ótemiz; neytronlardıń tezliginiń belgili bolǵan mánisinde tutıw rezonanslıq xarakterge iye boladı (405-súwret).

Neytrondı tutıwdıń effektivlik kesimi σ haqqındaǵı túsinikti kirgizemiz. Meyli, qanday da bir zattıń tegis-parallel qatlamınıń maydanınıń bir birligine normal baǵıtta waqıttıń bir birliginde n_0 dana neytron kelip túsetuǵın bolsın.

Biz qarap atırǵan zattıń kóleminiń bir birligindegi atomlardıń sanın N_0 arqalı belgileybiz. Bunday jaǵdayda kese-kesiminiń maydanı ΔS , al uzınlıǵı dx bolǵan parallelopipedtiń kóleminde (406-súwret)

$$N = N_0 \Delta S dx$$

dana atom boladı.

Waqıttıń bir birliginde qatlamnıń dx qalınlıǵındaǵı atomlar menen soqlıǵısatuǵın hám usı soqlıǵısıwlardıń nátiyjesinde tutıp alıwǵa ushıraytuǵın neytronlardıń sanın

$$-dn = \sigma n N = \sigma n N_0 \Delta S dx$$

shamasına teń dep esaplawǵa boladı. Bul teńlikte n - waqıt birliginde ΔS betine kelip túsetuǵın neytronlardıń sanı; eger biz ΔS shamasın maydannıń bir birligine teń dep alsaq, onda $n = n_0$ teńligi orınlı boladı hám sońǵı teńlik mınaday túrge enedi:

$$-dn_0 = \sigma n_0 N_0 dx$$

yamasa

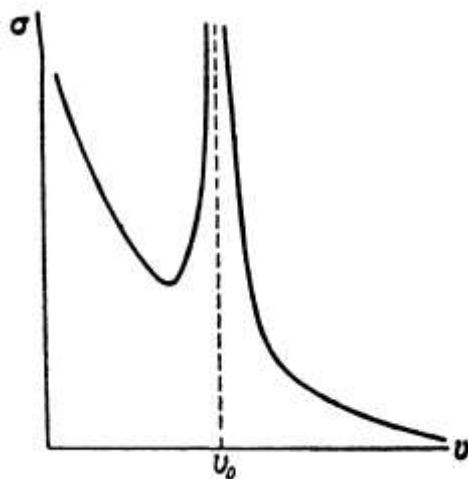
$$\frac{dn_0}{n_0} = -\sigma N_0 dx.$$

Bul teńlikti x qalınlıǵınıń sheklerinde integrallap, mınaǵan iye bolamız:

$$\ln n_{0x} = -\sigma N_0 x + C. \quad (4)$$

Sońǵı teńlikte n_{0x} - qalınlıǵı x shamasına teń qatlamdı tutıwsız ótken neytronlardıń sanı, C - integrallaw turaqlısı. Bul turaqlınıń shaması $x = 0$ bolǵan jaǵdayda $n_{0x} = n_0$ teńliginiń orınlanatuǵınlıǵına baylanıslı tabamız. Bunnan $C = \ln n_0$ mánisin alamız.

(4)-teńlik boyınsha anıqlanǵan tutıwdıń effektivlik kesimleri σ nıń shamaları neytronlardıń tezliklerine kúshli ǵárezli bolıp shıǵadı. Hár qanday zatlar ushın bul ǵárezlik hár qıylı. 405-súwrette σ nıń v dan dál ǵárezligi keltirilgen. Bazı bir $v = v_0$ mániste iymeklik ótkir maksimumdı beredi - bunday jaǵdayda tutıw rezonanslıq xarakterge iye boladı. Kishi tezlikler oblastında σ juwıq túrde $1/v$ ǵa proporcional. "Jılılıq" tezliklerindegi neytronlar ushın tutıwdıń effektivlik kesimi σ ádette 10^{-24} sm^2 shamasına teń. Biraq, bazı bir zatlar ushın σ nıń mánisi ádewir úlken: mısalı, bor ushın $\sigma = 5,4 \cdot 10^{-22} \text{ sm}^2$; kadmiy ushın $\sigma = 3 \cdot 10^{-21} \text{ sm}^2$.



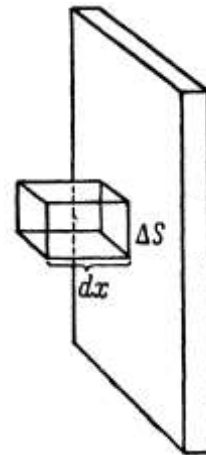
405-súwret.

Neytronlardıń rezonanslıq tutıp alınıwı.

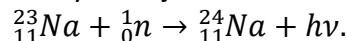
Serpimli shashırawdıń effektivlik kesimi ádette rezonanstan tıstaǵı tutıwdıń effektivlik kesiminen bir tártipke úlken⁶⁰. Effektivlik kesimniń birligi sıpatında 10^{-24} sm² shamasına teń 1 barn qabıl etilgen. Mısalı, (α, p) reakciyasına qatnası boyınsha azot yadrosınıń effektivlik kesimi 1 barnǵa, al joqarıda esletilip ótilgen bor menen kadmiydiń "jıllılıq" neytronların tutıp alıw boyınsha effektivlik kesimleri sıykes $5,4 \cdot 10^2$ hám $3 \cdot 10^3$ barnǵa teń.

406-súwret.

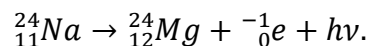
Neytronlardı tutıwdıń effektivlik kesimlerin esaplawǵa.



§ 377. Jasalma radioaktivlik. Pozitronlar. Hár qıylı zatlardı α -bóleksheleri menen bombalaw boyınsha tájiriybelerdi ótkergen I.Kyuri hám F.Jolio-Kyuriler bir qansha jaǵdaylarda α -bóleksheleriniń deregi alıp ketilgennen soń da bombalangán zattıń nurlanıwǵa iye bolatuǵınlıǵın taptı. Bul nurlanıwdıń intensivliginiń tábiyiy radioaktiv elementlerdeǵıdey, eksponenciallıq nızam boyınsha hálsireytuǵınlıǵı tabıldı. Bunnan *tábiyiy jaǵdaylarda ornıqlı radioaktiv emes izotoplar túrinde ushırasatuǵın elementlerdi α -bóleksheleri menen bombalaǵanda sol elementlerdiń radioaktiv izotopları payda boladı* degen boljaw júzege keldi. Keyinirek neytronlardıń tásirinde júretuǵın yadrolıq aylanıslarda da usınday radioaktiv izotoplardıń payda bolatuǵınlıǵı anıqlandı. Mısalı, natriydiń tábiyiy stabilli izotopı bolǵan $^{23}_{11}\text{Na}$ di bombalaǵanda $^{24}_{11}\text{Na}$ radioaktiv izotopı payda boladı; reakciya (n, γ) sxeması boyınsha júredi:

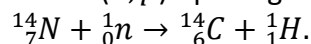


$^{24}_{11}\text{Na}$ izotopı yarım ıdıraw dáwiri $\tau = 14,8$ saat bolǵan β -radioaktiv izotop bolıp tabıladı. $^{24}_{11}\text{Na}$ yadrosınan β -bólekshe shıqqanda, awısıw qaǵıydasına sıykes usı $^{24}_{11}\text{Na}$ yadrosına magniydiń $^{24}_{12}\text{Mg}$ yadrosı payda boladı:

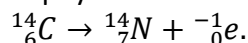


Magniydiń $^{24}_{12}\text{Mg}$ izotopı onıń stabilli izotoplarınıń qatarına kiredi (tábıyatta magniy úsh izotop túrinde ushırasadı: $^{24}_{12}\text{Mg}$, $^{25}_{12}\text{Mg}$ hám $^{26}_{12}\text{Mg}$).

Radioaktiv izotoplardıń payda bolıwına (n, p) tipindegi reakciyalar da alıp keledi. Mısalı:



$^{14}_6\text{C}$ izotopı da yarım ıdıraw dáwiriniń shaması 5000 jıldan úlken β -radioaktivlik qásiyetke iye. Usı β -ıdırawdıń saldarınan azot qaytadan payda boladı:

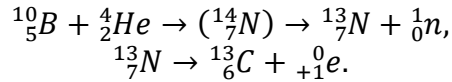


Sońǵı reakciya mınaday ózgesheligi boyınsha qızıqlı: azottıń yadrosı menen neytron dáslepki bóleksheler bolıp tabıladı; reakciyanıń nátiyjesinde azottıń yadrosı qaytadan payda boldı, al neytronniń ornına proton menen elektron payda boldı. Solay etip, neytron proton menen elektrongá ıdıraǵanday jaǵdayǵa iye boldıq. Usınday reakciyanıń júzege keliwine qaramastan neytrondı proton menen elektronnan turadı dep esaplawǵa bolmaydı. Barlıq process bir elementar bólekshelerdiń basqalarına *óz-ara aylanıw* xarakterine iye boladı.

Jasalma radioaktiv izotoplar Mendeleevtiń dáwirlik sistemasınıń aqırındaǵı tábiyiy radioaktiv elementlerdiń arasında belgili bolmaǵan ıdırawdıń jáne bir túrin beredi. Atap aytqanda, olar

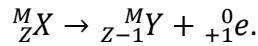
⁶⁰ YAǵnıy $10^1 = 10$ ese úlken (Awdarıwshılar).

massası elektronniń massasına iye oń zaryadlangan bólekshelerdi shıgara aladı; bul bólekshelerdiń zaryadı san mánisi boyınsha elektronniń zaryadına teń, tek belgisi boyınsha ayrıladi. Bunday bólekshe *pozitron* atamasına iye boldı. Pozitronlardıń bar ekenligi birinshi ret kosmoslıq nurlardı úyreniwdiń barısında tabıldı hám biz onı keyinirek qaraymız. Házir bolsa pozitronlıq radioaktivliktiń payda bolıwına alıp keletuǵın bir qatar radioaktiv reakciyalardı kórsetemiz. Buǵan misal xızmetin (α, n) reakciyalarınıń qatarı atqaradı. Bordıń $^{10}_5B$ izotopın α -bóleksheler menen bombalaǵanda β^+ -radioaktivlikke iye bolǵan azottıń radioaktiv izotopı payda boladı. Process mınaday sxema boyınsha júredi:



Bul ańlatpada ${}^0_{+1}e$ arqalı pozitron belgilengen. Azottıń radioaktiv izotopınıń yarım ıdıraw dáwiri 11 min.

$^{13}_7N$ yadrosınan pozitrondı shıǵarǵanda uglerodtıń $^{13}_6C$ izotopı, yaǵnıy zaryadlıq sanı birge kem hám massalıq sanı tap sonday bolǵan element payda boladı (yaǵnıy Mendeleevtiń dáwirlik sistemasında bir orın alda turǵan element). Álbette, β^+ -radioaktivlik penen baylanıslı bolǵan barlıq jaǵdaylarda usınday awısıw qaǵıydası orın aladı. Sonlıqtan, biz pozitronlıq ıdıraw ushın mınaday ulıwmalıq sxemanı jaza alamız:



Pozitronniń ashılıwı biziń elementar bóleksheler haqqındaǵı bilimlerimizde úlken orındı iyeledi. Pozitronlar ashılmastan burın teris hám oń elementar zaryadları $|e|$ ni alıp júriwshilerdiń arasında úlken ayırma bar dep esaplandı. Teris $-e$ zaryadın alıp júriwshiler júdá kishi massaǵa iye bolǵan elektronlar bolıp tabıladi. Oń elementar zaryad $+e$ ni alıp júriwshiler sıpatında tek salıstırmalı awır hám eń ápiwayı atom bolǵan vodorodtıń yadrosı bolıp tabılatuǵın proton belgili edi (${}^1_1H$). Endi elektrongá uqsas bolǵan, tek zaryadınıń belgisi boyınsha ayrılatuǵın pozitronlardıń bar ekenligi ayqın boldı. Biraq, usınday jaǵdayǵa qaramastan, elektronlar menen pozitronlardıń arasında úlken ayırma bar. Elektronlar salıstırmalı ańsat tabılatuǵın elementar bólekshelerdiń tipin beredi: barlıq atomlardıń sırtqı qabıqları elektronlardan turadı, elektronlar metallarda "erkin" halda jasaydı, vakuumlıq trubkada elektronlardıń aǵısların alıwǵa boladı. Pozitronlar bolsa salıstırmalı siyrek ushırasadı, usınıń nátiyjesinde olar elektronlardan ádewir keyin ashıldı; olar tek kosmoslıq nurlar menen baylanıslı bolǵan qubılıslarda hám jasalma túrde alıńǵan stabilli bolmaǵan izotoplardıń β^+ -radioaktivliginde baqlanadı.

Pozitronlardıń qásiyetlerin bunnan bilay úyreniw *elektron-pozitron jubınıń fotonǵa aylanatuǵınlıǵın hám kerisinshe fotonnan elektron-pozitron jubınıń payda bolatuǵınlıǵın kórsetti*.

Eger, misalı, azottıń radioaktiv $^{13}_7N$ izotopınan shıǵatuǵın pozitronlardıń aǵısın metall plastinkaǵa qaray baǵıtlasa, onda ótkir γ -nurlarınıń shıǵarılauınlıǵı belgili boldı. Bul γ -nurları pozitronlardıń metaldaǵı erkin elektronlar menen birigiwiniń saldarınan payda boladı. Bunday jaǵdayda pozitronlar menen elektronlar joǵaladı hám úlken energiyaǵa iye bolǵan fotonlarǵa aylanadı⁶¹. Anderson tárepinen ashılǵan bul qubılıs shet el ádebiyatında bólekshelerdiń "annigilyaciyası" (joq bolıwı) atamasına iye boldı. Haqıyqatında, bul jaǵdayda "annigilyaciya" processı materiyanıń joǵalıwın ańǵartpaydı, al onıń bir túriniń (elektronlar, pozitronlar) ekinshi túrine (fotonlar) aylanıwına alıp kelinedi ...

Elektron-pozitron jubınıń fotonlarǵa aylanıwı energiya menen qozǵalıslı muǵdarınıń saqlanıw nızamlarınıń orınlanıwı menen júredi. m_0 massasına sáykes keletuǵın energiya m_0c^2 qa teń. Tap

⁶¹ Tómengi energiyalarda elektron menen pozitronniń annigilyaciyası $e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$ túrinde jazıladi hám bunday jaǵdayda joqarı energiyalarǵa iye bolǵan eki fotonniń payda bolıwı júzege keledi. Joqarı energiyalarda bolsa basqa bólekshelerdiń, misalı, B -mezonlar yamasa W - hám Z - bozonlarınıń payda bolıwı múmkin (Awdarıwshılar).

usınday energiya pozitronnıń massasına da sáykes keledi. Sonlıqtan pozitron-elektron jubınıń fotonlarǵa aylanıwındaǵı energıyanıń saqlanıw nızamı mınaday teńlikke alıp keledi:

$$W_f = 2m_0c^2 + W_{k1} + W_{k2}. \quad (1)$$

Bul teńlikte W_f - payda bolǵan fotonlardıń energıyası hám W_{k1} menen W_{k2} ler elektron menen pozitronnıń soqlıǵısıwǵa shekemgi kinetikalıq energıyaları. *Qozǵalıw muǵdarınıń saqlanıw nızamı pozitron-elektron jubınıń aylanıwında eki fotonnıń payda bolıwın talap etedi.* Haqıyqatında da, eger biz pozitron menen elektronnıń massalarınıń orayına jaylastırılǵan koordinatalar sistemasın alatuǵın bolsaq, onda bul koordinatalar sistemasına salıstırılǵandaǵı olardıń qozǵalıw muǵdarlarınıń qosındısı nolge teń. Demek, payda bolǵan fotonlardıń qozǵalıw muǵdarlarınıń qosındısınıń da nolge teń bolıwı kerek. Eger qarama-qarsı baǵıtlarda tarqalatuǵın birdey bolǵan eki $h\nu$ foton payda bolsa bul talap orınlanadı. Eger elektron menen pozitronnıń kinetikalıq energıyaları W_{k1} menen W_{k2} ler kishi bolsa, onda (1)-teńlik boyınsha payda bolǵan eki fotonnıń hár biriniń energıyası mınaǵan teń boladı:

$$h\nu = m_0c^2.$$

Megaelektronvoltlerde ańǵartılǵan m_0c^2 shamasınıń mánisi 0,511 MeV ke teń. Solay etip, elektron-pozitron jubınıń aylanısında hár qaysısınıń minimallıq energıyası 0,511 MeV ke teń bolǵan eki fotonnıń payda bolıwı kerek. Bul juwmaqlardıń durısıǵı tájiriybelerde tastıyıqlandı. L.A.Arcimovich, A.I.Alixanov hám A.I.Alixanyanlar pozitronlardıń deregin eki esaplaǵıstırın arasına jaylastırdı. Pozitronlardıń deregi onnan shıqqan barlıq pozitronlardı jutatuǵın, biraq ótkir γ -nurların sezilerliktey irkpeytuǵın qalınlıqqa iye qorǵasın qabıq penen qaplangan. Bul qabıqtıń ishinde pozitronlar elektronlar menen birikken hám bul fotonlardıń payda bolıwına alıp kelgen. Esaplaǵıshlar barlıq waqıtta bir birine sáykes keletuǵın signallardı registraciyalanǵan, bul pozitron-elektron jubınıń hár bir aylanıs aktında qarama-qarsı táreplerge qaray tarqalatuǵın eki fotonnıń payda bolatuǵınlıǵınıń dálili bolıp tabıladı. γ -nurlarınıń ótkirlik dárejesin anıqlaw, payda bolǵan fotonlardıń haqıyqatında da shama menen 0,5 MeV ke teń energıyaǵa iye ekenligin kórsetti.



407-súwret.

Elektron-pozitron jubınıń izleri.

Belgili dárejedeǵı keri process te bar. Bul process qanday da bir yadronıń maydanında fotonnan pozitron-elektron jubınıń payda bolatuǵınlıǵınan ibarat. Bul jaǵdayda qozǵalıw muǵdarınıń saqlanıw nızamı aylanıwshı fotonlardıń sanına hesh qanday talaptı qoymaydı: bir foton pozitron-elektron jubın payda etedi. (1)-teńlikke sáykes, pozitron-elektron jubına aylanatın fotonnıń minimallıq energıyası $h\nu = 2m_0c^2 = 1,02$ MeV shamasına teń. *Fotonnıń pozitron-elektron jubına aylanıwı tiykarınan awır yadrolardıń maydanında júzege keledi.* Eger aylanatuǵın fotonnıń energıyası 1,02 MeV ten úlken bolsa, onda artıqmash energıya pozitron menen elektronnıń kinetikalıq energıyası ushın jumsaladı. Juplardıń payda bolıwı ThC'' shıǵarǵan ótkir γ -nurları menen qorǵasındı jaqtılandırǵanda baqlandı. Payda bolǵan bólekshelerdiń fotosúwretleri Vilson kamerasında túsirildi; olar magnit maydanınıń tásirinde qarama-qarsı táreplerge qaray awısadı hám bir noqattan shıǵatuǵın birdey bolǵan eki doǵanıń túrine iye boladı (407-súwret). Bul γ -nurlanıwınıń esabınan pozitron-elektron jubınıń payda bolatuǵınlıǵınıń tuwrıdan-tuwrı tastıyıqlanıwı bolıp tabıladı.

ThC'' shıǵarǵan fotonlardıń energıyası 2,6 MeV. Joqarıda ayılǵanlar boyınsha juptıń payda bolıwı ushın shama menen 1 MeV energıya kerek bolǵanlıqtan, qalǵan 1,6 MeV energıya payda

bolğan bólekshelerge kinetikalıq energiya beriw ushın jumsaladı. Haqıyqatında da, pozitron menen elektronnıń tezliklerin tuwrıdan-tuwrı ólsheuler olardıń kinetikalıq energiyalarınń qosındısınıń 1,6 MeV ke teń ekenligin kórsetti.

§ 378. Jasalma túrde tezletilgen bólekshelerdiń tásirinde júretuǵın yadrolıq aylanıslar. Usı waqıtlarǵa shekem biz tábiyiy radioaktivliktiń nátiyjesinde payda bolatuǵın α -bóleksheleriniń yamasa α -bóleksheleri menen sáykes zatlardı bombalaǵanda payda bolatuǵın neytronlardıń tásirinde júzege keletuǵın yadrolıq aylanıslardı qaradıq. Solay etip, aqırǵı esapta, elementlerdiń jasalma aylanısı tábiyiy radioaktivliktiń esabınan payda etildi. Álbette mınaday qızıǵıwshılıq payda boladı: bólekshelerdi soqlıǵısqanda yadrolıq aylanıslardı payda ete alatuǵınday energiyalarǵa shekem bólekshelerdi jasalma jollar menen tezletkende ne bolar edi? Onıń ushın júdá joqarı energiyalar talap etiletuǵın bolǵanlıqtan (millionlaǵan elektronvolt), usınday energiyalarǵa shekem bólekshelerdi tezletiwdiń texnikalıq usılları ádewir úlken qıynshılıqlardı payda etedi.

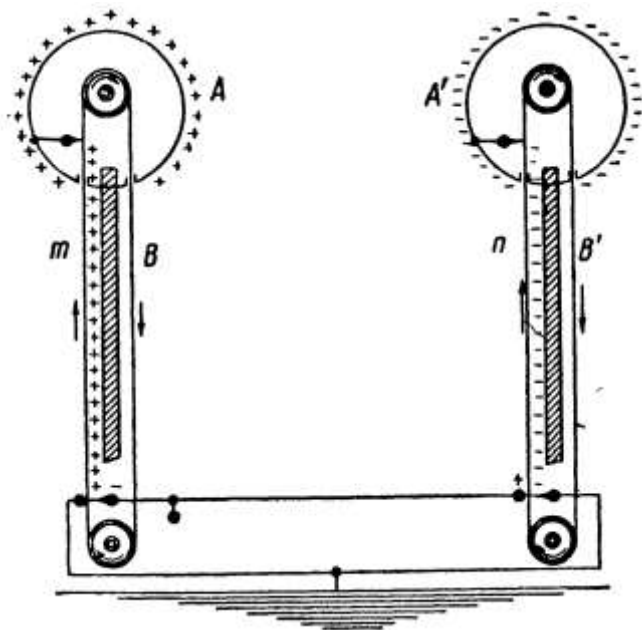
Bólekshelerdi tezletiwdiń jasalma usılları bóleklerge bóliniwdi tek geliydiń yadroları (α -bóleksheleriniń) járdeminde ǵana emes, al tez qozǵalatuǵın protonlar menen deytronlardıń járdeminde de júzege keltiriwge múmkinshilik beredi. Tariyxıy jaqtan jasalma túrde tezletilgen protonlardıń bombalawında júrgizilgen litiydiń bóleklerge bóliniwi reakciyası birinshi reakciya bolıp tabıladı. Bunday reakciya 1930-jılı Rezerfordtıń xızmetkerleri Kokroft penen Uolton tárepinen tabıladı. Olar protonlardı (ádettegi vodorodtıń yadroların) tezletiw ushın 600 000 V ke shekemgi potencıalları ayırmasın payda ete alatuǵın transformatorı bar dúzilisten paydalandı. Házirgi waqıtlardaǵı fizika bólekshelerdi onlaǵan hátte júzlegen mın elektronvolt energiyaǵa shekem tezlete alatuǵın bir qatar usıllardan paydalanadı⁶².

Usı usıllardı qaraymız.

1. Van-Graaftıń elektrostatikalıq generatorı. Bul generatordıń dúzilisi ishi bos ótkiziwshi shardı oǵan sırttan zaryadlardı beriw jolı menen joqarı potencıalǵa shekem zaryadlawǵa tiykarlanǵan (II tom, 133-paragraf). Generatordıń dúzilisiniń sxeması 408-súwrette kórsetilgen. Bul súwrette A menen A' - biyik izolyaciyalaytuǵın B hám B' kolonnalarınń joqarısında ornastırılǵan ishi bos metall sferalar. Zaryadlar sferalarǵa eki sheksiz aylanıwshı m hám n lentalarınń járdeminde beriledi. Lentalar izolyaciyalıq materialdan soǵılǵan (jipek, rezina aralastırılǵan gezleme) hám toqtı tuwrılaytuǵın kenetronı bar transformatorıń járdeminde 10—20 kV ke shekem zaryadlanadı. Bir sfera oń, al ekinshisi teris zaryadlanadı.

Usınday generator 7 mln voltke shekemgi potencıalları ayırmasın alıwǵa múmkinshilik beredi.

⁶² Házirgi waqıtlardaǵı zaryadlanǵan bólekshelerge eń úlken energiya bere alatuǵın dúzilis (kollayder) Úlken adronlıq kollayder (ingliz tilinde Large Hadron Collider, qısqasha LHC) bolıp tabıladı. Ol bir birine qarama-qarsı baǵıtta qozǵalatuǵın protonlardı hám awır ionlardı (qorǵasınıń ionların) tezletiw hám olardıń urılıwınıń saldarınan payda bolǵan bólekshelerdi izertlew ushın arnalǵan. Kollayder Jeneva qalasınıń qasında SHveycariya menen Franciyanıń shegarasında jaylasqan CERN de (Yadrolıq izertlewlerdiń Evropa keńesi) qurılǵan Úlken adronlıq kollayder dúnyadaǵı eń úlken eksperimentallıq dúzilis bolıp tabıladı. Onıń qurılısı menen onda ótkerilgen izertlewlerge 100 den aslam ellerdiń 10 mırnan aslam injenerleri hám alımları qatnasqan. Úlken adronlıq kollayder bólekshelerdi 6,5 TeV = $6,5 \cdot 10^{12}$ eV energiyaǵa shekem tezlete aladı (Awdarıwshılar).



408-súwret.
Van-Graaf generatorınıń dúzilisińiń
sxeması.

2. Ciklotron. Birinshi ret Lourens tárepinen 1932-jılı ámelge asırılğan bul ásbaptırń ideyası mınadan ibarat: zaryadlangan bólekshe vakuumda tegis cilindrdiń eki A hám B yarımLARınıń arasıdaǵı sańlaqta payda etilgen elektr maydanınıń tásirinde tezletiledi (409-a súwret). Cilindrdiń ultanına perpendikulyar bolǵan magnit maydanı bóleksheniń qozǵalı baǵıtın ózǵertedi hám bóleksheni cilindrdiń sańlaqlarınıń arasıda jáne ushıp ótiwge májbúrleydi. Usı momentke shekem sáykes radiotexnikalıq generatordıń járdeminde yarım cilindrlerdiń ekewiniń de zaryadlarınıń belgileri ózǵertiledi. Sonlıqtan sańlaqtaǵı maydan bóleksheni jáne de tezletedi. Usınıń nátiyjesinde bólekshe spiral tárizli traektoriya boyınsha qozǵaladı (409-súwrette punktir menen kórsetilgen) hám yarım cilindrlerdiń arasıdaǵı sańlaq arqalı hár ótkende jańadan tezleniw aladı. Eger yarım cilindrlerdiń arasıda payda etilgen potenciallar ayırmasınıń shaması V_0 ge teń, al bólekshe n ret aylanatuǵın bolsa, onda ol aqırǵı esapta $V = 2nV_0$ potenciallar ayırmasına sáykes keletuǵınday tezleniwge iye boladı. Solay etip, salıstırmalı úlken bolmaǵan V_0 potenciallar ayırmasınan paydalanıp hám bóleksheni kóp sanlı n aylanıwǵa májbúrlep, bólekshelerdi energiyanıń júdá úlken mánislerine shekem tezletiwge boladı.

Ciklotrondı júzege keltiriwdiń múmkinshiligi bóleksheniń spiral tárizli traektoriya boyınsha bir aylanıwı ushın ketetuǵın waqıt t nıń tezlikten ǵárezli emes ekenligine tiykarlangan. Bul cilindrdiń eki yarımındaǵı zaryadlardıń belgisin turaqlı bolǵan $\omega = 2\pi/t$ cikllıq jiyilik penen ózǵertiwge múmkinshilik beredi. Haqıyqatında da, eger magnit maydanınıń kernewligi H qa teń bolsa, cilindrdiń bir yarımınıń ishindegi bólekshe basıp ótetuǵın yarım dóńgelektiń radiusı R mınaǵan teń:

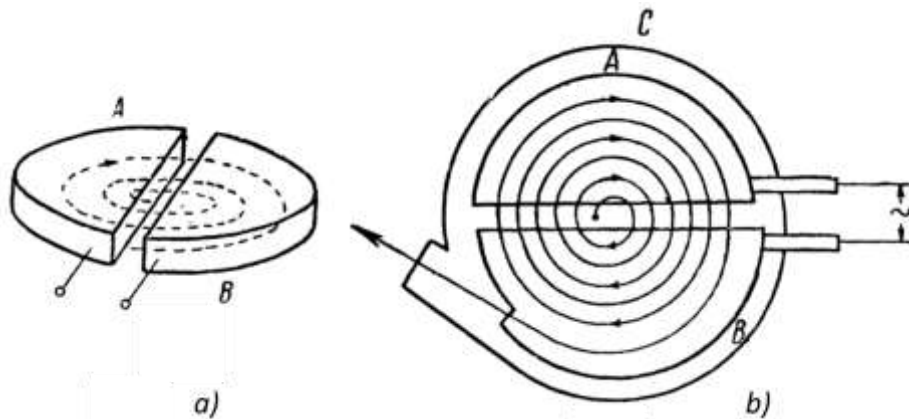
$$R = \frac{cv}{\frac{e}{m}H}.$$

Bul teńlikte v - bóleksheniń tezligi (yarım cilindrlerdiń biriniń ishindegi qozǵalı waqtında turaqlı), al $\frac{e}{m}$ - onıń zaryadınıń massasına qatnası. Bunnan yarım cilindrlerdiń birindegi qozǵalı waqtı t ushın

$$t' = \frac{\pi R}{v} = \frac{\pi c}{\frac{e}{m}H}$$

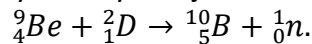
mánisin, yaǵnıy v tezlikten ǵárezsiz bolǵan turaqlı mánisti alamız. Demek $t = 2t'$ waqtı da tezlikten ǵárezli emes.

409-6 súwrette ciklotronnıń ústinen qaraǵandaǵı sxeması berilgen. *A* hám *B* yarım cilindrleriniń ekewi de *C* qutısınıń ishinde jaylastırılǵan hám bul qutıdan hawa sorıp alınǵan. Qutı elektromagnittiń polyuslarınıń arasında jaylastırılǵan. Úlken ciklotronlarda elektromagnittiń polyuslarınıń diametri 1,5 m ge jetedi hám onnan da úlken boladı⁶³. Ionlardıń deregi sıpatında ciklotronnıń orayında janıp turǵan hám ionlardıń ushıp shıǵıwı ushın sańlaqqa iye metall diywalları bar úlken bolmaǵan duga xızmet etedi. Duga janıp turǵan oblastqa úzliksiz gaz aǵadı hám bul gaz ionlardıń payda bolıwı ushın xızmet etedi. Ciklotronnıń bul oblastınan basqa bólimine ótetuǵın gazdı nasoslardıń járdeminde sorıp aladı.



409-súwret. Ciklotronnıń dúzilisiniń sxeması.

Ciklotronnıń járdeminde protonlardı, deutronlardı hám geliydiń yadroların tezletiwge boladı. Onıń járdeminde sáykes elementti bombalap neytronlardı alıwǵa boladı. Mısalı, berilliydi deutronlar menen bombalap minaday reakciyanıń járdeminde neytronlardı alıw múmkin:



Usınday usıl menen tábiyiy radioaktiv zattıń bir neshe kilogrammınıń járdeminde alınatuǵınday shamadaǵı neytronlardıń aǵsın alıwǵa boladı.

Tezletiletuǵın bólekshelerdiń massalarınıń tezlikten ǵárezli ekenligin esapqa almawǵa bolatuǵın jaǵdaylarda ǵana ciklotronda bólekshelerdi tezletiw ushın zárúrli bolǵan (1)-shártti paydalanıwǵa boladı. Salıstırmalıq teoriyasına sáykes úlken tezliklerde massanıń tezlikten ǵárezligi seziletuǵın jaǵdaylarda (1)-shárt buzıladı hám bólekshelerdi ciklotronda bunnan bılay tezletiwdiń múmkinshiligi joǵaladı. Bul jaǵday ciklotronda bóleksheshe beriletuǵın energiyanıń shamasın shekleydi. Jeńil bóleksheler ushın shek erterek payda boladı, sebebi olar úlken tezliklerge tez jetisedi. Deytronlar ushın ciklotronda jetiw múmkin bolǵan energiyanıń shaması 100 MeV ke jetedi. Sovet fizigi V.I.Veksler tárepinen bólekshelerdi bunnan bılay tezletiwdiń múmkinshiligi birinshi ret kórsetildi. Onıń ushın ástelik penen (adiabatalıq) generatordıń jiyiligin yamasa magnit maydanınıń kernewligin ózgeritiw kerek. Usınday jollar menen bólekshelerdi tezletiliwin ámelge asıratuǵın ásbaplardı *sinxrotron* hám *sinxrociklotron* dep ataydı. SSSR Ilimler Akademiyasınıń yadrolıq problemalar laboratoriyasında bólekshelerdi 680 MeV energiyaǵa shekem tezletetuǵın sinxrociklotron islep tur hám házirgi waqıtları bólekshelerge 10 mlrd eV energiya beretuǵın dúzilis júzege keltirilgen.

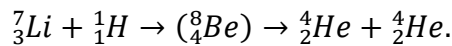
3. Betatron. Bul ásbap elektronlardı tezletiw ushın xızmet etedi. Massası kishi bolǵanlıqtan elektronlardı ciklotronda joqarı energiyalarǵa shekem tezletiwge bolmaydı. Betatronda elektronlardıń tezleniwi magnit maydanınıń ózgeriwiniń nátiyjesinde payda bolǵan quyn tárizli elektr maydanınıń tásirinde júzege keledi. Bul usıldıń teoriyası sovet fizigi YA.P.Terleckiy

⁶³ 1932-jılı soǵılǵan ciklotronnıń diametri 69 sm ge teń. Ol bólekshelerdi 5 MeV energiyaǵa shekem tezlete aldı (Awdarıwshılar).

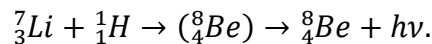
tárepinen islep shıǵıldı. Betatronı tezleniwdiń múmkinshiligi massanıń tezlikten ǵárezligi menen sheklenbeydi. Betatron elektromagnittiń polyuslarınń arasında jaylasqan toroidalıq vakuumlıq ıdis bolıp tabıladı. Magnit maydanınıń kernewligi H tırn waqıtqa baylanıslı ózgerisinde kernewligi dóńgelek sıızqlar bolǵan quyn tárizli elektr maydanı payda boladı (II-tom, 242-paragraf) hám bul elektr maydanı elektronlardı tezletedi. Magnit maydanınıń ózgerisi qısqa waqıttırn ishindegi (shama menen 10^{-3} sek) onıń úlkeyiwinen ibarat. Usı waqıttırn ishinde elektron dóńgelek orbita boylap júz mıńday aylanıs jasap úlgeredi hám nátiyjede onıń energiyası 100 MeV ke jetedi. Usınday tez ushatuǵın elektronlar qattı nishanaǵa barıp urılǵanda ótkir γ -nurları shıǵadı. Bul nurlardı yadrolardı bóleklerge bóliw ushın paydalanıwǵa boladı.

Joqarıda kórsetilgen bólekshelerdi tezletiwdiń usılları júdá kóp sanlı yadrolıq reakciyalardı júzege keltiriwge hám hár qıylı elementlerdiń usınday reakciyalarda alınǵan izotoplarınń qásiyetlerin úyreniwge múmkinshilik berdi.

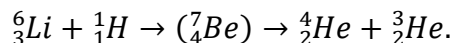
Mısal sıpatında, litiydi úlken tezliktegi protonlar menen bombalaǵanda júretuǵın reakciyanı qaraymız. Tábiyiy litiy eki ${}^7_3\text{Li}$ hám ${}^6_3\text{Li}$ izotoplarınan turadı. ${}^7_3\text{Li}$ ni bombalaǵanda mınaday reakciya alınadı:



Kórinip turǵanıday, aqırǵı esapta geliydiń eki yadrosı (α -bólekshe) payda boladı. Biraq, ${}^8_4\text{Be}$ yadrosı barlıq waqıtta eki α -bólekshege ıdıramaydı. Ayırım jaǵdaylarda ol energiyası 17,2 MeV bolǵan γ -fotondı shıǵarıw menen ornıqlı halǵa ótedi. Bunday jaǵdayda reakciya mınaday túrge iye boladı:

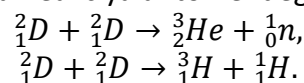


Ekinshi izotop ${}^6_3\text{Li}$ tez qozǵalatuǵın protonlar menen bombalaǵanda mınaday reakciyaǵa alıp keledi:

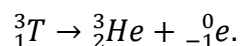


Demek, bul jaǵdayda da geliydiń eki yadrosı payda boladı. Biraq, olardıń birewiniń atomlıq salmaǵı ádettegeıdey 4 ke, al, ekinshisiniń atomlıq salmaǵı 3 ke teń. Usınday usıldıń járdeminde geliydiń stabilli bolǵan jeńil izotopı ${}^3_2\text{He}$ ashıldı. Biraq, jer sharında tábiyiy sharayatlarda bul izotop júdá az muǵdarda ushırasadı: ol ádettegi atmosferalıq geliyge shama menen 0,0001 % muǵdarda aralasqan.

Tez ushatuǵın deytronlar hár qıylı yadrolıq reakciyalardı júzege keltiredi. Bul reakciyalar jiyi túrde (d, p) yamasa (d, n) tipinde, yaǵnıy protonnıń yamasa neytronnıń payda bolıwı menen júredi. Sonıń menen birge reakciyalardıń eki tipi de bir elementti bombalawdıń nátiyjesinde júzege keliwi múmkin. Mısal sıpatında deytronlardı deytronlar menen bombalaǵanda payda bolatuǵın reakciyalardı keltiremiz; bul reakciyalar tómendegi sxemalardıń birewi boyınsha júredi:



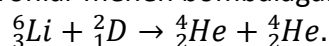
Birinshi jaǵdayda geliydiń jeńil ${}^3_2\text{He}$ izotopı qaytadan alınadı. Al ekinshi reakciyada bolsa atomlıq salmaǵı 3 ke teń vodorodtıń awır izotopı ${}^3_1\text{H}$ payda boladı; vodorodtıń bul izotopı tritiy (${}^3_1\text{T}$) atamasına iye boldı. Tritiy radioaktiv, ol β bólekshesin (elektron) shıǵaradı hám geliydiń ${}^3_2\text{He}$ izotopına aylanadı:



Tritiydiń yarım ıdıraw dáwiriniń shaması 12 jıldıń átirapında; onıń massasınıń dál mánisi 3,01700 shamasına teń.

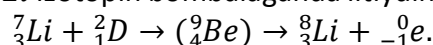
${}^2_1\text{D} + {}^2_1\text{D} \rightarrow {}^3_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$ reakciyası neytronlardı alıw ushın paydalanıladı.

Litiydiń jeńil izotopı ${}^6_3\text{Li}$ nı deytronlar menen bombalaǵanda eki α -bólekshe payda boladı:

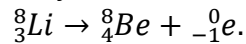


Bul reakciyada júdá úlken bolǵan 22,7 MeV energiya bólinip shıǵadı.

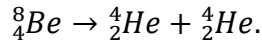
Deytronlar menen litiydiń ${}^7_3\text{Li}$ izotopın bombalaǵanda litiydiń radioaktiv izotopı payda boladı:



Litiy ${}^8_3\text{Li}$ radioaktiv qásiyetke iye hám onıń yarım ıdıraw waqıtınıń shaması dım kishi, 0,88 sek qa teń; onıń ıdırawı minaday sxema boyınsha júredi:

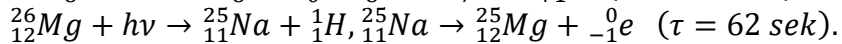
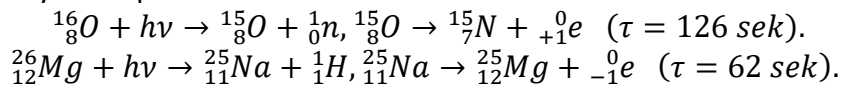


${}^8_4\text{Be}$ izotopı da ornıqlı emes hám júdá qısqa waqıttıń ishinde ($\sim 10^{-21}$ sek) eki α -bólekshege ıdıraydı:



Solay etip, ${}^8_3\text{Li}$ ni deytronlar menen bombalaǵanda yadrolıq aylanıslardıń kóp dizbegi júzege keledi eken.

Betatronlardıń járdeminde alınatuǵın ótkir γ -nurlar payda etetuǵın reakciyalarda toqtaymız. Biz joqarıda (376-paragrafta) γ -fotonlarınıń tásirinde deytronlardıń protonlar menen neytronlarǵa ıdırawına alıp keletuǵın "yadrolıq fotoeffektıń" orın alatuǵınlıǵın kórsetken edik. Jáne de bir neshe yadrolıq fotoeffektı kórsetemiz. Mısalı:



Birinshi jaǵdayda foton yadrodan neytrondı, al ekinshi jaǵdayda protondı ushırıp shıǵaradı; eki jaǵdayda da jasaw dáwiri kishi bolǵan stabilli emes yadrolar payda boladı.

Jasalma túrde júretuǵın yadrolıq aylanıslardıń járdeminde sol waqıtlarǵa shekem Mendeleevtiń dáwirlik sistemasında bolmaǵan elementlerdi alıwdıń sáti tusti. Olar qatar sanı $Z = 43, 61, 85$ hám 87 bolǵan elementler bolıp tabıladı. Olardıń úshewiniń bar ekenligi Mendeleev tárepinen ekamarganec, ekaıod, ekaceziy elementleri sıpatında bolıp ayılǵan edi (350-paragrafqa qarańız). Olardıń barlıǵı ornıqlı emes radioaktiv izotoplar túrinde alındı. Atomlıq salmaǵı 99 ǵa teń $Z = 43$ elementiniń izotopı eń ornıqlı bolıp shıqtı (texneciy). Onıń yarım ıdıraw waqıtı $4,7 \cdot 10^5$ jıl. Qatar sanı $Z = 61$ bolǵan element siyrek jer elementleriniń qatarına kiredi (prometiy). Jasalma túrde $Z > 92$ transuran elementleri de alındı. Olar haqqında tómende gáp etiledi (381-paragraf).

Eń sońǵı waqıtları (1955-jılı) joqarı energiyaǵa iye protonlar menen mıs nishanani bombalaǵanda massası protonnıń massasına 5% ke shekemgi dállikte sáykes keletuǵın teris zaryadlanǵan bólekshelerdiń payda bolatuǵınlıǵın kórsetiwdiń sáti tústi. Bul bóleksheler *antiprotonlar* bolıp tabıladı. Olar protonlar menen simmetriyalı, biraq teris zaryadqa iye.

Usı paragraftıń aqırında *izomerlik ótiw* dep atalatuǵın yadrolıq aylanıslardıń jáne bir tipinde irkilemiz. Jasalma túrde alıńǵan izotoplarda usınday aylanıslardıń bolatuǵınlıǵı I.V.Kurchatov hám L.I.Rusinovlar tárepinen bolıp ayıldı. Neytronlar menen bombalaǵanda payda bolatuǵın bromnıń jasalma radioaktivliginde bromnıń ${}^{80}_{35}\text{Br}$ izotopınıń $\tau = 18$ minut hám 4 saattan úlkenirek bolǵan eki túrli yarım ıdıraw dáwirine iye bolatuǵınlıǵı anıqlandı. Bul jaǵday ${}^{80}_{35}\text{Br}$ izotopınıń hár qıylı bolǵan eki ("izomerlik") hallarda tura alatuǵınlıǵı menen túsindiriledi. Olardıń birinshisi ornıqlı emes; usınday halda turǵan ${}^{80}_{35}\text{Br}$ izotopı β -radioaktivlik qásiyetke iye boladı hám $\tau = 18$ min dáwir menen ıdıraydı. Ekinshi hal metastabilli. Bul halda ${}^{80}_{35}\text{Br}$ izotopı ıdıramaydı. Biraq, metastabillik haldaǵı jasaw waqıtı sheklengen hám shama menen $4,4$ saatka teń. Metastabilli haldan ornıqlı emes halǵa ótkende ${}^{80}_{35}\text{Br}$ izotopı jáne β -radioaktivlikke iye boladı hám ${}^{80}_{36}\text{Kr}$ izotopına aylanadı.

Jasalma túrde alıńǵan radioaktiv izotoplar is júzinde hár qıylı maqsetler ushın paydalanıladı. Olardıń bir qanshası tábiyiy preparatlardıń orına medicinada qollanıladı. Sońǵı waqıtları ximiyada hám ayırıqsha biologiyada "nishana atomlar" usılı paydalanıla basladı. Bul usıl radioaktiv tásiroi boyınsha stabilli emes izotoplardıń oǵada az muǵdarın anıqlawǵa múmkinshilik beredi. Mısalı, eger topıraqqa radioaktiv ${}^{45}_{20}\text{Ca}$ izotopın qossa, onda olardıń keyin ósimliktiń qanday bólimlerine (japıraqlar, miyweler) tarqalatuǵınlıǵın tabıwǵa boladı.

§ 379. Yadrolıq momentler. Elektronı tek zaryad penen massaǵa iye bolıp qoymay, shaması Bor magnetonı bolǵan $\mu_0 = \frac{\hbar}{2c} \cdot \frac{e}{m}$ shamasına teń magnit momentine de iye boladı. Ulıwma

$$\Delta W = \frac{M_I}{I} \mu_I H$$

energiyasına iye boladı (346-paragrafta keltirilgen esaplawğa qarańız). Bul teńlikte M_I - sırtqı magnit maydanı H tıń baǵıtına salıstırǵanda yadrolıq momenttiń baǵıtın anıqlaytuǵın hám $M_I = \pm I, \pm(I-1), \dots$ mánislerine iye bolatuǵın kvant sanı. Saylap alıw qaǵıydası boyınsha $\Delta M_I = \pm 1$ teńligine sáykes magnit momentiniń sekirmeli ózgerisleriniń júzege keliwi múmkin. Sırtqı magnit maydanındaǵı usınday "qaytadan orientaciyalanıwlar" energiyasınıń san mánisi boyınsha

$$\delta(\Delta W) = \frac{\mu_I}{I} H \quad (1)$$

shamasına teń ózgerisleri orın aladı.

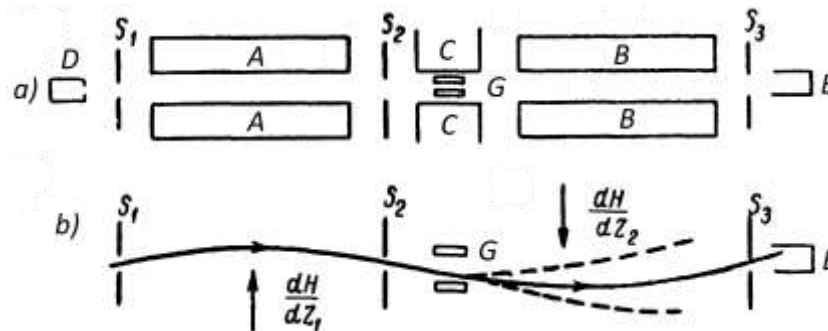
Atomnıń baǵıtın ózgertiw ushın oǵan sırttan $\delta(\Delta W)$ shamasına teń energiyanı beriw kerek. Energiyanıń bul porciyasınıń jiyiligi

$$\nu = \frac{\delta(\Delta W)}{h}$$

shamasına teń bolǵan nurlanıwdı jutiwdıń nátiyjesinde beriliwi múmkin. Bul teńlikke $\delta(\Delta W)$ shamasınıń (1)-teńlik boyınsha mánisin qoyıp, mınanı alamız:

$$\nu = \frac{\mu_I H}{Ih}. \quad (2)$$

$H \cong 1000$ e bolǵan jaǵdayda ν jiyiligi ushın 10^6 - 10^7 Gc, yaǵnıy jiyiliktıń ádettegi radiotolqınlarǵa sáykes keletuǵın mánisin alamız. Yadrolıq magnit momentlerin anıqlawdıń "radiospektroskopiyalıq" usılı yadrolıq momentlerdi anıqlawdıń tiykarında islep shıǵılǵan. Atomlardıń qaytadan baǵıtlanıwına sáykes keletuǵın ν jiyiligin anıqlap, (2)-teńlik boyınsha μ_I shamasınıń mánisin anıqlawǵa boladı.



410-súwret. Radiospektroskopiyalıq usıl menen yadrolıq momentlerdi anıqlaw ushın arnalǵan dúzilistiń sxeması.

Qaytadan orientaciyalanıw faktın anıqlaw ushın sxema túrinde 410-a súwrette kórsetilgen dúzilisten paydalanadı. Ishinen hawası sorıp alınǵan uzın metall trubanıń ishinde atomlıq yamasa molekualıq dáste alınadı. Dáste D qızdıırǵışında sáykes materialdıń puwlanıwınıń nátiyjesinde alınadı; dáste S_1 hám S_2 sańlaqlarınıń járdeminde sheklenedi hám dásteniń intensivligin registraciyalaytuǵın E qabıllaǵışına kelip túsedi. Eki A hám B magnitleri dástelerdi awıstıratuǵın bir tekli emes magnit maydanın payda etedi. Bul magnitlerdiń maydanlarınıń gradientleri qarama-qarsı baǵıtlanǵan. Sonlıqtan bul maydanlarda dáste qarama-qarsı baǵıtlarda awısadı. Eki maydannıń gradientleriniń mánislerin sáykes túrde saylap alǵanda B magniti payda etken maydannıń beretuǵın awısıwı A magniti payda etken maydannıń beretuǵın awısıwın kompensaciyalaydı hám dáste qaytadan E qabıllaǵışına kelip túsedi. 410-b súwrette usınday dásteniń traektoriyası tutas sızıq penen kórsetilgen. A hám B magnitleriniń arasında kernewligi H qa teń bolǵan bir tekli magnit maydanın payda etetuǵın úshinshi C magniti jaylastırılǵan. Bul magnittiń baǵıtı A hám B magnitleri payda etken magnit maydanlarınıń baǵıtına sáykes keledi. Turaqlı magnit maydanı dásteni awıstırmaytuǵın bolǵanlıqtan, úshinshi magnittiń bolıwı dásteniń traektoriyasın ózgertpeydi. Eger bólekshelerdiń magnit momentleriniń baǵıtları barlıq waqıtta ózgermey qalatuǵın jaǵdayda ǵana bul jaǵdaylardıń barlıǵı da orınlanadı. Eger H maydanınıń sheklerinde bóleksheniń orientaciyası ózgeretuǵın bolsa, onda B magniti payda etken awısıwdıń shaması ózgeredi. Nátiyjede joldıń boyında orientaciyasın ózgeretken bólekshede E qabıllaǵışına kelip túspeydi (bunday bólekshelerdiń traektoriyaları 410-b súwrette punktir sızıqlar menen kórsetilgen). Bólekshelerdiń qaytadan orientaciyalanıwı C magnittiń polyuslarınıń

arasında joqarı jiyilikli ózgermeli toq ótip turǵan G mis ilgeginin járdeminde payda etiletuǵın ózgermeli elektromagnit tolqınların tásirinde júzege keledi.

Tájiriybe mınaǵan alıp kelinedi: dástenin E qabıllaǵışına kelip jetiwi toqtaytuǵın ν jiyiligi saylap alınadı. Jiyiliktiń bul mánisi (2)-formula boyınsha yadroliq momentti esaplawǵa múmkinshilik beredi. XXXI kestede bazı bir yadrolar ushın I menen μ_I/μ_y qatnasınıń mánisleri berilgen.

XXXI kesteden kórinip turǵanday, bazı bir yadrolar ushın μ_I/μ_y qatnasınıń mánisi teris; bul usınday yadrolardıń magnit momentleriniń olardıń $\mathbf{P}_I$ mexanikalıq momentlerine qarama-qarsı ekenligin arǵartadı. Eń úlken magnit momentine indiy iye. Onıń yadrosınıń qasındaǵı magnit momenti μ_y yadroliq magneton μ_y dan 5,5 ese úlken ekenligin kórsetedi. XXXI kestede neytron ushın I menen μ_I/μ_y shamaların mánisleri de keltirilgen. Olar magnitlengen temirdegi neytronlardıń shashırawınıń olardıń magnit momentiniń baǵıtınan ǵárezli ekenligine tiykarlangan tájiriybeniń járdeminde alınǵan. Neytronnıń magnit momentiniń orientirovkasınıń ózgerisi joqarı táriyiplengen dúziliste ótkerilgen radiospetroskopiya tájiriybelerdiń járdeminde anıqlanadı. Neytronda (neytral bolǵan bólekshede) magnit momentiniń bar bolıwı faktı elementar bólekshelerdiń tábiyatın ayqınlastırıwda úlken qızıǵıwshılıqlardı payda etedi.

XXXI keste.

Yadroliq momentler			
Z	Element	I	μ_I/μ_y
0	neytron	$\frac{1}{2}$	-1,9103
1	^1H	$\frac{1}{2}$	+2,7896
1	^2D	1	+0,8565
2	^4He	0	-
3	^6Li	1	-0,8213
3	^7Li	$\frac{3}{2}$	+3,2532
7	^{14}N	1	+0,403
8	^{16}O	0	-
11	^{23}Na	$\frac{3}{2}$	+2,215
19	^{39}K	$\frac{3}{2}$	+1,136
19	^{40}K	4	-1,290
49	^{113}In	$\frac{9}{2}$	+5,49

§ 380. Atom yadrolarınıń qurılısı. Dáslepki waqıtları atom yadroların protonlar menen elektronlardan turadı dep esapladı. Yadroda elektronlardıń bolıwı β -radioaktivliktiń bolıwı menen jetkilikli dárejede tikkeley tastıyıqlanatuǵınday bolıp kórinde. Usınıń menen birge zaryadlıq sanı Z ge, massalıq sanı M ge teń bolǵan yadronı protonlar (N_p) menen elektronlardıń (N_e) mınaday sanınan turadı dep esapladı:

$$N_p = M, N_e = M - Z. \quad (1)$$

Biraq, bul gipoteza yadroliq momentlerdiń baqlawlarda alınatuǵın mánislerin túsindiriwge qaratılǵan tırıswlarda júdá úlken qıyınshılıqlarǵa jolıqtı. Bul qıyınshılıqlar birinshi ret azottıń $^{14}_7N$ yadrosınıń qásiyetlerin tallǵanda payda boladı. Bul yadro $I = 1$ kvant sanı menen táriyiplenedi hám Bor magnetonı μ_0 diń shama menen $\frac{1}{4500}$ dey úlesine teń magnit momentine iye. Usınıń menen birge, (1)-teńlik boyınsha $^{14}_7N$ yadrosı 14 protonnan hám 7 elektronnan turıwı kerek. Elektronlardıń taq sanında (jeti) olardıń menshikli magnit momentleri μ_0 ler bir birin tolıq kompensaciyalay almaydı Solay etip, azottıń yadrosınıń magnit momenti Bordıń bir magnetonına jaqın mániske iye bolıwı kerek, al haqıyqatında onnan ádewir kishi. Azottıń yadrosı ushın $I = 1$ teńliginiń orın alatuǵınlıǵınıń sebebin túsindiriwdiń de sáti túspeydi. Azottıń yadrosınıń quramına

kiretuğın bólekshelerdiń (protonlar menen elektronlardıń) sanı $14 + 7 = 21$, yaǵnıy bul shama da taq san. Proton menen elektronnıń menshikli spinlik momentleri $\frac{1}{2}$ ge teń kvant sanları menen táriyiplenedi hám olar bir birine salıstırǵanda parallel yamasa antiparallel bolıwı múmkin. Bunnan yadronıń spinlik momentiniń yarım pútin sanǵa teń bolǵan I kvantlıq sanı menen táriyipleniwi kerek ($1/2$ taq sanınıń algebralıq qosındısı). Bul juwmaq baqlanǵan $I = 1$ mánisine qayshı keledi. Keyinirek teoriyalıq juwmaqlar menen tájiriybelerde alıńǵan maǵlıwmatlardıń arasındǵı tap usınday sáykes kelmewshilik deytron (${}^2_1D$) ushın da tabıldı. Tájiriybelerde alıńǵan maǵlıwmatlar boyınsha deytronda $I = 1$ hám onıń magnit momenti Bor magnetonınıń shama menen $\frac{1}{2000}$ úlesine ǵana teń. (1)-sxema boyınsha deytronnıń eki protonnan hám bir elektronnan turıwı kerek. Bunnan deytron ushın I diń $1/2$ ge yamasa $3/2$ ge teń bolıwınıń, al magnit momentiniń bir Bor magnetonına jaqın bolıwınıń kerek ekenligi kelip shıǵadı.

Neytronlar ashılǵannan keyin basqa kóz-qaras payda boldı. Birinshi ret sovet fizigi D. D. Ivanenko *yadrolar tek protonlar menen neytronlardan turadı* dep bolǵadı. Yadronıń quramlıq bóleksheleri sıyaqlı, bul bóleksheler *nuklonlar* atamasına iye boldı. Yadrolardıń nuklonlardan turatuǵınlıǵın haqqındaǵı gipoteza házirgi waqıtları bárshe tárepinen qabıl etilgen gipoteza bolıp tabıladı. Bul gipotezanıń kóz-qarası boyınsha β -ıdıraw ekinshi qubılıs bolıp tabıladı. Neytronlardıń birewi proton, elektron hám neytrinoǵa aylanadı.

Zaryadlıq sanı Z ke hám massalıq sanı M ge teń bolǵan yadro mınaday sandaǵı protonlardan (N_p) hám neytronlardan (N_n) turadı:

$$N_p = Z, N_n = M - Z. \quad (2)$$

Yadronıń quramına kiretuğın bólekshelerdiń (nuklonlardıń) ulıwmalıq sanı massalıq san M ge teń. Jeńil elementlerdiń yadrolarındaǵı neytronlardıń sanı protonlardıń sanına teń. Mısalı ${}^4_2\text{He}$ yadrosı eki protonnan hám eki neytronnan, ${}^{12}_6\text{C}$ yadrosı altı neytronnan hám altı protonnan turadı h.t.b. Orta hám awır elementlerdiń yadrolarında neytronlardıń sanı protonlardıń sanınan kóp. Mısalı, ${}^{238}_{92}\text{U}$ uran yadrosında 92 proton hám 146 neytron bar.

Joqarıda keltirilgen yadrolardıń protonlar menen neytronlardan turatuǵınlıǵı haqqındaǵı gipoteza yadrolıq momentlerdiń mánisin túsindiriwde payda bolǵan qıyınshılıqlardı saplastıradı. Deytrondı qaraymız. (2)-sxema boyınsha deytron proton menen neytronnan turadı. Deytron ushın $I = 1$ teńliginiń orınlanatuǵınlıǵı proton menen neytronnıń spinlik momentleriniń bir birine parallel ekenligin kórsetedi. Bunday jaǵdayda, tájiriybelerde alıńǵan nátiyjelerge sáykes

$$I = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$$

mánisin alamız.

Eger deytronnıń magnit momenti proton menen neytronnıń magnit momentiniń algebralıq qosındısına teń dep boljasaq (XXXI kestege qarańız), onda

$$\mu_D = \mu_p + \mu_n = 2,7896\mu_y - 1,9103\mu_y = +0,8793\mu_y$$

shamasın alamız. μ_D nıń bul mánisi baqlawlarda alıńǵan $\mu_D = 0,8565\mu_y$ mánisine jaqın. Nátiyjelerdiń bir birine dál sáykes kelmewi deytronnıń proton menen neytronnan turatuǵın statikalıq sistema emes ekenligi menen baylanıslı.

Tap usınday jollar menen azottıń ${}^{14}_7\text{N}$ yadrosına tiyisli bolǵan qıyınshılıqlardıń da saplastırılatuǵınlıǵın ańsat kóriwge boladı.

(2)-sxema proton menen neytronnıń belgili bolǵan massaları boyınsha qálegen yadronıń massasınıń defektin esaplawǵa múmkinshilik beredi. Sáykes M_p , M_n hám M_A arqalı biz qarap atırǵan yadronıń massaların belgileymiz. Bunday jaǵdayda haqıyqiy massa defekti ΔM ushın

$$\Delta M = ZM_p + (M - Z)M_n - M_A \quad (3)$$

formulasına iye bolamız.

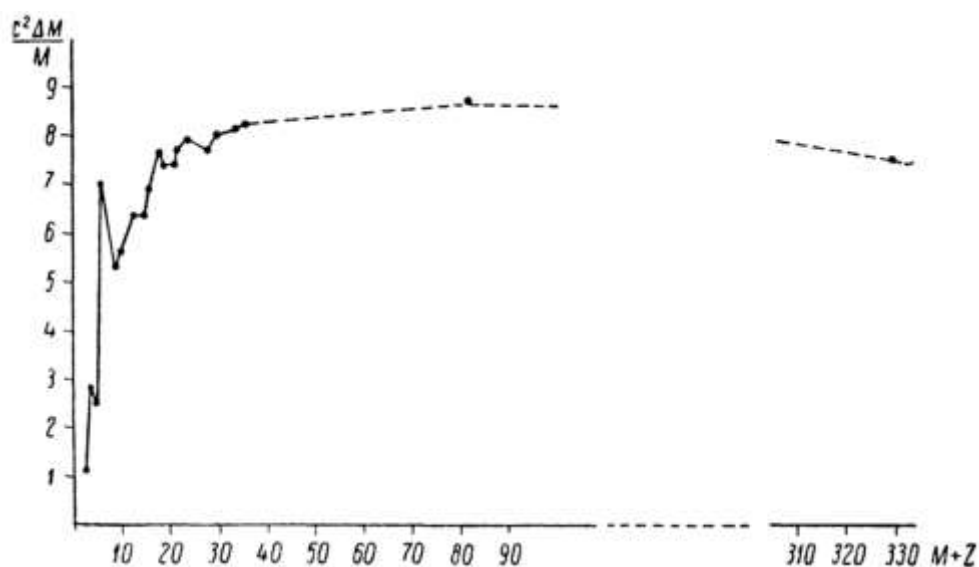
368-paragrafta ayılğanlarǵa baylanıslı $W = c^2\Delta M$ shaması berilgen yadroǵa kiretuǵın barlıq bóleksheleardıń baylanıs energiyasın beredi. $c^2\Delta M/M$ shaması bir bólekshege sáykes keletuǵın baylanıs energiyasına teń. XXXII keste de bir qatar yadrolar ushın megaelektronvoltlerde ańǵartılǵan tolıq baylanıs energiyası $c^2\Delta M$ niń, bir bólekshege sáykes keletuǵın baylanıs energiyası $c^2\Delta M/M$ niń shamaları keltirilgen⁶⁴.

XXXII keste

Atom yadroları ushın baylanıs energiyaları

Yadro	$c^2\Delta M$	$c^2\Delta M/M$	Yadro	$c^2\Delta M$	$c^2\Delta M/M$
${}^2_1D$	2,18	1,09	${}^{14}_7N$	104,10	7,44
${}^3_1T$	8,33	2,78	${}^{15}_7N$	114,85	7,66
${}^3_2He$	7,60	2,53	${}^{16}_8O$	126,96	7,94
${}^4_2He$	28,21	7,03	${}^{19}_9F$	146,95	7,73
${}^6_3Li$	31,81	5,30	${}^{20}_{10}Ne$	159,85	7,99
${}^7_3Li$	38,96	5,57	${}^{23}_{11}Na$	186,44	8,11
${}^9_4Be$	57,80	6,42	${}^{24}_{12}Mg$	197,52	8,23
${}^{10}_5B$	64,29	6,43	${}^{56}_{26}Fe$	476,08	8,68
${}^{11}_5B$	75,71	6,88	${}^{64}_{30}Zn -$ ${}^{120}_{50}Sn$	}	~8,6
${}^{12}_6C$	91,66	7,64			
${}^{13}_6C$	96,54	7,43	${}^{238}_{92}U$	1780	7,5

411-súwrette grafik túrinde hár qıylı yadrolar ushın bir bólekshege sáykes keletuǵın baylanıs energiyası bolǵan $c^2\Delta M/M$ shamasınıń atomlıq salmaqtań ($A = M + Z$) ǵárezligi kórsetilgen. *Ortasha atomlıq salmaqqa iye bolǵan barlıq yadrolar ushın bir bólekshege sáykes keletuǵın baylanıs energiyasınıń mánisi shama menen birdey hám 8,6 MeV ke teń.*



411-súwret. Yadrolardaǵı bir bólekshege sáykes keletuǵın baylanıs energiyası.

Bir bólekshege sáykes keletuǵın baylanıs energiyasınıń barlıq yadrolar (eń jeńil yadrolardan basqa) ushın birdey bolatuǵınlıǵı faktı minaday áhmiyetli juwmaqqa alıp keledi: yadrodaǵı hár bir bólekshe tek eń jaqın qońsıları menen ǵana tásirlesedi. Eger hár bir bólekshe qalǵan barlıq

⁶⁴ Házirgi waqıtları bir bólekshege sáykes keletuǵın baylanıs energiyası bolǵan $c^2\Delta M/M$ shamasın salıstırmalı baylanıs energiyası dep ataydı (Awdarıwshılar).

bóleksheler menen tásirlesetuǵın bolǵanda, onda yadronıń tolıq baylanıs energiyası yadrodaǵı bólekshelerdiń sanınıń, yaǵnıy M niń kvadratlıq funkciyası bolǵan bolar edi. Haqıyqatında, tolıq baylanıs energiyası juwıq túrde M niń birinshi dárejesine proporcional túrde ósedi.

Bunnan keyin tájiriybeler yadrolardıń radiusı R diń bólekshelerdiń sanı M niń kublıq korenine proporcional ekenligin kórsetti:

$$R = r_0 \sqrt[3]{M}. \quad (4)$$

Bul teńlikte turaqlı san bolǵan $r_0 = 1,5 \cdot 10^{-13}$ sm. Bul barlıq yadrolardaǵı bólekshelerdiń birdey tıǵızlıq penen "jaylasqanlıǵın" ańǵartadı. Keltirilgen faktlerdiń tiykarında Bor, YA.I.Frenkel hám jáne de bir qatar fizikler menen islep shıǵılǵan yadronıń "tamshı" modeli payda boldı. Bul model boyınsha suyıqlıqtıń tamshısı molekulalardan turatuǵınlıǵı sıyaqlı, yadro elementar bólekshelerden (nuklonlardan) turadı.

Tamshı modeli yadronıń baylanıs energiyasın esaplawǵa múmkinshilik beredi. Yadronıń baylanıs energiyasınıń bólekshelerdiń sanı M nen juwıq túrdegi proporcionallıǵına sáykes, baylanıs energiyası W ushın jazılǵan formulada $-aM$ aǵzasınıń turıwı kerek, bul aǵzadaǵı a - turaqlı san (minus belgisi bólekshelerdiń arasındǵı tartılısqa sáykes keledi). Bul ańlatpaǵa eń ornıqlı yadrolardaǵı protonlardıń sanınıń neytronlardıń sanına teń bolatuǵınlıǵına, yaǵnıy $M = 2Z$ bolǵan jaǵdayǵa sáykes keletuǵın aǵzanı qosıw kerek. Bul aǵzanı $+b \frac{(2Z-M)^2}{M}$ túrinde jazıwǵa boladı. Kórsetilgen eki energiyanı esapqa alıp, olardıń qosındısı ushın mınaday ańlatpanı alamız:

$$W = -aM + b \frac{(2Z - M)^2}{M}. \quad (5)$$

Usınıń menen birge tamshı modeli yadrolarda suyıq tamshılardaǵı bet kerimi kúshleriniń energiyasına sáykes keletuǵın "betlik" energiyanıń bar ekenligin kórsetedi. Álbette, bul betlik W_{bet} energiyanıń shaması yadronıń betiniń maydanına proporcional:

$$W_{bet} = \sigma \cdot 4\pi R^2. \quad (6)$$

Bul teńlikte σ - turaqlı. Yadrodan bóleksheni tartıp alıw energiyasınıń mánisin bilip σ niń san mánisin bahalawǵa boladı. Onıń ushın $\sigma \cong 10^{20}$ erg/sm² mánisi alınadı. (6)-ańlatpadaǵı yadronıń radiusınıń ornına onıń (4) boyınsha mánisin qoyıp

$$W_{bet} = 4\pi\sigma r_0^2 R^{2/3} \quad (6a)$$

ańlatpasına iye bolamız.

Eń aqırında, protonlardıń kulonlıq iyterisiwi menen baylanıslı bolǵan W_k energiyasın esapqa alıw kerek. Bul energiyanıń shamasın esaplawǵa boladı hám ol

$$W_k = \frac{3e^2}{5r_0} Z^2 M^{-1/3} \quad (7)$$

ańlatpasınıń járdeminde anıqlanadı. (5)-, (6-a) hám (7)-ańlatpalardı paydalanıp, yadronıń tolıq baylanıs energiyasın tabamız:

$$W = -aM + b \frac{(2Z - M)^2}{M} + 4\pi\sigma r_0^2 R^{2/3} + \frac{3e^2}{5r_0} Z^2 M^{-1/3}. \quad (8)$$

a hám b koefficientleriniń mánisleri belgisiz bolıp qaladı. Eger olardıń mánislerin baǵı bir yadrolar ushın tapsa, onda (8)-formula basqa yadrolar ushın empirikalıq maǵlıwmatlar menen jaqsı sáykes keletuǵın W niń mánislerin beredi (XXXII kestede baylanıs energiyalarınń san mánisleri keltirilgen, sonlıqtan olar W den belgisi boyınsha ayırıldı.

Tamshı modeli yadro tárepinen tez qozǵalatuǵın bóleksheni tutup alıw processı menen jasalma aylanılarda orın alatuǵın yadronıń bunnan keyingi ıdırawın bılayınsha qarawǵa múmkinshilik beredi. Yadrodaǵı barlıq bólekshelerdiń bir birine tıǵız jaylasıwına baylanıslı yadroǵa kelip kiretuǵın bóleksheniń kinetikalıq energiyası yadronıń barlıq bóleksheleriniń arasında birdey bolıp tarqaladı. Yadro qozǵan halǵa ótedi hám bul haldı suyıqlıqtıń tamshısınıń qızıwı menen salıstırıwǵa boladı. L. D. Landauidiń kórsetiwinshe, yadronıń "temperaturası" hám onıń yadroǵa kirip kelgen bóleksheniń energiyasınıń esabınan joqarılawı haqqında gáp etiwge boladı. 10 MeV shamasındaǵı qozdıruw energiyasında bul "temperaturanıń" mánisi $\sim 10^{11}$ K ǵa teń

bolıp shıǵadı. Qozǵan yadrodan bóleksheniń ushıp shıǵıwın "puwlanıw" dep qarawǵa boladı. Flukuaciyalardıń nátiyjesinde yadrodaǵı bólekshelerdiń biri yadronıń "qızǵan" bólekshesiniń ortasha energiyadan ádewir úlken bolǵan energiyaǵa iye bolıwı múmkin hám bul jaǵdayda ol bet kerimi kúshlerin jeńip, yadrodan "puwlanadı".

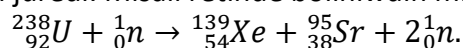
Yadronı málim dárejede tek suyıq tamshı menen ǵana emes, al qattı dene - kristall menen salıstırwǵa boladı. Kristalda bólekshe ushın energiya zonasın payda etetuǵın energiya qáddileriniń úzlikli qatarınıń bar ekenligi málim (II tom, 163-súwret). Sonlıqtan yadroda da kóp sanlı energiya qáddileri payda boladı. Qozdıruwdıń kishi energiyalarında qáddiler bir birinen úlken qashıqlıqlarda jaylasadı, qozdıruw energiyası úlkeygende olar bir birine jaqın jaylasa baslaydı hám shama menen 15 MeV shamasında ruqsat etilgen energiyalıq hallardıń úziksiz oblastın payda etedi. Qáddilerdiń tarqalıwınıń usınday xarakteri tájiriybelerde alınǵan maǵlıwmatlar menen tastıyqlanadı. Tómengi qáddiler γ -nurları shıǵarılǵanda (373-paragraf), al bar biri menen júdá tıǵız jaslasqan joqarı qáddiler neytronlardıń tutılıwında baqlanadı.

Yadrolardıń protonlar menen neytronlardan turatuǵınlıǵı yadrodaǵı kulonlıq óz-ara tásirlesiw kúshleriniń tutqan ornınıń úlken emes ekenligin kórsetedi. Tek protonlar ǵana Kulon kúshi menen tásirlesedi. Kulon kúshleri iyterilis kúshleri bolıp tabıladı. Sonlıqtan usınday kúshlerdiń tásirinde yadronıń ıdırawı kerek. Bólekshelerdi yadronıń ishinde uslap turatuǵın kúshleri neytronlar menen protonlardıń arasındǵı tartısıw kúshleri bolıp tabıladı. Bunday kúshlerdiń shaması qashıqlıqqa baylanıslı tez kemeyedi hám sonlıqtan olar tiykarınan yadrolardıń ishinde kórinedi.

Protonlar menen neytronlardıń arasındǵı tásir etetuǵın kúshlerdiń xarakterin esapqa alıp yadronıń tamshı modeline salıstırǵanda tolıǵıraq modelin dóretiwge múmkinshilik beredi. "Qabıqlıq" atamasına iye bolǵan bunday model M.Mayer hám basqa da fizikler tárepinen rawajlandırıldı. Bul modelde yadronı payda etetuǵın bóleksheler belgili bolǵan qabıqlarda jaylasadı. Bul jaǵday yadrolardıń qásiyetlerindegi dáwirlikti anıqlaydı. Bólekshelerdiń tolıq sanı 2, 8, 20, 50, 82 hám 126 bolǵan yadrolar ayırıqsha qásiyetlerge iye boladı. Biraq, yadronıń ishinde tásir etetuǵın kúshlerdiń tábiyatı elege shekem anıq emes bolıp kelmekte. Sonlıqtan yadronıń teoriyası usı waqıtlarǵa shekem baslanǵısh halda bolıp kelmekte hám bunnan keyingi rawajlanıwdı talap etedi.

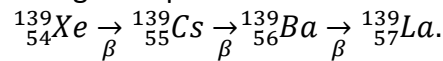
§ 381. Yadrolardıń bóliniwi. SHınjırlı reakciyanıń alınıwı. Yadronıń bóliniwi birinshi ret uranda tabıldı; bóliniw processı yadronıń erkin halında da (spontan bóliniw), neytronlardıń tásirinde de júriwi múmkin. Spontan bóliniw sovet fizikleri K. A. Petrjak hám G. N. Flérov tárepinen $^{238}_{92}\text{U}$ yadrosında tabıldı. Usınday bóliniwde urannıń yadrosı eki sınıqqa bólinedi. Olar Mendeleevtiń dáwirlik sistemasınıń orta bólimine tiyisli elementlerdiń yadroları bolıp tabıladı. Urannıń spontan bóliniwi júdá ástelik penen ótedi; uran yadrolarınıń jasınıń ortasha shaması 10^{16} jılǵa teń.

Neytronlardıń tásirindegi uran yadrolarınıń bóliniwi 1936—1937 jılları Gan, Liza Meytner hám SHtrasmanlar tárepinen *transuran elementlerin*, yaǵnıy $Z > 92$ bolǵan elementlerdi jasalma jollar menen alıw maqsetinde ótkerilgen jumıslardıń nátiyjesinde tabıldı. Bul izertlewshiler urandı neytronlar menen bombalap jasalma redioaktivliktiń payda bolǵanlıǵın anıqladı. Biraq, bul radioaktivliktiń alıp júriwshileriniń ne ekenligin bir mánisli anıqlawdıń sáti túspedi. Bunnan keyin ótkerilgen kóp sanlı tájiriybeler $^{238}_{92}\text{U}$ izotopınıń ózine áste qozǵalatuǵın bir neytrondı qosıp alıwınıń nátiyjesinde bóliniwine alıp keldi. Uran $^{238}_{92}\text{U}$ eki sınıqqa bólinedi eken. Bul sınıqlar ortasha atomlıq salmaqqa iye bolǵan eki elementtiń yadroları bolıp tabıladı; usınıń menen birge bóliniwde birden úshke shekemgi erkin neytronlar payda boladı. Bóliniw sınıqlardıń hár qıylı juplarınıń payda bolıwı menen júredi. Mısalı retinde bóliniwdiń mınaday processin keltiremiz:

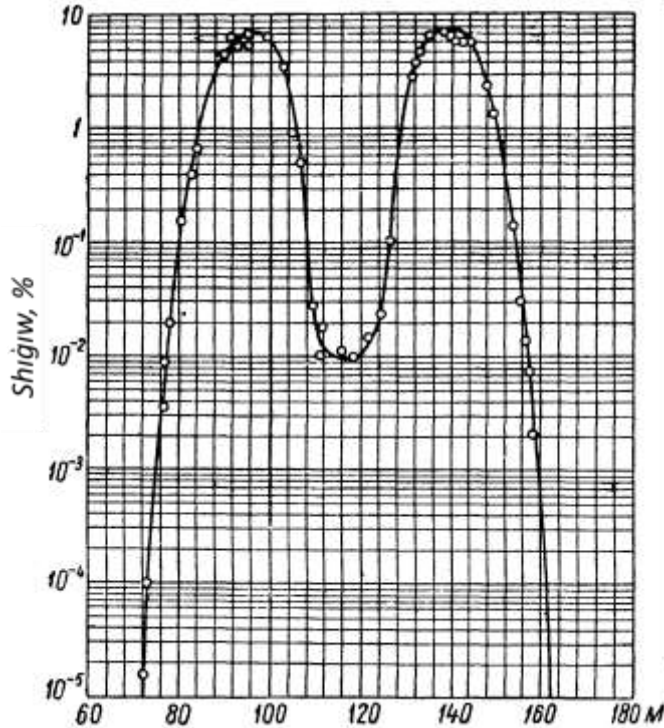


Payda bolǵan $^{139}_{54}\text{Xe}$ hám $^{95}_{38}\text{Sr}$ yadroları neytronlardıń júdá kóp atrıqmashlıǵı menen táriyiplenedi ($^{136}_{54}\text{Xe}$ menen $^{88}_{38}\text{Sr}$ ksenon menen stronciydiń eń awır stabilli izotopları bolıp

tabiladi), sonlıqtan olar ornıqlı emes hám izbe-iz ótetuǵın bir qatar β -ıdırawlarǵa ushıraydı. Mısalı, $^{139}_{54}\text{Xe}$ mınaday β -ıdırawlarınń dizbegine alıp keledi:



Bul dizbek lantannıń stabilli bolǵan $^{139}_{57}\text{La}$ izotopı menen pitedi.



412-súwret.
Urannıń bóliniwinde hár qıylı sınıqlardıń
payda bolıwınń itimallıǵı.

412-súwrette uran $^{235}_{92}\text{U}$ tiń shıǵıwın (procentlerdegi) beretuǵın iymeklik keltirilgen. Iymeklik $M = 118$ shamasında jaylasqan minimumǵa qarata simmetriyalı. Bunnan birdey massaǵa iye bolǵan sınıqlarǵı bóliniwdiń itimallıǵınń M massaları hár qıylı bolǵan sınıqlarǵa bóliniwdiń itimallıǵınan úlken bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Massaları júdá hár qıylı bolǵan sınıqlarǵa bóliniw (160 tan úlken hám 76 dan kishi) júzege kelmeydi.

Uran $^{235}_{92}\text{U}$ dıń bóliniwi júdá úlken energiyanıń, atap aytqanda 150 MeV shamasına teń energiyanıń bólinip shıǵıwı menen júredi.

Bóliniwde ajıralıp shıǵatuǵın energiyanıń shamasın 380-paragraftaǵı (8)-formulanıń járdeminde bahalawǵa boladı. Bóliniw processı mınadan ibarat: kelip túsken neytronnıń tásirinde qozǵan halǵa ótken tamshı-yadro shama menen birdey ólshemlerge iye bolǵan eki tamshıǵa bólinedi. Awır yadrolar hám ortasha massalarǵa iye bolǵan yadrolar ushın bólekshelerdiń arasındadı baylanıs energiyasınıń shaması derlik birdey bolǵanlıqtan, dáslepki yadro menen eki jańa yadrolardıń energiýalarındaǵı ayırma 380-paragraftaǵı (8)-formulanıń tek eki sońǵı aǵzası menen baylanıslı. Olardıń birinshisi yadronıń betiniń maydanına proporcional bolǵan betlik energiyanı beredi. Yadrolar teńdey eki bólekke bólinedi dep boljayıq. R arqalı dáslepki yadronıń radiusın, al R_1 arqalı payda bolǵan yadrolardıń radiusın belgileyik. Bóliniwde kólemniń saqlanıw shárti mınanı beredi:

$$\frac{4}{3}\pi R^3 = 2 \cdot \frac{4}{3}\pi R_1^3.$$

Bunnan R_1 ushın mınaday ańlatpanı alamız:

$$R_1 = \frac{R}{2^{1/3}}.$$

Betlik energiyanıń ózgerisi 380-paragraftaǵı (6)-formula boyınsha mınaǵan teń boladı:

$$\Delta W_{bet} = \sigma \cdot 4\pi R^2 - \sigma \cdot 4\pi R_1^2 = \sigma \cdot 4\pi R^2 \left(1 - 2^{-2/3}\right) \cong -0,26\sigma \cdot 4\pi R^2.$$

Betlik energiya tamshınıń eki tamshıǵa bóliniwindegi tamshı-yadronıń betiniń úlkeyiwiniń saldarınan júzege keldi.

Ekinshi aǵza yadrodaǵı bólekshelerdiń arasındaǵı kulonlıq tásirlesiwdiń energiyasınıń ózgerisi menen baylanıslı. Bul energiya yadronıń radiusı hám zaryadlıq san qatnasatıǵın $\frac{3}{5} \frac{Z^2 e^2}{R}$ formulasınıń járdeminde anıqlanatuǵın bolǵanlıqtan, onda yadro bólingende onıń shaması mınaday shamaǵa kishireydi:

$$\Delta W_k = \frac{3}{5} \frac{Z^2 e^2}{R} \left(1 - 4^{-\frac{1}{3}}\right) \cong 0,37 \cdot \frac{3}{5} \frac{Z^2 e^2}{R}.$$

Bóliniwdegi energiyanıń tolıq ózgerisi (ajıralıp shıǵatuǵın energiyanı on dep esaplaymız) mınaǵan teń:

$$\Delta W \cong -0,26\sigma \cdot 4\pi R^2 + 0,37 \cdot \frac{3}{5} \frac{Z^2 e^2}{R}.$$

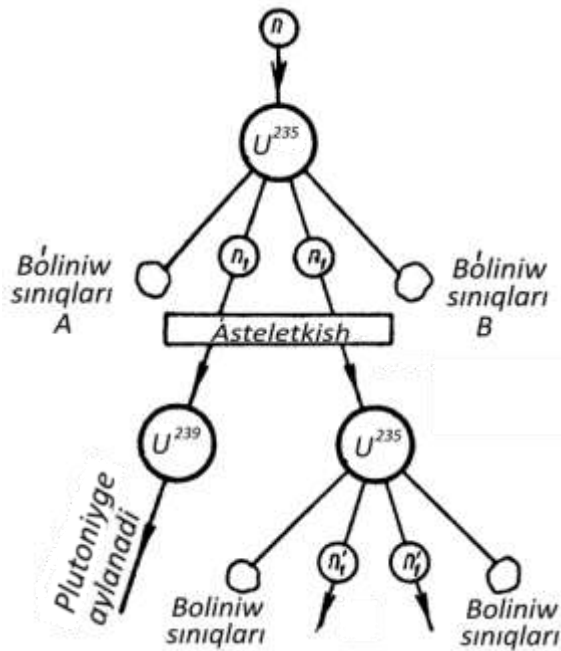
Yadronıń betlik energiyasınıń ózgerisi menen bólekshelerdiń kulonlıq óz-ara tásirlesiwiniń energiyasınıń ózgerisiniń shamalarına baylanıslı energiyanıń bul ózgerisiniń mánisiniń teris te, on da bolıwı múmkin. Jeńil yadrolar ushın betlik energiyanıń ózgerisi úlken orındı iyeleydi, sonlıqtan bunday yadronı bóliw ushın energiyanı jumsaw kerek boladı. Awır yadrolar ushın (úlken Z ler) bólekshelerdiń arasındaǵı kulonlıq óz-ara tásirlesiw úlken orındı iyeleydi; bunday yadrolardıń bóliniwi energiyanıń bólinip shıǵıwı menen birgelikte júredi. Sáykes esaplawlar, energiyanıń bólinip shıǵıwı menen júretuǵın reakciyalardıń Z zaryadlıq sanı shama menen 90 bolǵan yadrolardan baslanatuǵınlıǵın kórsetedi.

${}^{235}_{92}\text{U}$ yadrolarınıń bóliniw processı shınjırlı reakciya (yaǵnıy ósetuǵın) túrinde júre aladı. Másele sonnan ibarat, bir ${}^{235}_{92}\text{U}$ yadrosı bólingende sınıqlar menen birge ekiden úshke shekemgi neytron payda boladı. Bul neytronlar bunnan keyin eki úsh ${}^{235}_{92}\text{U}$ yadrolarınıń bóliniwin júzege keltiriwi múmkin. Reakciya kúsheyedi hám belgili bolǵan sharayatlarda partlanıw reakciyasına aylana aladı.

Eki jaǵdayǵa baylanıslı bunday reakciyanı is júzinde ámelge asırıw júdá qıyın. Olardıń birinshisi tábiyiy urannıń ${}^{238}_{92}\text{U}$ hám ${}^{235}_{92}\text{U}$ izotoplarınıń aralaspasınan turatuǵınlıǵı menen baylanıslı. Olardıń biri bolǵan ${}^{238}_{92}\text{U}$ (99% muǵdarında qatnasatuǵın) bóliniw processine alıp kelmey, neytronlardıń kópshiligin tutadı.

Ekinshi jaǵday ${}^{235}_{92}\text{U}$ izotopınıń bóliniwiniń tiykarınan ástelik penen qozǵalatuǵın "jıllılıq" neytronlar dep atalatuǵın neytronlardıń tásirinde júretuǵınlıǵına baylanıslı. Al, bóliniw processinde alınatuǵın neytronlar bolsa tez qozǵalatuǵın neytronlar bolıp tabıladı. Bul tez qozǵalatuǵın neytronlardıń bir bólimi bir bólek urannıń sheklerinen ushıp ketiwi, al ekinshi bóliminiń ${}^{238}_{92}\text{U}$ yadroları menen tutıp alınıwı múmkin (bunday jaǵdayda ${}^{239}_{92}\text{U}$ izotopı payda boladı). Solay etip, alıńǵan neytronlardıń tek bir bólimi ǵana ${}^{235}_{92}\text{U}$ izotopınıń jańa bóliniw aktlerine alıp keledi; bul neytronlardıń sanınıń az bolıwı hám sonıń saldarınan reakciyanıń toqtawı múmkin. Reakciyanıń júriwin támiyinlep turıw ushın tábiyiy urandı ${}^{235}_{92}\text{U}$ izotopı menen bayıtıw yamasa neytronlardı jasalma túrde ásteletiw kerek.

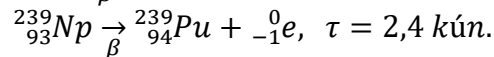
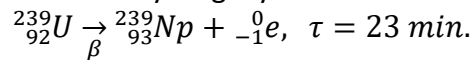
Neytronlardı ásteletiw usılı *uran qazanları* dep atalatuǵın dúzilislerde (reaktorlarda) úziksiz júretuǵın yadrolıq reakciyanı júzege keltiriwge múmkinshilik berdi. Neytronlardı ásteletiw qanday da bir zatta (misalı, grafitte) ámelge asırıladı. Bunday zatta neytronlar tiykarınan sarpimli soqlıǵıslarǵa ushıraydı. Qazanda bolıp ótetuǵın processtiń sxeması 413-súwrette keltirilgen. Qazanda n neytron ${}^{235}_{92}\text{U}$ yadrosı menen birigip, onıń A hám B sınıqlarına bóliniwin boldıradı hám eki yamasa úsh tez ushatuǵın neytronlardı payda etedi. Bul neytronlar ásteletkish arqalı ótkende olardıń bir bólimi ${}^{238}_{92}\text{U}$ tárepinen jutiladı. Bul ${}^{239}_{92}\text{U}$ izotopınıń payda bolıwına alıp keledi. Al ástelengen neytronlardıń bir bólimi ${}^{235}_{92}\text{U}$ yadrolarınıń bóliniwin hám jańa neytronlardıń payda bolıwın h.t.b. boldıradı. Qazandaǵı reakciyanıń stacionar túrde ótiwi múmkin. Bunday jaǵdayda energiyanıń úlken muǵdarı bólinip shıǵadı. Qazannıń dúzilisiniń sxeması 382-paragrafta keltirilgen.



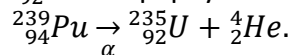
413-súwret.

Uran qazanınıń háreket etiwinıń sxeması.

Uran qazanında bolıp ótetuǵın processlerdi izertlew jańa transuran elementleriniń ashılıwına alıp keldi. $^{239}_{92}\text{U}$ izotopı β -radioaktivlik qásiyetke iye boladı eken hám onıń yarım ıdıraw waqıtı $\tau = 23$ min qa teń. $^{239}_{92}\text{U}$ izotopınıń β -ıdırawınıń nátiyjesinde zaryadlıq nomeri $Z = 93$, massalıq sanı $M = 239$ bolǵan element payda boladı; bul element *neptuniy* atamasına iye boldı. Neptuniy de β -radioaktivli hám ol zaryadlıq nomeri 94 ke teń bolǵan jańa elementtiń payda bolıwına alıp keledi. Aylanıwdıń barlıq sxeması mınaday túrge iye:



Plutoniy 24000 jılǵa teń úlken yarım ıdıraw dáwirine iye hám ol α -radioaktivlik qásiyetke iye. Onıń α -radioaktivliginiń nátiyjesinde $^{235}_{92}\text{U}$ izotopı payda boladı:



Plutoniy neytronlardıń tásirinde bóliniwge qábiletli, bul onı shınjırılı (partlanıwshı) reakciyalardı alıw ushin paydalanıwǵa múmkinshilik beredi.

Házirgi waqıtları *Np* hám *Pu* den basqa jáne jeti transuran elementi belgili. Olar

americıy (*Am*, $Z = 95$), ol segiz izotopqa iye, olardıń ishindegi eń ornıqlısı yarım ıdıraw dáwiri 760 jıl bolǵan $^{243}_{95}\text{Am}$ bolıp tabıladı;

kyuriy (*Cm*, $Z = 96$), jeti izotopqa iye, olardıń eń ornıqlısı yarım ıdıraw waqıtı 20 000 jıl bolǵan $^{245}_{96}\text{Cm}$;

úsh izotopqa iye berkliy (*Bk*, $Z = 97$);

segiz izotopqa iye kaliforniy (*Cf*, $Z = 98$), olardıń ishindegi eń ornıqlısı $^{249}_{98}\text{Cf}$ ushın yarım ıdıraw waqıtı 500 jıl;

eynshteyniy (*E*, $Z = 99$) tórt izotopqa iye;

úsh izotopı bar fermiy (*Fm*, $Z = 100$);

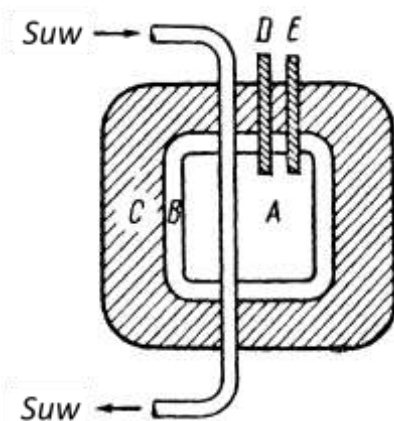
mendeleviy (*Mv*, $Z = 101$). Barlıq transuran elementler radioaktivlik qásiyetke iye hám massalıq sanı $4n + 1$ formulası (n - pútin san) menen ańlatılatuǵın radioaktivli semeystvoǵa kiredi.

§ 382. Yadrolıq energetika. Bunnan aldınǵı paragraflarda tábiyiy radioaktivli reakciyalarda hám jasalma túrde júzege keltirilgen yadrolıq reakciyalarda reakciyalanatuǵın zattıń massasınıń hár bir birliginen energianıń oǵada úlken muǵdarınıń bólinip shıǵatuǵınlıǵı aytıldı. Biraq,

yadronıń ishindegi energiyanı paydalanıwdıń perspektivaları kóp waqıtlar dawamında túsiniqsiz bolıp keldi. Tábiyiy-radioaktiv elementlerdiń ishinen tek urandı ádewir úlken muǵdarda alıwǵa boladı. Biraq, urannıń tábiyiy radioaktivligindegi bólinip shıǵatuǵın quwat sonshama az bolǵanlıqtan, ol ámeliy jaqtan hesh qızıǵıwdı payda etpeydi. Jasalma radioaktivlik bolsa stabilli izotoplardıń atomların tez qozǵalatuǵın bóleksheler menen bombalawdıń esabınan ǵana alınadı. Tájiriybeler bunday jaǵdayda bólekshelerdiń basım kóp sanınıń serpimli soqlıǵısıwlarında energiyların joǵaltatuǵınlıǵın kórsetti (mısalı, Rezerford tájiriybesindegi α -bóleksheleri). Olardıń tek úlken bolmaǵan bólimi ǵana yadrolar menen olardıń bóleklerge bólinetuǵında dárejede tıǵız soqlıǵıadı. Sonlıqtan, bóleklerge bóliniwdiń ayırım alıńǵan aktı ǵana energiyadaǵı utıwdı beretuǵın bolsa da, bóleklerge bóliniwdegi alınatuǵın energiyanıń shaması dáslepki bólekshelerdiń energiylarınan ádewir kishi.

Yadronıń ishindegi energiyanı ámelde paydalanıw haqqındaǵı máseleniń sheshimi yadrolardıń bóliniwi ashılǵannan hám shıńırılı reaksiyanı alıwdıń usılı tabılǵannan keyin anıqlandı. Úzliksiz ótetuǵın hám regulirovkalanatuǵın yadrolıq reaksiya yadrolıq qazanlarda (reaktorlarda) alınadı. Qazanlarda tábiyiy uran yamasa ^{235}U menen bayıtılǵan uran paydalanıladı. SHıńırılı yadrolıq reaksiyanıń júriwiniń zárúrli bolǵan shárti qazandaǵı urannıń jetkilikli muǵdarınıń bolıwınan ibarat. Yadrolıq reaksiyada payda bolatuǵın neytronlar urannıń beti arqalı sırtqı shıǵa aladı hám, usıǵan sáykes, shıńırılı reaksiyanıń rawajlanıwınan sırtqı shıǵıp qala aladı. Usınday neytronlardıń sanınıń úlken bolmawı ushın urannıń betiniń shamasınıń onıń kólemimen kishi bolıwı tiyis. Onıń ushın qazandaǵı urannıń massasınıń jetkilikli dárejede úlken hám bazı bir kritikalıq massadan úlken bolıwı kerek. Ekinshi tárepten, reaksiyanıń júdá úlken tezlik penen júrmewi ushın neytronlardıń sanın, olardıń dım kóbeyip ketpewi ushın retlestiriw zárúr. Bul artıqmash jıllılıq neytronlarınń bor yamasa kadmiy sıyaqlı elementlerdiń járdeminde jutılıwın paydalanıw arqalı ámelge asırıladı.

Yadrolıq qazannıń dúzilisiniń sxeması 414-súwrette keltirilgen. Bul súwrette *A* arqalı urannıń hám ásteletkishtiń (ádette grafittiń) blokları jaylastırılǵan keńislik, *B* arqalı reaksiya júretuǵın oblasttan shıǵatuǵın neytronlardıń bir bólimin keyin qaray qaytaratuǵın shaǵılistırǵısh, *C* arqalı qorshaǵan ortalıqtı yadrolıq reaksiyada payda bolatuǵın nurlanıwdıń tásirinen qorǵaytuǵın qatlam, *D* hám *E* arqalı *A* kólemine kirgiziw reaksiyanı ásteletetuǵın bor menen kadmiyden soǵılǵan sterjenler belgilengen. Yadrolıq reaksiyanıń quwatı belgili bolǵan shekten joqarılaǵan jaǵdayda sterjenlerdi kirgiziw avtomat túrde ámelge asırıladı. Uran blokların salqınlatıw ushın suw ótkeriledi.



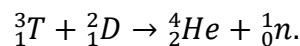
414-súwret.
Yadrolıq qazannıń sxeması.

Birinshi sovet qazınında tábiyiy uran paydalanıldı; ásteletkish xızmetin grafit atqardı. Ólshewlar tábiyiy urandı paydalanǵanda hár bir jıllılıq neytronına jańadan payda bolǵan 1,337 neytronniń sáykes keletuǵınlıǵın kórsetti. Neytronlar sanınıń usınday úlken bolmaǵan artıqmashlıǵı úzliksiz ótetuǵın yadrolıq reaksiyanıń alınıwın júdá qıyın máselege aylandırdı.

Birinshi sovet qazanına 45 tonna uran salǵanda ǵana isley basladı. Házirgi waqıtları ádewir jetilistirilgen qazanlar soǵılǵan.

Yadroliq reakciyalardıń júriwiniń nátiyjesinde qazanda kóp muǵdardaǵı jıllılıq bólinip shıǵadı. Bul jıllılıqtı texnikalıq maqsetlerde paydalanıwǵa boladı. Yadroliq reakciyalarda bólinip shıǵatuǵın energiyada isleytuǵın dúnyadaǵı birinshi elektrostancianıń ("atom elektr stanciyası") Sovetler Soyuzında qurılǵanlıǵı belgili. Bul elektr stanciyasında ^{235}U menen 5 procentke shekem bayıtılǵan uranda isleytuǵın qazan paydalanıladı (tábiiy urandaǵı ^{235}U izotopınıń muǵdarı 0,7 %). Qazannıń járdeminde suw puwı joqarı temperaturalarǵa shekem qızdırıladı, bul puw turbogeneratordı háreketke keltiredi. Házirgi waqıtları SSSR da quwatı úlken bolǵan basqa atomlıq elektr stanciyaları, atomlıq dvigatelardıń járdeminde qozǵalısqı keltirilgetuǵın atom muz jarǵışı qurılmaqta.

Yadroliq reakciyalar atom bombasında paydalanıladı. Atom bombasınıń konstrukciyasınıń júdá qısqa waqıttıń ishinde massaları kritikalıq massadan kishi bolǵan uran yamasa plutoniyden turatuǵın bloklardı massası kritikalıq massadan úlken bolǵan bir massaǵa qosıwda ámelge asıratuǵınday bolıwı kerek. Nátiyjede partlanıw xarakterine iye bolǵan yadroliq reakciya júzege keledi. Vodorod bombası dep atalatuǵın bombada jeńil yadrolardıń awıraraq bolǵan yadrolarǵa birigiw reakciyası bolıp tabılatuǵın termoyadroliq reakciya paydalanıladı. Bunday reakciya júdá kóp muǵdardaǵı jıllılıqtıń bólinip shıǵıwı menen júredi. Sebebi, jeńil yadrolardaǵı bir bólekshege sáykes keletuǵın baylanıs energiyasınıń shaması orta elementlerdegi bir bólekshege sáykes keletuǵın baylanıs energiyasına salıstırǵanda kishi. Termoyadroliq reakciya tek yadrolardıń kinetikalıq energiyaları olardıń soqlıǵısıwında júdá kishi aralıqlarǵa shekem jaqınlasıwı ushın jetkilikli bolǵan júdá joqarı temperaturalarda óte aladı. Vodorod bombasında deyteriy menen tritiydiń birigiw reakciyası paydalanıladı:



Reakciyanıń júzege keliwi ushın zárúrli bolǵan joqarı temperatura shama menen million gradus temperaturanı bere alatuǵın uran yamasa pluton bombasınan soǵılǵan "jamnıń" (yamasa "pilteniń") járdeminde alınadı.

Házirgi waqıtları paraxatshılıq sharayatlarındaǵı energiyalıq maqsetler ushın paydalanıw múmkin bolǵan regulirovkalanatuǵın termoyadroliq reakciyanı alıwǵa qaratılǵan keń kólemdegi jumıslar alıp barılmaqta.

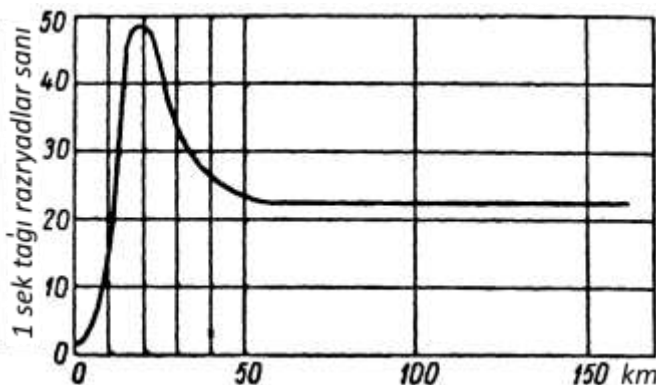
§ 383. Kosmoslıq nurlar. Kosmoslıq nurlar dúnyalıq keńislikten jerdiń atmosferasına kelip túsetuǵın hám kóp sanlı yadroliq aylanıslardı júzege keltiretuǵın oǵada úlken energiyalarǵa iye bolǵan bóleksheleardıń aǵısı bolıp tabıladı. Sońǵı waqıtları oǵada kóp sanlı jumıslar kosmoslıq nurlardı úyreniwge baǵıshlanǵan bolsa da, olardıń kelip shıǵıwı menen tábiyatınıń kóp tárepleri anıq emes bolıp kelmekte. Sonlıqtan bizler kosmoslıq nurlarǵa qısqa túrde irkilip ótemiz.

1901-jıldıń ózinde atmosferadaǵı hawanıń barlıq waqıtta az-kem ionlasqan ekenligi tabıldı. Eger hawanıń porciyasın qalıń qorǵasın diywalları bar ıdısqı salsa, onda ionlasıw ádewir kemeyedi eken. Biraq, bunday jaǵdayda da ionizaciya az dárejede bolsa da saqlanadı. Joqarıda kórsetilgen baqlawlardıń tiykarında jerdiń qabıǵında bazı bir muǵdarda turaqlı túrde bolatuǵın tábiyiy radioaktiv elementler tárepinen shıǵarılıǵın γ -nurlardıń tásirinde payda boladı degen boljaw ayıldı. Eger bul gipoteza durıs bolǵanda hawanıń ionizaciyası biyiklikke baylanıslı kemeygen bolar edi. 1910-jılı hawa sharınıń járdeminde kóteriliwde orınlanǵan ólshewler bul juwmaqtı tastıyıqlamadı. Ionizaciyanıń shaması birinshi 1000 m biyiklikke kóterilgende kemeygen hám bunnan keyin úlkeygen. 5000 m biyikliktegi ionlasıw bolsa jerdiń betindegi ionlasıwdan úsh ese úlken bolǵan. Bunnan keyin 35 km ge shekem kóterile alatuǵın shar-zondlarda ornatılǵan ózleri jazatuǵın elektroskoplar ionlasıwdıń shama menen 20 km biyiklikke shekem úlkeyetuǵınlıǵın hám onnan keyin derlik turaqlı qataluǵınlıǵın kórsetti. Bunnan hawanıń ionlasıwınıń jerdiń atmosferasına dúnyalıq keńislikten keletuǵın nurlanıwdıń tásirinde boladı degen boljaw payda boldı. Bul nurlanıw *kosmoslıq nurlar* atamasına iye boldı.

Kosmoslıq nurlardıń ótiwshilik qábiletligin ólshew ushın Milliken hám sovet fizigi L. B. Misovskiy, al onnan keyin bir qatar izertlewshiler tárepinen suwları radioaktiv elementlerge iye bolmaǵan taw kóllerine elektroskoplardı batırıw menen tájiriybeler ótkerilgen. Ionizaciya 1000 metrlik tereńlikte de baqlanǵan. Bul kosmoslıq nurlardıń júdá joqarı bolǵan ótiwshilik qábiletlikke iye bolatuǵınlıǵın kórsetedi. Ionizaciyanıń intensivligi elektroskoptıń ústindegi suw qatlamınıń qalıńlıǵına proporcional kemeyedi eken; bul jaǵday kosmoslıq nurlardıń atmosferanıń joqarǵı qatlamlarınan tómengi qatlamlarına qaray baǵıtlanǵanlıǵın kórsetedi.

Keyinirek (1947-jılı) kosmoslıq nurlardı izertlew 160 km biyiklikke shekem kóterilgen raketaǵa ornatılǵan avtomat túrde isleytuǵın ásbaplardıń járdeminde ótkerildi. 415-súwrette 160 km ge shekemgi biyikliklerdegi esaplaǵıshtıń razryadlarınń sanı boyınsha ótkerilgen iymeklik berilgen (371-paragraf). Kórinip turǵanıday, iymeklik 20 km biyiklikke shekem tik túrde joqarılaydı hám bunnan keyin biraz tómeydi. Al, 50 km biyiklikten baslap abscissa kósherine parallel júredi. Álbette, 50 km biyikliktegi hám onnan joqarıda jaylasqan esaplaǵıshlardıń razryadınıń turaqlı intensivlikke iye bolǵan birinshi kosmoslıq nurlanıwdıń tásirinde payda bolǵan. 20 km biyikliktegi maksimum atmosferada kosmoslıq nurlardıń tásirinde júzege keletuǵın ekinshi processlerdiń esabınan payda bolǵan.

Qorǵasındaǵı kosmoslıq nurlardıń jutılıwın ólshewler qorǵasınıń birinshi 10 santimetrin ótkende olardıń intensivliginiń shama menen 30% ke kemeyetuǵınlıǵın kórsetti. Bunnan keyingi jutılıw ádewir ástelik penen júredi; qalıńlıǵı 10 sm bolǵan qorǵasın arqalı ótken kosmoslıq nurlar qorǵasınıń 1 m qalıńlıǵı arqalı óte aladı. Bunnan *kosmoslıq nurlardıń bir tekli emes ekenligi hám keminde eki qurawshıdan [kem ótetuǵın (jumsaq) hám kóbirek ótetuǵın (ótkir)] turatuǵınlıǵın kórsetti.*



415-súwret.
Esaplaǵıshtaǵı razryadlar sanınıń
biyiklikke baylanıslı ózgerisi.

Kosmoslıq nurlardı dáslep úlken energiyaǵa iye bolǵan fotonlardıń aǵısı dep boljadı. Demek bunday nurlar óziniń tábiyatı boyınsha ótkir γ -nurlarına uqsas. Biraq, keyinirek bul gipotezanı ózgertiwge májbúrlegen faktler payda boldı.

Másele sonnan ibarat, kosmoslıq nurlardıń intensivligi geomagnitlik keńlikten gárezli eken: ekvatordaǵı intensivlik Jerdiń magnit maydanınıń polyuslarınıń qasındaǵı intensivlikten kishi. Bul keńliklik effekt Jerdiń magnit maydanınıń dúnyalıq keńislikten ushıp kelgen zaryadlanǵan bólekshelerge tási menen túsindiriledi. Solay etip, birinshi kosmoslıq nurlardıń bir bóliminiń energiyası júdá joqarı hám shama menen $10^9 - 10^{11}$ eV hám onnan da joqarı bolǵan elektrlik zaryadlanǵan bólekshelerden turatuǵınlıǵı gúmánsız boldı.

Jerdiń betiniń qasındaǵı kosmoslıq nurlanıwdıń intensivligi úlken emes: kosmoslıq nurdan kólemi 1 sm^3 bolǵan hawada 1 sek waqıttıń ishinde ionlardıń shama menen ekewin payda etedi. Biraq hár bir kosmoslıq bóleksheshe tárepinen alıp kelinetuǵın energiyanıń shaması júdá úlken bolǵanlıqtan (atomlıq masshtablardaǵı kóz-qaras boyınsha), bul bóleksheshe kóp sanlı yadrolıq aylanıslardı júzege keltire aladı. Házirgi waqıtlardaǵı eksperiment texnikası Vilson kamerasınıń, esaplaǵıshlardıń hám qalıń qatlamlı fotoplastinkalar usılınıń járdeminde ayırım kosmoslıq

bóleksheniń tásin baqlawǵa múmkinshilik beredi. Kosmoslıq bólekshelerdiń jollarınıń iziniń birinshi fotosúwretleri D. V. Skobelcın tárepinen alındı (1929-jılı). Vilson kamerasın magnit maydanına jaylastırıp, D. V. Skobelcın bólekshelerdiń traektoriyalarınıń awısıwı boyınsha olardıń zaryadı menen energiyasın anıqlawǵa tıristı. Biraq, onıń qolında bar bolǵan magnit maydanlarında traektoriyalar sezilerliktey mayıspaǵan. Bul bólekshelerdiń energiyasınıń júdá úlken ekenligin kórsetti. Keyinirek kernewligi 20 000 e ke shekemgi magnit maydanların paydalanǵanda kosmoslıq bólekshelerdiń traektoriyalarınıń mayısıwın baqlawdıń sáti tústi.

Eger kernewligi H bolǵan magnit maydanındaǵı bóleksheniń traektoriyasınıń mayısıw radiusı R bolsa, onda mınaday teńlik orın aladı:

$$R = \frac{cv}{\frac{e}{m}H}.$$

Bul teńlikte $\frac{e}{m}$ - bóleksheniń zaryadınıń massasına qatnası, v - bóleksheniń tezligi. Bóleksheniń qozǵalıw muǵdarı mv nı p arqalı belgilep, mınanı alamız:

$$p \cdot c = eRH.$$

Solay etip, eger bóleksheniń zaryadı belgili bolsa, R menen H boyınsha onıń qozǵalıw muǵdarın anıqlawǵa boladı. Bóleksheniń salıstırmalıq teoriyasınıń formulaları orınlanatuǵındaý dárejedeǵı úlken tezliklerinde $p \cdot c$ shaması bóleksheniń energiyası W ge juwıq túrde teń:

$$W = p \cdot c.$$

Bunnan, eger bóleksheniń zaryadı belgili bolsa, onda Vilson kamerasında ótkerilgen baqlawlar boyınsha bóleksheniń energiyası haqqında gáp etiwge bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı.

Traektoriyanıń mayısqaqlıq radiusı R menen bir qatarda bóleksheniń xarakteristikası ushın Vilson kamerasındaǵı onıń izin de paydalanıwǵa boladı. Jolınıń uzınlıǵınıń bir birligindeǵı bóleksheniń tárepinen payda etiletuǵın ionlastırıw qanshama kúshli bolsa, onıń izi sonshama juwan boladı. Teoriya tez qozǵalatuǵın bóleksheniń payda etken ionizaciyanıń shama menen onıń zaryadınıń kvadratı e^2 qa proporcional, onıń tezligine keri proporcional ekenligin hám bóleksheniń massasına is júzinde gárezli emes ekenligin kórsetedi.

Kosmoslıq nurlar tárepinen payda etilgen bólekshelerdiń jollarınıń izlerin izertlew 1932-jılı Anderson tárepinen pozitronlardıń ashılıwına alıp keldi. Fotosúwretlerde magnit maydanınıń tásinde bólekshelerdiń izleriniń qarama-qarsı baǵıtlarǵa awısqaqan jupların kóriwge boladı. Izlerdiń usınday túri bólekshelerdiń tek zaryadınıń belgisi boyınsha ayrılatuǵınlıǵın, usınıń menen birge izlerdiń birewiniń elektronǵa tiyisli ekenligi gúmánisiz. Solay etip, elektronǵa uqsas bolǵan, onnan tek zaryadınıń belgisi menen ayrılatuǵın bóleksheniń bar ekenligi tabıldı. Bizniń joqarıda kórgenimizdey (377-paragraf), keyinirek pozitronlar yadrolıq aylanıslardıń basqa tiplerinde de tabıldı.

Kosmoslıq nurlar tárepinen payda etilgen bólekshelerdi Vilson kamerasınıń járdeminde baqlaw dáslepki waqıtları úlken kemshilikke iye boldı. Tez ushatuǵın kosmoslıq bólekshelerdiń payda bolıwı salıstırmalı siyrek bolatuǵın waqıya bolǵanlıqtan kór sanlı súwretlerdi túsiriwge tuwrı keledi. Nátiyjede túsirilgen súwretlerdiń basım kópshiliginde hesh nárese de bolmaydı hám tek olardıń ayırımlarında ǵana tosınnan bólekshelerdiń traektoriyalarınıń izleri tabıladı.

Bul usıldı jetilistiriw Bleket hám Okkialini tárepinen ámelge asırıldı. Olar Vilson kamerasın eki esaplaǵıstırın arasına jaylastırdı. Esaplaǵıstırın ekewi de bir waqıtta bóleksheni registraciyalanǵan momentte, yaǵnıy bóleksheni eki esaplaǵısh arqalı ótken jaǵdayda súwretke túsiriw júrgizilgen. Usınday jollar menen paydasız túsirilgen súwretler saplastırılǵan. Usınday avtomat túrde háreket etetuǵın kameralardıń járdeminde nóserler dep atalatuǵın, yaǵnıy bir waqıtta kóp sanlı bóleksheler payda bolatuǵın aǵıslar ashıldı. Bunday nóserler tiykarınan úlken massaǵa iye qattı denelerde, mısalı kameranıń diywallarında payda boladı. Eger kameranıń ishine qorǵasın diywaldı jaylastırsa, onda usı diywaldıǵı nóserdiń payda bolıwın baqlawǵa boladı. 7-súwrette (qosımshaǵa qarańız) ishinde úsh qorǵasın plastinkalar jaylastırılǵan kameranıń járdeminde túsirilgen eki

fotosúwret kórsetilgen. Izi joqarıda kórinip turǵan bir kosmoslıq bólekshe birinshi plastinkada úsh tez bóleksheniń payda bolıwına, al olardıń hár qaysısınıń kelesi plastinkada kóp sanlı jańa bólekshelerdi payda etetuǵınlıǵın kórinip tur. Nátiyjede kaskadlıq nóser payda bolǵan.

Nóserlerdiń payda bolıwın bilayınsha túsindiriwge boladı. Úlken tezlikke iye bolǵan zaryadlangan bóleksheniń energiyasınıń joǵalıwınıń eki túri bar:

a) *ionizaciyalıq joǵaltıw*, zaryadlangan bólekshe qasınan ótken bólekshelerdiń ionlanıwın boldıradı;

b) *radiaciyalıq joǵaltıw*, yadronıń qasınan ótip baratırǵan zaryadlangan bólekshe usı yadronıń maydanında tezleniw aladı hám nátiyjede ol nurlandıradı. Eger bólekshelerdiń tezligi úlken bolsa, onda nurlanıw júdá ótkir boladı, yaǵnıy úlken energiyaǵa iye γ -fotonlardan turadı. Eger bunday fotonniń energiyası $2m_0c^2$ shamasınan ádewir úlken bolsa (m_0 arqalı elektronniń tınıshlıqtaǵı massası belgilengen), onda zatta qozǵalıwınıń barısında fotonniń energiyası joqarı bolǵan pozitron-elektron jubın payda ete alıwı múmkin (377-paragraf). Bul bólekshelerdiń hár qaysısı bolǵan pozitron menen elektron γ -fotonlardı nurlandıradı, al payda bolǵan bul fotonlar óz gezeginde juplardı payda etedi h.t.b. Jańa bólekshelerdiń payda bolıw processı payda bolǵan elektronlardıń energiyası bazı bir kritikalıq mánisten kishi bolǵansha dawam etedi. Payda bolǵan bólekshelerdiń jıynaǵı nóserdi payda etedi.

Energiyanıń radiaciyalıq joǵalıwları menen juplardıń payda bolıw itimallıǵı nurlanıw ótetuǵın zattıń atomlarınıń zaryadlıq sanınıń kvadratı Z^2 qa proporcional. Hár qıylı zatlardaǵı kosmoslıq nurlardıń jutılıwın baqlaw usınday ǵárezliktiń jumsaq qurawshı ushın durıs ekenligin kórsetedi. Sonlıqtan, *kosmoslıq nurlardıń jumsaq qurawshıların elektronlardan, pozitronlardan hám olar nurlandırǵan γ -fotonlardan turadı dep esaplawǵa boladı.*

Ótkir qurawshınıń jutılıwı basqa nızamlıqtı beredi. Ótkir qurawshını jutiw zattıń jutatuǵın qatlamındaǵı elektronlardıń sanınan ǵárezli. Bul ótkir qurawshınıń tek energiyaniń ionizaciyalıq joǵalıwın beretuǵınlıǵın ańǵartadı. Ótkir qurawshını payda etetuǵın bólekshelerdiń tábiyatı kóp waqıtlarǵa shekem belgisiz bolıp keldi. Tek 1936-1937 jılları ótkerilgen jumıslardıń nátiyjesinde bul qurawshınıń mezonlar atamasına iye bolǵan bólekshelerdiń ayırıqsha túrinen turatuǵınlıǵın málim boldı.

Eń sońǵı waqıtları N. A. Dobrotin menen V. I. Vekslerdiń baqlawlarınıń nátiyjesinde atomlardıń yadroları menen elektromagnitlik emes óz-ara tásirlesiwlerdiń nátiyjesinde nóserlerdiń payda bolatuǵınlıǵı tabıldı ("elektronlıq-yadrolıq" nóserler).

§ 384. Mezonlar. Kosmoslıq nurlardıń payda bolıwı. Energiyanıń radiaciyalıq joǵalıwları bóleksheniń massasınıń kvadratına proporcional. Sonlıqtan "jeńil" elektronlar menen pozitronlar energiyaların barlıq waqıtta radiaciyaǵa jumsaydı hám kosmoslıq nurlardıń ótkir qurawshısın bere almaydı. "Awır" protonlar júdá az nurlandıradı, sonlıqtan kosmoslıq nurlardıń ótkir qurawshısın júdá úlken energiyaǵa iye protonlardan turadı dep boljawǵa bolar edi. Biraq, bir qatar faktler bul gipotezaǵa qayshı keledi yamasa, eń keminde, ótkir qurawshınıń quramına tek protonlardıń ǵana kirip qoymaytuǵınlıǵın kórsetedi. Másele sonnan ibarat, Vilson kamerasınıń járdeminde alınǵan súwretler ótkir qurawshıda magnit maydanında hár qıylı táreplerge qaray awısatuǵın, yaǵnıy oń zaryadlangan hám teris zaryadlangan bólekshelerdiń bar ekenligin kórsetti. Usınıń menen bir qatarda tez qozǵalatıwın protonlardıń hawanı kúshli ionlastırıwı kerek hám sonlıqtan olardıń izleri juwan boladı. Haqıyatında, ótkir qurawshıda bar bolǵan bólekshelerdiń traektoriyaları elektronlar menen protonlar qaldıratuǵın izlerdiń juwanlıǵınıń arasındaǵı ortasha túrge iye. Bunnan ótkir qurawshıda massası proton menen elektronniń massalarınıń arasında bolǵan bóleksheler qatnasadı degen boljaw payda boldı. Bul bóleksheler *mezonlar* atamasına iye boldı (grek tilinde "mezos" "ortasha" mánisin ańǵartadı). Andersonniń, Neddermayerdiń hám basqalardıń jumıslarında mezonlardıń massalarınıń elektronniń massasınan shama menen 200-300 ese úlken ekenligi anıqlandı. Mezonlardıń oń zaryadqa iye bolıwı da, teris zaryadqa iye bolıwı da múmkin; san mánisi boyınsha mezonlardıń zaryadı elektronniń zaryadı $|e|$ ge teń. Teńizdiń

qáddindegi mezonlardıń ortasha energiyası $\sim 3 \cdot 10^9$ eV ke teń, biraq energiyası 10^{10} eV hám onnan da joqarı bolǵan mezonlar tabıladı. Házirgi waqıtları mezonlardıń qásiyetlerin úyreniw boyınsha kóp sanlı izertlewler alıp barılmaqta. Bul izertlewlerdiń ádewir úlken bólimi sovet fiziklerine tiyisli.

Tez elektronlar sıyaqlı, mezonlar da nóserlerdi payda ete aladı. 8-súwrette (qosımshaǵa qarańız) Vilson kamerasında alınǵan mezonlar payda etken nóserlerdiń fotosúwretleri kórsetilgen. Kamera úsh qorǵasın diywallar menen bólingen. Mezon (joqarıdaǵı bir bóleksheniń izi) birinshi plastinka arqalı energiyasın derlik ózertpey ótken; ekinshi plastinkada ol nóserdi payda etken. Bul nóser úlken ótiwshilik qásiyetlerge iye bólekshelerden turadı, olardıń kópshiligi úshinshi plastinka arqalı tezligin sezilerliktey ózertpesten ótedi. Bazı bir bóleksheler úshinshi plastinkada ekinshi úlken bolmaǵan nóserlerdi payda etedi.

Mezonlar tárepinen payda etilgen nóserlerdi eki tipke bóliwge boladı:

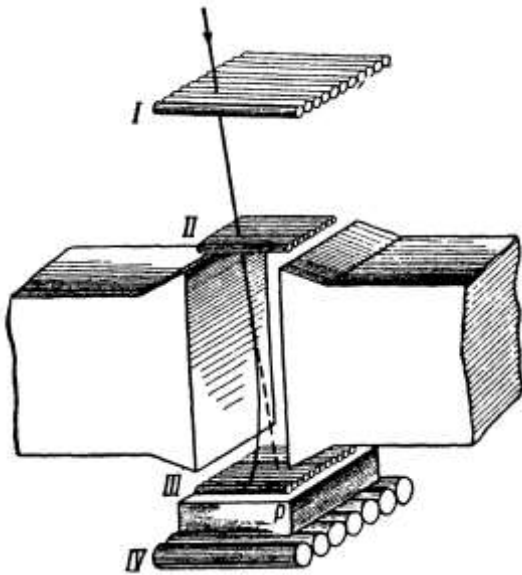
a) mezonlar tárepinen yadrolardan urıp shıǵarılǵan tez qozǵalatuǵın elektronlar payda etken *ionizaciyalıq nóserler* hám

b) *radiaciyalıq nóserler*, mezonlar yadrolardıń qasınan ótkende júdá ótkir γ -nurların payda etedi; al payda bolǵan bul γ -nurlar elektron-pozitronlar jupların hám nóserdi payda etedi.

V 1946-1947 jılları A. I. Alixanov, A. I. Alixanyan hám olardıń bassılıǵında isleytuǵın izertlewshiler gruppası Alagez tawında teńizdiń qáddinen 3250 m biyiklikte kosmoslıq bólekshelerdiń massaların ólshedi. Olar paydalanǵan ásbap sxema túrinde 416-súwrette keltirilgen. Esaplaǵıshlardıń úsh I, II hám III qatarları (hár bir esaplaǵısh trubka túrine iye) sáykes keliw sxeması boyınsha tutastırılǵan (371-paragraf). Sáykes radiotexnikalıq sxemanıń járdeminde bólekshe esaplaǵıshlardıń barlıq úsh sisteması arqalı ótkende neon lampaları janadı. Usınıń menen birge olar qaysı esaplaǵısh arqalı bóleksheniń ótken ekenligin de kórsetedi. II hám III esaplaǵıshlarınń sistemalarınń arasına úlken magnittiń polyusları jaylasqan. Esaplaǵıshlardıń I hám II sistemalarınń arasındaǵı bóleksheniń traektoriyası tuwrı sızıq túrine iye. Eger magnit maydanı bolmaǵanda bólekshe bunnan keyin de tuwrı sızıqlı qozǵalǵan bolar edi (416-súwrettegi punktir sızıq). Haqıyqatında bóleksheniń tarektoriyası dóńgelektiń dugası túrine iye boladı. Onıń iymeklik radiusın anıqlawǵa boladı. Sebebi III sistemaniń qaysı esaplaǵıshı arqalı bóleksheniń ótkenligi belgili. Esaplaǵıshlardıń III sistemasınıń artında P qorǵasın plastinkası hám esaplaǵıshlardıń IV sisteması jaylasqan. Ásbaptıń bul qosımsha bólimi baqlanatuǵın bólekshelerdiń ótiw qábiletligin tabıw ushın qollanıladı. Bóleksheniń traektoriyasınıń iymeklik radiusı hám onıń óte alıwshılıq qábiletligi boyınsha onıń massasın tabıwǵa boladı.

Házirgi waqıtları massası elektronlıq massadan 200-300 ese úlken bolǵan mezonlardan (μ -hám π -mezonlar) basqa massası 500-600 elektronlıq massaǵa teń bólekshelerdiń hám massası shama menen 1000 elektronlıq massaǵa teń bolǵan K-bóleksheler dep atalatuǵın bólekshelerdiń bar ekenligi belgili⁶⁵. Eń aqırında, kosmoslıq nurlanıwdıń quramında massası proton menen deytronniń massalarınń arasında bolǵan awır bóleksheler de tabıldı ("giperonlar").

⁶⁵ Házirgi fizika boyınsha mezon (áyymgi grek tilinde μέσος "ortasha") nollik barionlıq sanǵa iye bolǵan adron bolıp tabıladı. Elementar bólekshelerdiń standart modelinde mezonlar birdey sandaǵı kvarklar menen antikvarklardan turatuǵın quramlıq elementar bólekshe. Mezonlarǵa pionlar (π -mezonlar), kaonlar (K -mezonlar) hám basqa da awıraraq bolǵan mezonlar kiredi. Pionlar bolıp tabılatuǵın π^+ mezonniń massası 139,6 MeV, al elektr zaryadına iye bolmaǵan π^0 mezonniń massası 135,0 MeV. Al kaonlardıń massası 493-498 MeV tiń átirapında. Mezonlardıń ishindegi massası úlken bolǵan bóleksheni Ipsilon (Y) dep ataydı. Onıń massası 9460 MeV (Awdarıwshılar).



416-súwret.

Kosmoslıq bólekshelerdiń massaların
anıqlaytuǵın A.I.Alixanov penen
A.I.Alixanyannıń ásbabınıń sxeması.

Mezonlardıń qásiyetlerin bunnan bılay úyreniw olardıń ornıqlı emes hám ıdıraytuǵınlıǵın kórsetti. Mezonlardıń ıdırawı Vilson kamerasında hám qalıń qatlamlı plastinkalar usılınıń járdeminde anıqlanǵan. Mezonlardıń jasaw waqıtı 417-súwrette kórsetilgen dúzilistiń járdeminde ólshendi. Esaplaǵıshlardıń sisteması mezonnıń ótiwin belgileydi, al bul bólekshe bunnan keyin P qorǵasın plastinkasınıń járdeminde tormozlanadı. Mezonnıń ıdırawınıń nátiyjesinde jańa bólekshe payda boladı. Bul bólekshe DF traektoriyası boyınsha qozǵaladı hám B esaplaǵıshları tárepinen registraciyanaladı. Arnawlı radiotexnikalıq dúzilistiń járdeminde "jańa" bóleksheniń ushıp shıǵıwındaǵı "keshigiwdi" ólshewge boladı.

Mezonlardıń qásiyetlerin úyreniw ushın qalıń qatlamlı fotoplastinkalar usılı jemisli bolıp shıqtı. 371-paragrafta bul usıldıń birinshi ret L.V.Mısovskiy hám A.P.Jdanov tárepinen júzege keltirilgenligi hám paydalanılǵanlıǵı kórsetildi. Házirgi waqıtları mezonlardıń bir neshe sortınıń bar ekenligi tabıldı. Eń birinshi mezonlar oń, teris hám neytral mezonlar bolıp tabıladı (π^+ , π^- hám π^0 -mezonlar). Olardıń massaları elektronnıń massasınan shama menen 280 ese úlken. Zaryadlanǵan π -mezonlar ádewir jeńil bolǵan hám elektronnıń massasına shama menen 215 ese úlken hám zaryadı dáslepki π -mezonnıń zaryadınday bolǵan mezonlarǵa (μ -mezonlar dep atalatuǵın mezonlarǵa) aylanadı ("ıdıraydı"). Usınıń menen birge jáne bir jeńil bólekshe (ν neytrino bolıwı itimal) shıǵarıladı. π -mezonlardıń jasaw waqıtı júdá kishi, shama menen 10^{-8} sek. Payda bolǵan μ -mezonlar da ornıqlı emes hám $2,2 \cdot 10^{-6}$ sek shamasına teń bolǵan yarım ıdıraw dáwiriniń ishinde elektrongá (yamasa pozitrongá) hám eki neytrinoǵa ıdıraydı. Solay etip, mezonlardıń ıdırawınıń ulıwma sxeması mınaday túrge iye boladı:

$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu \rightarrow \pm e + \nu + \nu.$$

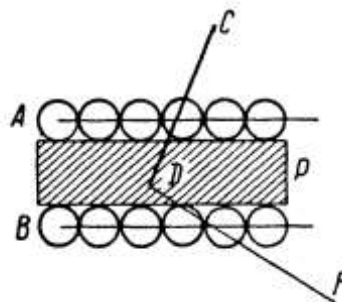
π -mezonnıń μ -mezonǵa aylanıwınıń qalıń qatlamlı fotoplastinkadaǵı izler boyınsha tabılıwı múmkin.

Elementar bólekshelerdiń áhmiyetli bolǵan xarakteristikası bolıp olardıń spini xızmet etedi. π -mezonlardıń spini nolge teń, μ -mezonlardıń spini protonlar menen neytronlardıń spinleri sıyaqlı $\frac{1}{2}$ ge teń⁶⁶.

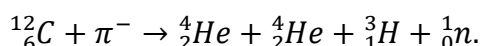
⁶⁶ Bul, álbette, durıs emes. Barlıq mezonlardıń spinleri nolge yamasa pútin sanǵa teń (Awdarıwshılar).

417-súwret.

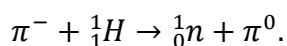
Mezonlardıń jasaw waqıtın anıqlaw.



Mezonlar atomlardıń yadroları menen soqlıǵısqanda yadrolıq aylanıslardı júzege keltire aladı. Bunday aylanısqqa misal sıpatında π^- -mezonnıń tásirinde uglerod yadrosınıń bóleklerge bóliniwi bolıp tabıladı:



π^- -mezon menen proton soqlıǵısqanda neytron menen neytral mezonnıń payda bolıwı múmkin:



Neytral mezon ornıqlı emes hám eki fotonǵa aylanadı: $\pi^0 \rightarrow 2h\nu$. Neytral mezonnıń jasaw waqıtı shama menen $3 \cdot 10^{-14}$ sek. π -mezonlar júdá yadrolıq aktiv bólekshe bolıp tabıladı, yaǵnıy olar yadrolıq reakciyalardı jeńil júzege keltire aladı. π -mezonnıń yadronıń ishine kiriwi múmkin, usınıń nátiyjesinde yadronıń "partlanıwı", yaǵnıy yadronıń kóp sandaǵı ayırım bólekshelerge ıdırawı orın aladı. A. P. Jdanov qalıń qatlamlı fotoplastinkalarda "juldızlardıń" payda bolıwın, yaǵnıy bir noqattan hár qıylı táreplerge qaray baǵıtlangan bólekshelerdiń traektoriyaların baqladı. Oǵan bir jaǵdayda bir noqattan 47 hám ekinshi jaǵdayda 35 traektoriyanıń shıǵıwın baqlawdıń sáti tústi. Plastinkanıń fotografiyalıq qatlamınıń quramına zaryadlıq sanı 47 ge teń bolǵan gúmis hám zaryadlıq sanı 47 ge teń bolǵan brom kiretuǵın bolǵanlıqtan, juldızlardıń payda bolıwın bul elementlerdiń yadrolarınıń júdá úlken energiyaǵa iye bolǵan kosmoslıq bóleksheniń tásirindegi tolıq qıyrawı dep qarawǵa boladı. P. I. Lukirskiy menen N. A. Perfilov qalıń qatlamlı fotoplastinkalarda payda bolǵan izler boyınsha atomnıń yadrosına kelip urılǵanda teris zaryadlangan mezonnıń yadronıń partlanıwın júzege keltiriwge qáiletli ekenligin kórsetti; bunday jaǵdayda yadro onı quraytuǵın protonlar menen neytronlarǵa bólinedi.

μ -mezonlardıń π -mezonlardan ózgesheligi olardıń yadrolıq aktiv emesliginde. Usı waqıtlarǵa shekem μ -mezonlardıń tásirindegi yadrolardıń ıdırawı baqlanǵan joq.

Júdá úlken energiyaǵa iye bolǵan bólekshelerdiń bar ekenligi ayırım waqıtları (júdá siyrek) onlaǵan mırn kvadrat metr maydandı óziniń ishine qamtıp alatuǵın oǵada úlken nóserlerdiń bolatuǵınlıǵın menen tastıyqlanadı. Bunday nóserdi payda etetuǵın bóleksheniń energiyası 10^{15} - 10^{17} eV shamasınan kem bolmawı kerek.

Mezonlardıń ıdırawınıń bar ekenligi mezonlardıń atmosferadaǵı kúshli jutılatuǵınlıǵı menen tastıyqlanadı. Atmosferadaǵı mezonlardıń baqlanatuǵın jutılıwı esaplawlar jolı menen alınǵan mezonlardıń qorǵasındaǵı yamasa basqa da tıǵız zatlardaǵı jutılıwınan úlken bolıp shıqtı. Bul atmosferada qozǵalıwınıń barısında mezonlardıń bir bóleginiń ıdırap úlgeretuǵınlıǵın ańǵartadı. Mezonlardıń ólshew jolı menen alınǵan atmosferanıń belgili bolǵan qatlamındaǵı (misalı 2 km qalıńlıqtaǵı) jutılıw koefficientin kútilgen koefficient penen salıstırıp, olardıń ortasha jasaw waqıtın anıqlawǵa boladı. Usınday jollar menen alınǵan mezonlardıń jasaw waqıtınıń uzınlıǵı tikkeley ólshewlerde alınǵan mánisten úlken bolıp shıǵadı. Bul mınaday jaǵday menen baylanıslı: qorǵasınıń qatlamında irkilip qalǵan, yaǵnıy waqıttıń esaplanıwı ótkeriletuǵın koordinatalar sistemasına salıstırǵanda derlik tınıshlıqta bolatuǵın mezonlardıń jasaw waqıtınıń uzınlıǵı tikkeley ólshevedi. Al atmosferada bolsa mezon jaqtılıqtıń tezligine jaqın tezlikler menen qozǵaladı. Sonlıqtan salıstırmalıq teoriyasınıń túrlendiriw formulalarına sáykes waqıttı "qaytadan ólshew" di ótkeriw kerek (299-paragraf). Eger usınday qaytadan esaplawdı ámelge asırsa, onda eki usıl

menen ólshengen τ lar bir birine sáykes keledi. Solay etip, tez qozǵalatuǵın mezonlardıń ústinen ótkerilgen baqlawlar salıstırmalıq teoriyasınıń waqıttı túrlendiriw formulalarınıń durıs ekenligin tekserip kóriwge múmkinshilik beredi.

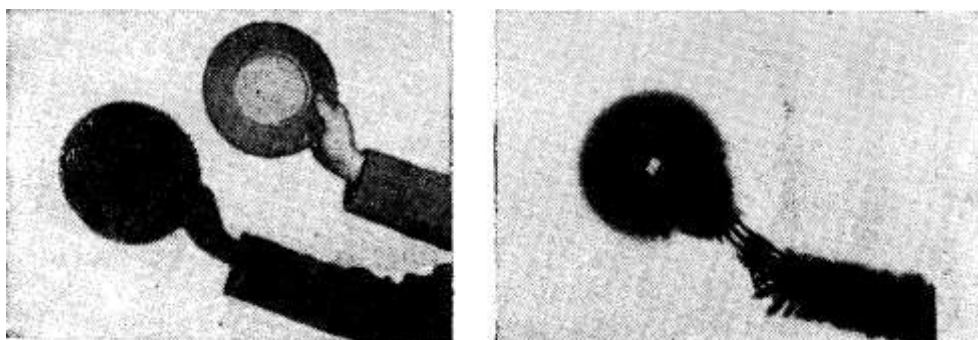
Eń aqırında kosmoslıq nurlardıń payda bolıwı haqqındaǵı máselege toqtaymız. Mezonlardıń jasaw waqıtınıń qısqa ekenligi olardıń birinshi bóleksheler bolıp tabılmaıtuǵınlıǵın kórsetedi; olar atmosferada qanday da bir basqa bólekshelerdiń tásirinde payda boladı. Mezonlardıń teńizdiń qáddindegi energiyasınıń ortasha mánisi $3 \cdot 10^9$ eV bolǵanlıqtan, birinshi bólekshelerdiń energiyasınıń shaması bul shamadan kishi bolmaıwı kerek. S. N. Vernov tárepinen shar-zondlardıń járdeminde 30 km ge shekemgi biyikliklerde ótkerilgen tuwrıdan-tuwrı ólshewler, bunday biyikliklerde hesh qanday tez ushatuǵın elektronlar menen pozitronlardıń bolmaıtuǵınlıǵın kórsetti. Ekinshi tárepten, S. N. Vernov penen N. A. Dobrotinniń birgeliktegi jumıslarında Jerdiń magnit maydanınıń birinshi kosmoslıq nurların shıǵısqa qaray awıstıratuǵınlıǵın kórsetti. Oń zaryadlangan bóleksheler usınday awısıwǵa ushırawı kerek. Bul bólekshelerdiń úlken bolmaǵan bólimi atmosferada ádewir úlken tereńliklerge shekem ótedi (Alixanov penen Alixanyannıń Alagez tawındaǵı ólshewleri), olardıń kópshiligi atomlardıń yadroları menen óz-ara tásirlesiwdiń saldarınan mezonlardıń (ótkir qurawshı) hám elektronlar menen pozitronlardıń (jumsaq qurawshı) payda bolıwına alıp keledi.

Sońǵı waqıtları júdá tez ushatuǵın α -bóleksheleri yamasa protonlar menen hár qıylı qattı zatlardan turatuǵın nıshanalardı bombalaw jolı menen mezonlardı jasalma túrde alıwdıń sáti tústi. Bunday jaǵdayda qalıń qatlamlı fotoplastinkalarda π -mezonlardıń izleri registraciyalandı. Mezonı elektronlarınıń energiyası 335 MeV bolǵan elektronlıq sinxrotronda jasalma túrde alınǵan ótkir γ -nurları menen nıshananı nurlandırǵanda da alındı.

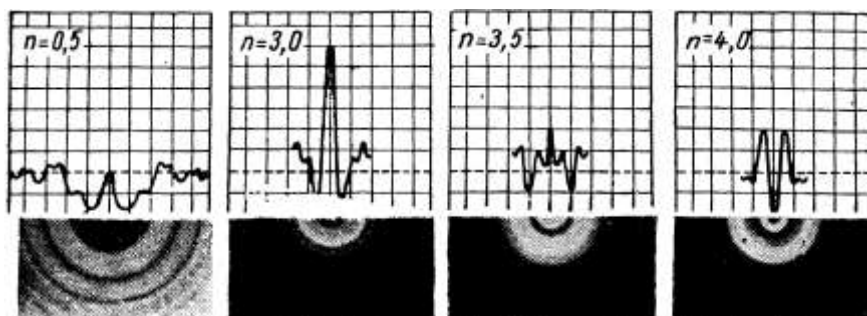
Birinshi kosmoslıq nurlardıń derekleri usı waqıtlarǵa shekem belgisiz bolıp kelmekte. Kosmoslıq nurlar Jer sharına dúnyalıq keńisliktiń barlıq bólimlerinen keledi. Olardıń payda bolıwın Quyashtaǵı yamasa ayırım juldızlardaǵı qanday da bir belgili bolǵan processler menen baylanıstırıwdıń sáti túspedi. YA. P. Terleckiy zaryadlangan bóleksheler juldızlardıń átirapında payda bolatuǵın elektromagnit maydanında tezleniw aladı degen gipotezanı usındı. Bunday elektromagnit maydan juldızlardıń magnit momenti bar bolǵan jaǵdayda hám juldız usı magnit momentiniń kósherine parallel bolmaǵan kósherdiń dógeresinde aylanǵanda payda boladı. Bunday juldız oǵada úlken bolǵan tábiyiy betatrondı payda etedi.

Tezleniwdiń basqa mexanizmi Fermi tárepinen usınıldı. Onıń teoriyasında bóleksheler energiyanı biziń Galaktikamızda qozǵalatuǵın gazdıń kúshli ionlasqan bultı tárepinen payda etilgen magnit maydanı menen tásirlesiwdiń barısında juldızlar aralıq zattıń kinetikalıq energiyasınan alınadı.

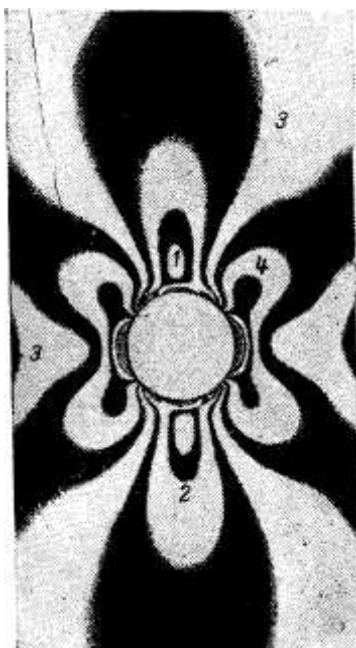
QOSIMSHA



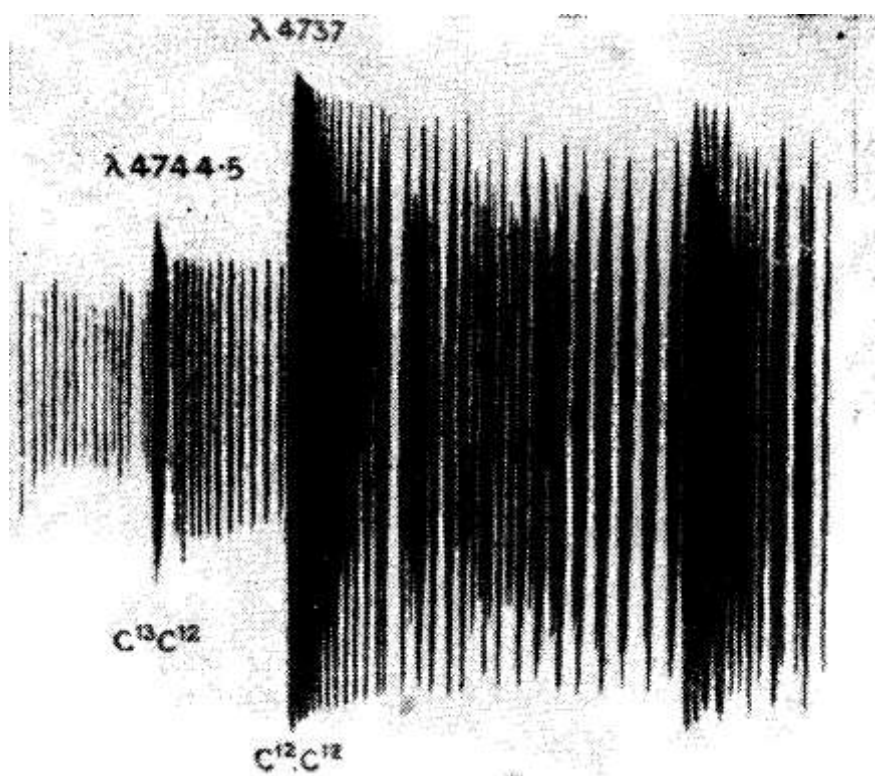
1-súwret. Saya payda bolǵandaǵı nurlardıń difrakciyası.



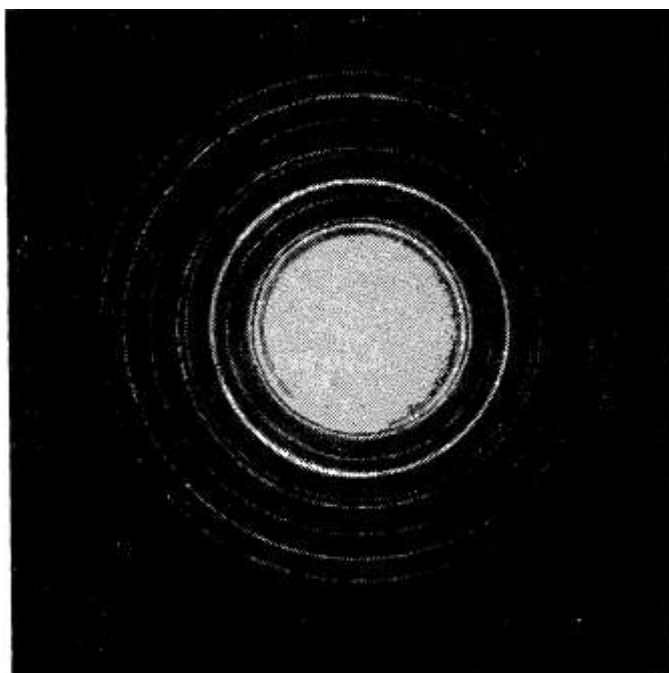
2-súwret. Dóńgelek sańlaqtan alınatuǵın difrakciya.



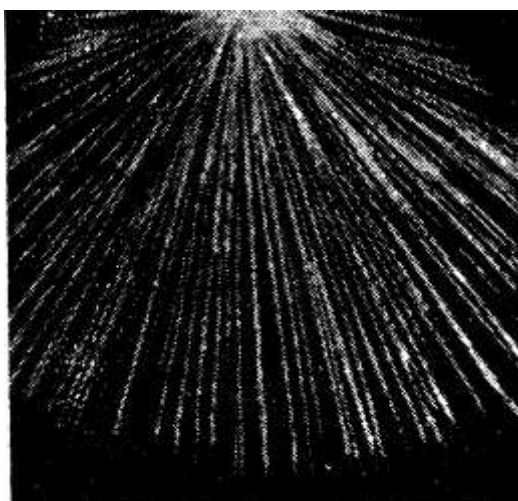
3-súwret.
Dóńgelek tesigi bar plastinkanı sozǵanda
payda bolatuǵın izoxromlar.



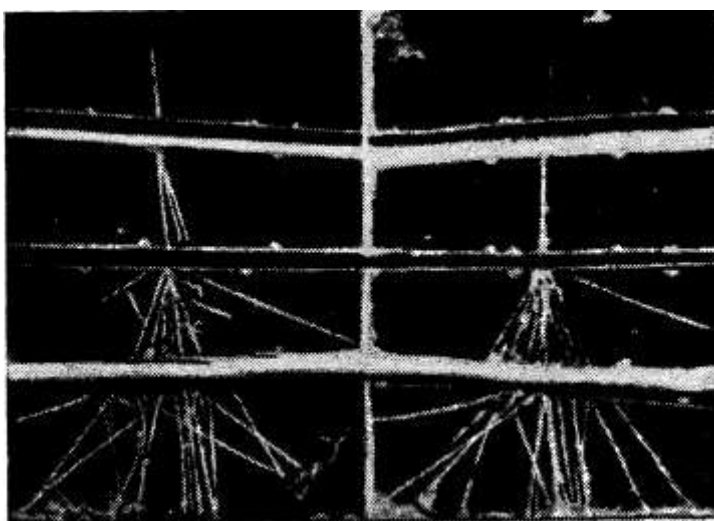
4-súwret. C_2 jolaqlarınıń izotoplıq jılıwı.



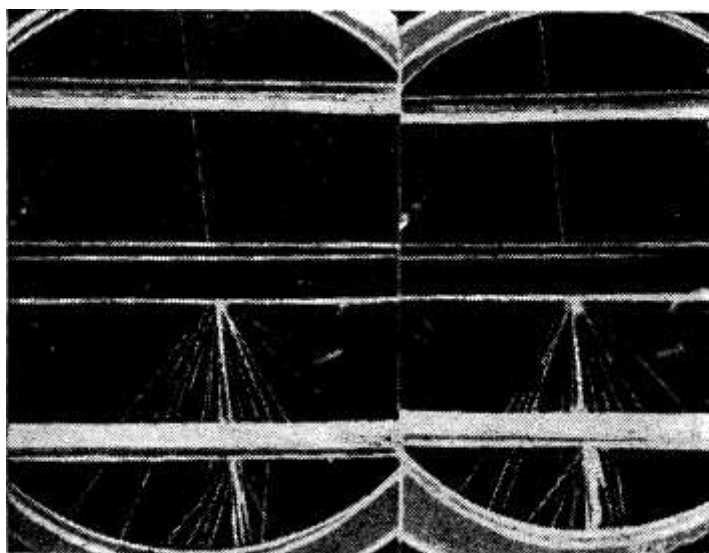
5-súwret. Elektronlardıń mis folga arqalı ótiwinde payda bolatuǵın difrakciyalıq dóńgelekter.



6-súwret. α -bóleksheleriniń izleri.



7-súwret. Kaskadlıq nóserdiń payda bolıwı.



8-súwret. Mezon payda etken nóser.

