

S. E. FRISH hám A. V. TIMOREVA

ULIWMA FIZIKA KURSI

TOM II

ELEKTRLIK XÁM ELEKTROMAGNITLIK QUBILISLAR

**Dúzetilgen hám tolıqtırılğan toǵızınshı basılıwınan
qaraqalpaq tiline awdarıldı.**

**RSFSR Joqarı hám orta arnawlı bilim ministrligi tárepinen mámleketlik universitetler ushın
oqıwlıq sıpatında qabıl etilgen.**

MAZMUNI

**TÓRTINSHI BÓLIM
ELEKTROSTATIKA**

XV bap. Tiykargı elektrostatikalıq qubılıslar

§ 120. Kirisiw.

§ 121. Elektr zaryadları.

§ 122. Ótkizgishler hám izolyatorlar.

§ 123. Elektrostatikalıq maydan. Kulon nızamı.

§ 124. Elektrostatikalıq maydannıń kernewligi

§ 125. Kernewlik sıızqları.

§ 126. Kernewlik aǵısı. Ostrogradskiy-Gauss teoreması.

§ 127. Ostrogradskiy-Gauss teoremasın qatańıraq keltirip shıǵarıw.

§ 128. Ostrogradskiy-Gauss teoremasınıń qollanıluwı.

§ 129. Elektrostatikalıq maydannıń kúshleriniń jumısı. Potencial

§ 130. Potencialdıń qáddilerniń beti.

§ 131. Elektr maydannıń kernewligi menen potencial arasındagı baylanıs.

§ 132. Kernewlilik, potencial hám kólemlik zaryadlardıń tıǵızlıǵı arasındagı baylanıs.

§ 133. Elektr maydannıń ótkizgishler.

§ 134. Ótkizgishtiń betiniń qasındagı maydannıń kernewligi.

§ 135. Sırtqı elektr maydannıń dipol.

§ 136. Ótkizgishlerdiń elektr sıyımlıǵı.

§ 137. Zaryadlardıń sistemasınıń energiyası.

§ 138. Elektrostatikalıq maydannıń energiyası.

XV bap. Dielektriklerdegi elektrostatikalıq qubılıslar.

§ 139. Dielektrikler. Dielektrik turaqlı.

§ 140. Dielektrik bar bolǵan jaǵdaydaǵı kondensatordıń energiyası. Dielektriktegi maydannıń energiyası.

§ 141. Dielektriklerdiń polarizaciyası.

§ 142. Dielektriktegi maydannıń kernewligi.

§ 143. Dielektrikler bar bolǵan jaǵdaydaǵı zaryadlangan denelerge tásir etetuǵın kúshler.

§ 144. Elektrostatikalıq indukciya vektorı.

§ 145. Zaryadqa tásir etetuǵın kúshler boyınsha **E** hám **D** vektorların anıqlaw.

§ 146. Dipollik dielektrikler. Molekulalardıń dipollik momentlerin anıqlaw.

- § 147. Kristallardıń dielektriklik qásiyetleri. Pezoelektrik.
- § 148. Kondensatorlar.
- § 149. Kondensatorlardıń hár qıylı tipleri.
- § 150. Potenciallar ayırmasın ólshew.
- § 151. Júdá kishi zaryadlardı ólshew. Elektronnıń zaryadı.
- § 152. Elektrostatikalıq maydannıń tábiyatı.

BESINSHI BÓLIM

Turaqlı toq

XV bap. Turaqlı toqtıń tiykarǵı nızamları.

- § 153. Turaqlı toq. Om nızamı.
- § 154. Ótkizgishlerdiń qarsılıǵı.
- § 155. Toqtıń tıǵızlıǵınıń vektorı.
- § 156. Zaryadlardıń saqlanıwı. Stacionar toqlardıń tuyıqlıǵı.
- § 157. Djoul-Lenc nızamı.
- § 158. Toq kúshi menen potenciallar ayırmasın ólshew.
- § 159. Qarsılıqlar hám olardı ólshew.
- § 160. Ótkizgishlerdegi erkin elektronlar. Klassikalıq kóz-qaraslar.
- § 161. Klassikalıq elektronlıq teoriya kóz-qarası boyınsha Om hám Djoul-Lenc nızamları.
- § 162. Metallardıń elektr ótkizgishligi menen jıllılıq ótkizgishligi arasındaǵı baylanıs.
- § 163. Metallardıń elektr ótkizgishliginiń kvantlıq teoriyası.
- § 164. Turaqlı toqtıń tuyıq shınjırı.
- § 165. Turaqlı toq shınjırında bólinip shıǵatuǵın energiya.
- § 166. Bir tekli emes shınjır ushın Om nızamı. Kirxgof nızamı.
- § 167. Kirxgof teńlemelerin ayırım máselelerdi sheshiw ushın qollanıw.
- § 168. Kontaktlıq potenciallar ayırması.
- § 169. Galvanikalıq elementler.
- § 170. Termoelektrik qubılıslar.
- § 171. Yarım ótkizgishler.
- § 172. Qızdırılǵan ótkizgishler tárepinen elektronlardıń shıǵarılıwı.
- § 173. Termoelektronlıq emissiya teoriyası.

XVI bap. Elektrolitler menen gazlerdegi toqlar.

- § 174. Elektrolitlik ótkizgishlik.
- § 175. Faradey nızamları.
- § 176. Elektrolitlik dissociaciya.
- § 177. Eritpedegi ionlardıń energiyası.
- § 178. Elektrolitlik ótkizgishlik teoriyası.
- § 179. Elektrodlardıń polyarizaciyası.
- § 180. Elektrolizdiń texnikadaǵı qollanıwı.
- § 181. Qattı denelerdiń elektrolitlik ótkizgishligi.
- § 182. Gazlerdegi elektr toǵı.
- § 183. Gazlerdiń óz betinshe emes ótkizgishliginiń teoriyası.
- § 184. Gaz ionlarınıń molizaciya hám jılıǵıshlıq koefficientlerin eksperimentallıq anıqlaw.
- § 185. Elektr toǵınıń vakuum arqalı ótiwi.
- § 186. Bogoslovskiy-Lengmyur formulasın keltirip shıǵarıw; toq kúshiniń fluktuaciyaları.
- § 187. Elektronnıń gazdegi erkin jolınıń uzınlıǵı.
- § 188. Elektronlardıń atomlar hám molekular menen soqlıǵısıwı.
- § 189. Tómenge basımlardaǵı elektronlardıń gazlerdegi jılıǵıshlıǵı.
- § 190. Gazlerdiń óz betinshe ótkizgishligi.

ALTINSHI BÓLIM

ELEKTROMAGNITLIK QUBILISLAR

XVII bap. Toqlardıń magnit maydanı.

§ 191. Magnit maydanı hám onıń xarakteristikaları.

§ 192. Magnit maydanınıń kernewligin grafikalıq súwretlew.

§ 193. Toqlardıń magnit maydanın anıqlaw usılı.

§ 194. Dóngelek toq penen solenoidtıń magnit maydanı.

§ 195. Magnit maydanınıń kernewliginiń ólshem birlikleri. Birliklerdiń absolyut elektromagnitlik sisteması.

§ 196. Magnit maydanındaǵı toqqa tásir etetuǵın kúshler. Elektrik birliklerdiń xalıq aralıq sisteması.

§ 197. Magnit maydanındaǵı toǵı bar tuyıq kontur.

§ 198. Magnit kernewligi vektorınıń cirkulyaciyası.

§ 199. Magnit kernewligi vektorınıń cirkulyaciyası ushın anlatpanı paydalanıw.

§ 200. Magnetikler.

§ 201. Molekulalardıń, atomlardıń hám elektronlardıń magnit momentleri.

§ 202. Magnitleniw vektorı.

§ 203. Ferromagnetizm.

§ 204. Ferromagnetizmnıń tábiyatı.

§ 205. Turaqlı magnitler.

§ 206. Magnit indukciyası vektorınıń sıızqları. Magnit indukciyası vektorı menen magnit kernewligi vektorınıń cirkulyaciyası. SHegaralıq shártler.

§ 207. Elektrostatikalıq hám magnit maydanları arasındaǵı analogiya.

§ 208. Toq ótip turǵan ramkaǵa tásir etetuǵın kúshler boyınsha $\mathbf{H}$ hám $\mathbf{B}$ vektorların anıqlaw.

§ 209. Solenoid penen magnit arasındaǵı ayırma.

§ 210. Toq ótip turǵan konturdı magnit maydanında jılistırǵanda islengen jumıs.

§ 211. Magnitlik shınjırdıń nızamları.

§ 212. Magnit maydanı ushın Kirxgof teńlemeleri.

§ 213. Ólshew quralları.

XIX bap. Zaryadlanǵan bólekshelerdiń elektr hám magnit maydanlarındaǵı qozǵalısqı.

§ 214. Magnit maydanında qozǵalatuǵın zaryadqa tásir etetuǵın kúsh.

§ 215. Qozǵalatuǵın zaryadtıń magnit maydanı.

§ 216. Qozǵalatuǵın zaryadlardıń magnit maydanın eksperimentallıq úyreniw.

§ 217. Xoll effekti.

§ 218. Elektronlardıń salıstırmalı zaryadın anıqlaw.

§ 219. Oń zaryadlanǵan ionlardıń salıstırmalı zaryadın anıqlaw.

§ 220. Elektronlıq nurdıń texnikadaǵı qollanılıwı.

XX bap. Elektromagnitlik indukciya.

§ 221. Elektromagnitlik indukciya qubılısqı.

§ 222. Indukciyanıń elektr qozǵawshı kúshin anıqlaw.

§ 223. Indukciyalıq toq tárepinen alıp júriletuǵın elektr zaryadınıń muǵdarı. Magnitlik shamalardıń xalıq aralıq sistemadaǵı birlikleri.

§ 224. Indukciyanıń dara jaǵdaylardaǵı elektr qozǵawshı kúshin anıqlaw.

§ 225. Ózlik indukciya qubılısqı.

§ 226. Ajıralıw hám tutasıw ekstratoqları.

§ 227. Óz-ara indukciya.

§ 228. Toqlardıń magnit maydanınıń energiyası.

- § 229. Qaytadan magnitleniw jumısı.
- § 230. Kabeldiń ózlik indukciya koefficienti.
- § 231. Fuko toqları. Betlik effekt.
- § 232. Ózgermeli toq.
- § 233. Ózgermeli toq shınjırındaǵı ajıralıp shıǵatuǵın quwat.
- § 234. Ózgermeli toqtıń ózlik indukciyaǵa hám sıymlılıqqa iye shınjırı.
- § 235 Dinamomashinalar hám elektromotorlar.
- § 236. Transformatorlar.
- § 237. Ózgermeli toqlardı tuwrılaw hám ólshew.
- § 238. Úsh fazalı toq.
- XXI bap. Elektromagnit terbelisler hám tolqınlar.
- § 239. Kondensatordıń terbelmeli razryadı.
- § 240. Májbúriy elektr terbelisleri.
- § 241. Katodlıq lampanıń járdeminde sónbeytuǵın terbelislerdi qozdırıw.
- § 242. Awısıw toǵı.
- § 243. Elektromagnit maydanı.
- § 244. Maksvell teńlemeleri.
- § 245. Maksvell-Lorenc teńlemeleri.
- § 246. Elektromagnit tolqınlar.
- § 247. Elektromagnit tolqınlardıń tarqalıw tezligi.
- § 248. Umov-Poynting vektóri.
- § 249 Radiotexnika. Elektromagnit tolqınlardı qozdırıwdıń hám registraciyalawdıń házirgi zaman usılları.
- Qosımsha. Elektrik hám magnitlik shamalardıń birlikleriniń sistemaları

TÓRTINSHI BÓLIM

ELEKTROSTATIKA

XIV BAP

TIYKARǴI ELEKTROSTATIKALIQ QUBILISLAR

§ 120. Kirisiw. Biziń eramızǵa shekemgi VI ásirde grek filosofi Fales Miletskiy toqıwshılar tárepinen sezilgen jún gezlemege súykelgen yantar bazı bir jeńil predmetlerdi ózine tartatuǵınlıǵı táriyipledi. Bul ilimiy ashılıw aradan eki yarım mıń jıldan aslam waqıt ótkennen keyin, 1600-jılı ingliz shıpakeri Djilbert tárepinen keńeytildi. Ol jipekke súykelgen shiyshe hám basqa da bir qatar zatlarıń tap sonday qásiyetke iye bolatuǵınlıǵın taptı. Usınday halǵa ótkerilgen denelerdi elektrlengen yamasa sózbe-sóz "yantarlǵan" degen atamaǵa iye boldı. Sebebi "elektron" sózi grekshe yantardı ańǵartadı.

Derlik eki ásirdeń dawamında - XVII ásirdeń aqırına shekem denelerdiń elektrleniwiniń úyreniw ástelik penen rawajlandı hám tiykarınan tábiyattıń basqa qubılısların úyreniwden baylanıssız halda ótkerildi. Tiykarınan súykelistiń saldarınan elektrlengen halǵa ótiw menen olardıń arasındǵı tásirlesiw kúshlerin úyreniw menen sheklendi Elektr haqqındaǵı tálimattıń bul bólimi keyinirek elektrostatika atamasına iye boldı.

1789-jılı Galvani toqtıń fiziologiyalıq tásirin ashtı. Mıs ilgektiń járdeminde házir ǵana preparatlangan qurbaqanıń arqa nervlerin ildirip alıp onı balkondaǵı temir perilaǵa ildirgende ol hár saparı qurbaqanıń muskulaları perilaǵa tiygende qısqaratuǵınlıǵın ańǵarǵan. Sol waqıtları muskulalardıń olar arqalı elektrlengen denelerdiń razryadı ótkende qısqaratuǵınlıǵı belgili bolǵan bolsa da kóp waqıtlardıń dawamında elektrlik qubılıslardıń birden-bir ekenligi anıqlanǵan joq hám "galvanikalıq elektr" menen súykelistiń saldarınan alınatuǵın elektrdi óz aldına qaraw qabıl etildi. Tek XIX ásirdeń basında ǵana elektrlik qubılıslardıń túrleriniń oǵada kóp ekenligi ashıldı: elektr toǵınıń payda bolıw shártleri úyrenildi, toqtıń jıllılıq hám magnitlik tásirleri tabıldı, dielektriklerdiń tutqan ornı anıqlandı h.t.b. XIX ásirdeń ekinshi yarımı elektr haqqındaǵı tálimattıń pátli rawajlanıwı orın aldı. Faradey menen Maksvell tárepinen elektromagnit qubılıslarınıń birligi anıqlandı, elektromagnit tolqınlar ashıldı hám jaqtılıqtıń elektromagnit teoriyası dóretildi.

Elektr haqqındaǵı tálimattıń rawajlanıwınıń principiallıq áhmiyeti júdá joqarı: bir tárepten elektrlik qubılıslardı mexanikalıq qubılıslarǵa alıp keliwdiń múmkin emes ekenligi ayqın boldı, ekinshiden, elektrlik qubılıslardıń basqa barlıq fizikalıq processlerdiń arasındǵı tereń baylanıstır bar ekenligin kórsetti. Usınday jollar menen elektr haqqındaǵı tálimat mexanikalıq materializmniń dialektikalıq materializmge ótiwine múmkinshilik berdi. Aqırında, elektrlik qubılıslardıń ámeliy qullanılıwınıń áhmiyetiniń júdá ullı ekenligi ayqın boldı.

Elektr haqqındaǵı tálimattıń rawajlanıwında rus alımlarınıń tutqan ornı ullı. XVII ásirdeń ortasında G.V.Rixman menen birgelikte gúldirmama qubılısın úyreniwdiń barısında hawanıń elektrleniwiniń joqarı kóteriletuǵın aǵıslardıń súykelisiniń saldarınan payda boladı degen juwmaqqa keldi. Lomonosovtıń ózi bolsa 1753-jılı sol waqıtlar ushın aldıńǵı qatardaǵı pikirlerden bolǵan elektrdi efirdiń bóleksheleriniń úlken tezliktegi aylanbalı qozǵalı dep boljadı. Sol 1753-jılı Peterburg Ilimler Akademiyası "Elektr kúshleriniń tábiyatı haqqında" pútkil dúnyalıq konkurs daǵazaladı. Sıylıq 1755-jılı L.Eylerge berildi. Ol elektrlengen denelerdiń bir biri menen tásirlesiwini efirdiń keriwi sıpatında túsindirdi. Peterburg akademigi Epinus sol waqıtları keń túrde paydalanılǵan "elektr suyıqlıǵı" túsigin kirgizdi jáne birinshi ret elektr hám magnit qubılıslarınıń matematikalıq teoriyasın rawajlandırdı. 1803-jılı akademik V.V.Petrov elektr doǵasın ashtı hám onı ámelde qullanıwdıń múmkinshiligin boljadı. Ol birinshilerden bolıp suyıqlıqlar arqalı toq ótkende olardıń ajralatuǵınlıǵın úyrendi. XIX ásirdeń otızınshı hám qırqınshı jılları Peterburg

Ilmiler Akademiyasınıń haqıyqıy aǵzası hám Peterburg universitetiniń professorı E.X.Lenc indukciyalıq toqtırn baǵıtı menen toqtırn jıllılıq tásirin anıqlaytuǵın júdá áhmiyetli bolǵan nızamlardı ashtı. XIX ásirdiń ekinshi yarımında A.G.Stoletov temirdiń magnitlik qásiyetlerin úyreniwdiń usılın berdi hám fotoelektrlik qubılıstı ashtı. 1895-jılı A.S.Popov radiotelegraftı oylap taptı, al bir neshe jıl ótkennen keyin P.N.Lebedev millimetrli elektromagnit tolqınların aldı. XX ásirdiń basında Moskva mámleketlik universitetiniń professorı A.A.Eyxenvald eksperimentlerde qozǵalatuǵın zaryadlardıń toq sıyaqlı magnit maydanın payda etetuǵının dálilledi. Sovet alımları elektr haqqındaǵı tálimattıń hár qıylı tarawlarında iri tabıslarǵa eristi.

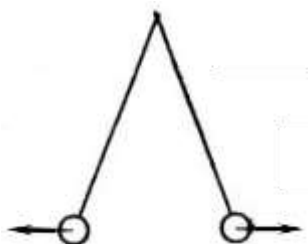
Rus alımları elektrotexnikanıń rawajlanıwında úlken orınlardı iyeledi. B.S.Yakobi birinshi bolıp elektromatordı konstrukciyaladı hám onı qayıq penen vagondı qozǵalısqı keltiriw ushın paydalandı; ol elektrolizdiń ámeliy jaqtan paydalanılıwın (galvanoplastinkanı) ashtı. P.N.Yablochkov jaqtılandırıw ushın ámelde qollanıwǵa bolatuǵın elektr doǵasın oylap taptı, al A.N.Lodigin birinshi qızdırıw elektr lampasın soqtı. P.N.Yablochkov penen I.F.Usagin birinshi bolıp elektr transformatorın, al M.O.Dolivo-Dobrovolskiy bolsa úsh fazalı toqtı praktikaǵa engizdi. N.G.Slavyanov penen N.N.Benardos elektrosvarkanı oylap taptı.

Elektrotexnikanıń házirgi zaman óndirisindegi áhmiyetli ornı biziń elimizdegi elektrotexnikanıń tutqan úlken ornın anıqladı...

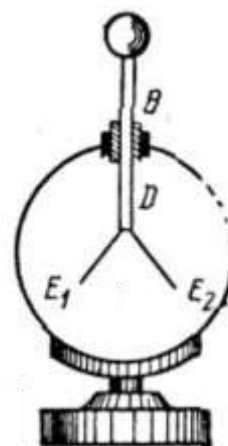
§ 251 Elektr zaryadları. Elektr haqqındaǵı tálimattıń tariyxıy rawajlanıw barısına sáykes biz bayanlawdı elektrlestiriw halınıń xarakteristikası menen elektrlengen denelerdiń óz-ara tásirlesiw nızamlarınan baslaymız. Joqarıda aytııp ótilgenindey, elektr haqqındaǵı tálimattıń bul bólimi elektrostatika dep ataladı. XVIII ásirdiń basında ótkerilgen tájiriybeler elektrlewdiń tek eki túriniń bolatuǵınlıǵın kórsetti: shıysheńi terige súykegende shıyshe alatuǵın elektrlew (onı oń dep atadı) hám terini shıyshege súykegende teri alatuǵın elektrlew (teris dep ataladı). Birdey bolıp elektrlengen deneler (mısalı oń elektrlengen) bir biri menen iyterisedi; hár qıylı elektrlengen zatlar bir birine tartıladı. Deneler bir birine tiygende elektrleniw bir deneden ekinshi denege óte aladı.

Elektrleniw halında turǵan dene zaryadqa iye dep esaplanadı hám ol deneniń elektrlengenliginiń ólshemi bolıp tabıladı. Zaryadtıń anıqlaması tómende beriledi.

Tábiyatta elektrleniw halı alıp beriletuǵın deneler bar hám olardı ótkizgishler dep ataydı. Sonıń menen birge elektrleniw halın alıp bermeytuǵın deneler de bar bolıp, olardı izolyatorlar dep ataydı.



1-súwret. Elektrlengen shariklerdiń bir biri menen tásirlesiwı.



2-súwret. Kishkene qaǵazları bar elektroskop.

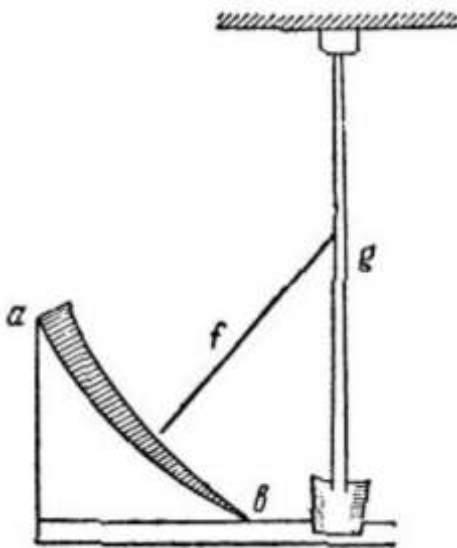
Elektrlengenlik dárejesin elektrlengen denelerdiń arasındǵı kústiń shaması boyınsha anıqlawǵa boladı. Elektrlengenlikti sapalıq jaqtan anıqlaw ushın, mısalı, uzın sabaqlarǵa ildirilgen

eki jeñil shariklerdi paydalanıwǵa boladı (1-súwret). Birdey elektrlengenlik orın alǵanda shariklerdiń arasında iyterisiw kúshleri payda boladı. Nátiyjede sharikler bir birinen uzaqlasadı, sonıń menen birge olar qanshama kúshlirek elektrlengen bolsa, onda olardıń arasındaǵı uzaqlasıw da úlken boladı. Ámelde **elektroskoplar** dep atalatuǵın arnawlı ásbaplardı paydalanadı. Olardıń biri 2-súwrette kórsetilgen.

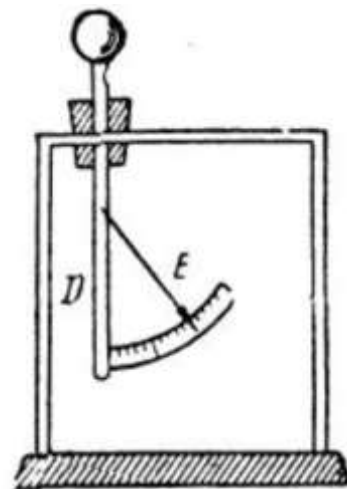
2-súwrette kórsetilgen elektroskop mınaday dúziliske iye: D metall simniń tómengi tárepinen jeñil E_1 hám E_2 alyuminiy japıraqları ildirilgen. Sol japıraqlar menen sim usı qaǵazlardı baqlaw ushın shıyshe aynaǵa iye metall qutınıń ishine B ebonit probkasınıń járdeminde bektilgen¹. Eger D simına oǵan elektrlengen deneni tiygiziw arqalı elektr zaryadı beriletuǵın bolsa, onda alyuminiy japıraqlar elektrlenedi hám bir biri menen iyterisip bir birinen ajirasadı. Olardıń ajırasıwı boyınsha olarǵa berilgen elektrlesiwdiń shamasın anıqlawǵa boladı.

Qanshama elektrleskenligin sanlıq jaqtan dál anıqlaw ushın elektroskoptıń shkalası bolıwı kerek. "Elektr kórsetkishi" yamasa elektrometr dep atalatuǵın usınday ásbaptı birinshi ret M.V.Lomonosov penen birgelikte gúldirmamadaǵı razryadlardı izertlegen G.V.Rixman 1745-jılı soqtı. G.V.Rixmannıń "elektr kórsetkishiniń" súwreti 3-súwrette keltirilgen. Bul súwrette g arqalı vertikal baǵıtta ildirilgen metall sıǵış kórsetilgen. Sıǵışqa bir ushı menen jipek sabaq f bektilgen. Elektrlestiriwde sabaq sıǵıştan iyteriledi hám onıń awısıw dárejesi aǵashtan soǵılǵan ab kvadratına qoyılǵan belgilerdiń járdeminde anıqlanadı.

Rixmannıń sxeması boyınsha soǵılǵan házirgi zaman elektrometri 4-súwrette keltirilgen. D sterjenin elektrlegende E japıraǵı qozǵalmaytuǵın D sterjeninen iyteriledi, al elektrleniwdiń dárejesinen ǵárezli bolǵan awısıwı shaması shkala boyınsha anıqlanadı.



3-súwret. G.V.Rixmannıń elektr kórsetkishi.

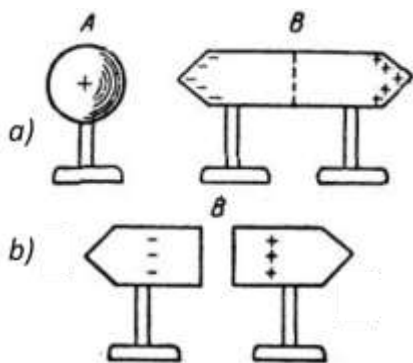


4-súwret. Elektrometr.

Elektrleniw processin túsiniwge járdem beretuǵın júdá áhmiyetli bolǵan qubılıstıń mánisi mınadan ibarat: misalı, eger oń elektrlengen deneni teris elektrley baslasa, onda onıń elektrleniw dárejesi kishireydi hám keyninen tolıq joǵaladı hám tek usınnan keyin ǵana dene teris elektrlene baslaydı. Bunnan hár *qıylı belgige iye bolǵan zaryadlardıń bir birin kompensaciyalaytuǵını* kelip shıǵadı. Bul fakt mınaday gipotezaniń payda bolıwına alıp keldi: zaryadlanbaǵan denelerde barlıq waqıtta qarama-qarsı belgilerge iye zaryadlar bar hám olardıń tásirleri bir birin tolıq kompensaciyalaytuǵınday boladı. Artıqmash oń zaryadlarǵa iye deneler oń zaryadlangan. Artıqmash teris zaryadlarǵa iye dene teris zaryadlangan. Denelerdi bir birine súykegende olardıń ekewi de elektrlenedi, olardıń biri oń zaryadqa, al ekinshisi teris zaryadqa iye boladı. Bunnan biz

¹ Bul qutınıń tutqan ornı haqqında tómende gáp etiledi (133-paragrafta).

zaryadlar payda bolmaydı hám joq bolmaydı, olardıń tek bir deneden ekinshi deneg beriliwi yamasa berilgen deneniń ishinde orın almasıwı múmkin degen juwmaqqa kelemiz. Bul jaǵday *elektr zaryadlarıń saqlanıw nızamı* ataması menen belgili hám ol elektr haqqındaǵı tálimattıń tiykarǵı nızamı bolıp tabıladı hám kóp sanlı eksperimentallıq faktlerdiń tiykarında tastıyqlanadı. Bunday eksperimentallıq faktlerdiń biri sıpatında Epinus tárepinen ashılǵan alıp keliw menen elektrlewdi (rus tilinde "elektrizaciya navedeniem") yamasa indukciyalanǵan elektrleniwdi kórsetiwge boladı.



5-súwret. Alıp keliw menen elektrlew.

Alıp keliw menen elektrlew qubılısınıń mánisi mınadan ibarat: eger izolyaciyalanǵan B ótkizgishine A zaryadlanǵan denesin alıp kelse (5-a súwret), onda B ótkizgishinde zaryadlar payda boladı. Sonıń menen birge A denesine jaqın bóliminde qarama-qarsı belgidegi zaryad, al oǵan eń uzaqlasqan bóliminde belgisi A denesiniń zaryadınıń belgisindey bolǵan zaryadlar payda boladı eken. Zaryadlanǵan A denesin alıp ketkende B denesindegi zaryadlar joq boladı. Biraq, A denesin alıp ketpesten burın B ótkizgishin ekige bólsek (5-b súwret), onda zaryadlar A denesin alıp ketkennen keyin de saqlanadı. Eger B denesinde usı dene arqalı erkin qozǵala alatuǵın oń hám teris zaryadlar (yamasa bir belgige iye bolǵan zaryadlar erkin qozǵala alatuǵın) barlıq waqıtta bar edi dep boljasa, onda Epinus tájiriyesin túsindiriw ańsat. Bunday jaǵdayda ótkizgishke oń zaryadlanǵan B denesine oń zaryadlanǵan A denesin alıp kelgende B denesinde bar bolǵan teris zaryadlar oǵan tartıladı, al oń zaryadlar onnan iyteriledi. Nátiyjede B denesiniń eki ushında hár qıylı belgige iye elektrlew payda boladı. Zaryadlanǵan A denesin alıp ketkende B denedegi zaryadlarǵa sırtqı kúshlerdiń tásiiri toqtaydı, zaryadlar "aralasadı" hám B denesiniń barlıq bólimleri qaytadan neytral boladı. Eger A denesi jaqınlatılǵan waqıtta B denesin ekige bólgen jaǵdayda usı B denesindegi zaryadlardıń aralasıwı bolmaǵan hám bul deneni ekige bólgende onıń eki bólimi elektrlengen halda qalǵan bolar edi.

B denesiniń bir birinen ajratılǵan eki bólimin bir birine tiygizgende saqlanǵan zaryadlardıń muǵdarlarıń shamarı boyınsha birdey ekenligin hám tiyiskennen keyin B denesiniń neytral bolıp qalatuǵınlıǵın ańsat kóriwge boladı.

Neytral zatlardaǵı eki belgige iye bolǵan zaryadlardıń bolıwı menen olardıń saqlanatuǵınlıǵın tolıq tastıyqlanǵan dep esaplawǵa boladı

XIII ásirdeń ortalarında payda bolǵan elektrlik qubılıslardıń birinshi teoriyası ayırıqsha elektr suyıqlıǵınıń bar dep boljadı. Bunnan keyin eki elektr suyıqlıǵı - oń hám teris suyıqlıq bar dep boljadı. Peterburg Akademiyasınıń akademigi Epinus bir elektrlik suyıqlıq teoriyasın rawajlandırdı hám onı oń suyıqlıq dep boljadı. Epinustıń teoriyası boyınsha bul suyıqlıqtıń artıqmash bolıwı oń elektrleniw halın, al jetispewi teris elektrleniw halın payda etedi. XIX ásirdeń aqırında elementar elektr zaryadınıń bar ekenligi tabıldı; atomlar yamasa molekulalar usı elementar zaryadtan pútin ese úlken bolǵan zaryadqa ǵana iye bola aladı. Bunnan keyin usınday jaǵdaydıń orın alıw sebebinıń belgili bolǵan teris e zaryadqa iye elementar bólekshelerdiń bar bolıwınıń nátiyjesi ekenligi belgili boldı; bul bóleksheler *elektronlar* atamasına iye boldı. Tómende elektronnıń tek belgili bolǵan e zaryadqa iye bolıp ǵana qoymay, belgili bolǵan m massasına da, jáne bir qatar

fizikalıq shamalarğa da (aylanbalı moment, magnit momenti) iye bolatuǵınlıǵı belgili boldı...

Elektronnıń massası eń jeńil bolǵan vodorod atomınıń massasınıń shama menen $\frac{1}{1840}$ bólegin quraydı.

Házirgi zaman kóz-qarasları boyınsha (III tomǵa qarańız), elektronı quramlıq bólek sıpatında barlıq atomlarǵa kiredi; yadro dep atalatuǵın atomnıń oraylıq bólimi atomlıq yadro dep ataladı; atomnıń massasınıń derlik barlıǵı onıń yadrosında toplanǵan. Házirgi waqıtları oń zaryadlangan elektronlardıń bar ekenligi de belgili (olardı pozitronlar dep ataydı). Biraq olar ayrıqsha sharayatlarda payda boladı hám olardı biz qaramaymız.

§ 122 Ótkizgishler hám izolyatorlar. Joqarıda ayılıp ótilgenindey, tájiriybeler barlıq denelerdiń eki klassqa bólinetuǵınlıǵın kórsetedi: 1) elektrleniwdi alıp bere alatuǵın deneler; olardı ótkizgishler dep ataydı hám 2) elektrleniwdi alıp bermeytuǵın deneler; bunday denelerdi ótkizbeytuǵın (sonıń menen birge izolyatorlar yamasa dielektrikler) deneler dep ataydı. Ótkizgishler birinshi hám ekinshi áwlad ótkizgishler bolıp ekige bólinedi. Birinshi áwladqa kiretuǵın ótkizgishlerde zaryadlardıń alıp ótiliwi (tasılıwı) olardıń ximiyalıq tábiyatınıń ózgerisleri hám zatlardıń sezilerliktey tasılıwı menen baylanıslı emes; ekinshi áwlad ótkizgishlerdegi zaryadlardıń tasılıwı ximiyalıq ózgerisler menen, atap aytqanda basqa ótkizgishler menen tutasqan orınlarda zattıń ximiyalıq qurawshılarınıń bólinip shıǵıwı menen júredi. Birinshi áwlad ótkizgishlerine barlıq metallar kiredi; ekinshi áwlad ótkizgishleriniń qatarına balqıtılǵan duzlar, duzlardıń, kislotalardıń hám siltilderdiń eritpeleri kiredi.

Házirgi waqıtları yarım ótkizgishlerdi de ayırıp kórsetedi. Bul deneler júdá kishi bolsa da, biraq tolıq sezilerliktey elektr ótkizgishlikke jáne olardı ayrıqsha toparǵa kirgizgendey bir qatar qásiyetlerge iye. Házirgi waqıtları ótkizgishler menen dielektriklerdiń tábiyatı jóninde belgili bolǵan kóz-qaraslar qalıplesken.

Metallarda (birinshi áwlad ótkizgishlerde) elektronlardıń bir bólimi atomlardıń arasında erkin qozǵala aladı. Zaryadlanbaǵan metalda erkin qozǵalatuǵın elektronlardıń zaryadları metaldıń kristallıq pánjeresindegi atomlardıń tulǵaları menen baylanıslı bolǵan oń zaryadlar menen kompensaciyanadı. Ótkizgishti elektrlew oǵan kiretuǵın elektronlardıń sanlarınıń ózgerislerine alıp kelinedi: teris elektrlengende ótkizgishke sırttan artıq elektronlar qosıladı, al oń zaryadlanganda onnan elektronlardıń bir bólimi sırtqa alınadı. Bunıń nátiyjesinde atom yadrolarınıń tolıq kompensaciyananbaǵan oń zaryadı biline baslaydı.

Alıp keliw menen zaryadlaǵanda (indukciyada) sırtqı zaryad tárepinen tartıw hám iyteriw kúshleriniń tásirinde elektronlar ótkizgishtiń bir ushına qaray jılısadı; bul ushta elektronlardıń artıqmashlıǵı payda bolıp, teris elektrleniwdi júzege keltiredi; ótkizgishtiń qarama-qarsı ushında elektronlardıń jetispewiniń sebebinen kompensaciyananbaǵan oń zaryad payda boladı.

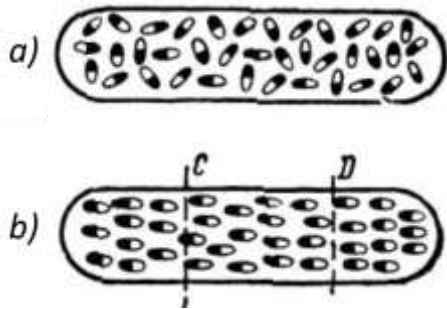
Metallardaǵı barlıq elektronlar birdey, sonlıqtan olardıń orın almasıwı birinshi áwlad ótkizgishleriniń ximiyalıq quramınıń ózgeriwi menen baylanıslı emes. Elektronlardıń massaları júdá kishi bolǵanlıqtan, is júzinde múmkin bolǵan elektrlewdegi ótkizgishtegi elektronlardıń sanınıń ózgeriwine baylanıslı bolǵan massanıń ózgerisin seziwdiń múmkinshiligi bolmaydı².

Ekinshi áwlad ótkizgishlerde erkin elektronlar joq, biraq olarda elektronlardıń jetispewshiligi yamasa artıqmashlıǵı bar atomlar yamasa molekulalar boladı. Usınday zaryadlangan atomlardı yamasa molekulalardı ionlar dep ataydı. Ekinshi áwlad ótkizgishlerindegi zaryadtıń alıp júriwi ionlardıń orın almasıwı menen baylanıslı. Bul ekinshi áwlad ótkizgishlerindegi ximiyalıq ózgerislerdiń bolatuǵınlıǵın túsindiredi.

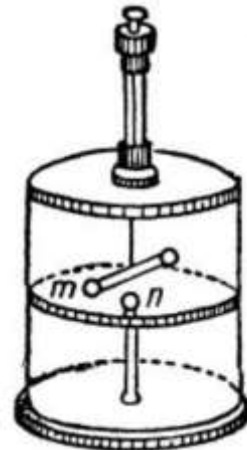
Dielektrikler, yaǵnıy elektrdi ótkizbeytuǵın zatlar teń sandaǵı teris hám oń zaryadlar bar atomlardan hám molekulalardan turadı, olar dielektriklerdiń ishinde erkin qozǵala almaydı. Elektrlik kúshlerdiń tásirinde dielektriklerdegi zaryadlar tek azmaz awısadı yamasa ózleriniń baǵıtların ózgetedi. Mısalı belgileri hár qıylı bolǵan zaryadlar (polyar molekulalar) jup-juptan

² 151-paragraftaǵı esaplawǵa qarańız.

baylanisqan jáne olar bir birine salıstırǵanda tártipsiz túrde tarqalǵan zat dielektriktiń modeli bolıp xızmet ete aladı (6-a súwret). Sonlıqtan tutası menen alıńǵan dielektrik te, onıń ayırım bólimlerinde de elektrlik jaqtan neytral. Eger dielektrikke zaryadlangan deneni alıp kelse, onda zaryadlar orınların alıstırmaydı, biraq tek birdey bolıp orientaciyalanadı (6-b súwret)³. Usınıń nátiyjesinde dielektriktiń alıp kelingende tárepindegi ushında sol deneniń zaryadına qarama-qarsı belgidegi, al qarama-qarsı ushında alıp kelingende deneniń zaryadınday zaryad payda boladı. Dielektriktiń usınday halın *polyarizaciya* dep ataydı. Bul polyarizaciya ótkizgishtegi indukciyanıń waqıtında payda bolatuǵın elektrleniwden basqa boladı.



6-súwret. Dielektriktiń polyarizaciyası.



7-súwret. Kulonniń aylanıwshı tárezisi.

Eger polyarizaciyalangán dielektrikti bóleklerge bólse, mısalı, *D* hám *C* sıyıqlar boyınsha bólse (6-b súwret), onda bóleklerdiń hár qaysısı tutası menen neytral bolıp, tek olardıń betlerinde anaw yamasa mana belgige iye zaryadlar boladı.

Júdá úlken elektrlik kúshlerde dielektriktiń molekulalarınń qıyrawı múmkin; bunday jaǵdayda dielektrik ótkizgishke aylanadı. Bul qubılıs dielektriktiń *tesiliwi* dep ataladı.

§ 123. Elektrostatikalıq maydan. Kulon nızamı. Zaryadlardıń óz-ara tásirlesiw nızamı elektrostatikanıń tiykarǵı nızamı bolıp tabıladı. Zaryadlardıń óz-ara tásirlesiwiniń dáslep pútkil dúnyalıq tartısıw nızamına formal túrdegi analogiya tiykarında túsindirildi. Bunday jaǵdayda elektrlik kúshler de, pútkil dúnyalıq tartısıw kúshleri de aralıqlıq keńisliktiń ornınıń hesh qanday áhmiyeti joq "aralıqtan tásir etiw" kúshleri bolıp tabıladı dep bolǵan. Al haqıyqatında zaryadlar qorshaǵan ortalıqta qanday da bir ózgerislerdi payda etedi (tap tartısıwshı massalar sıyaqlı). Bunday ózgeristiń bolıwı biz qarap atırǵan zaryadtan bazı bir qashıqlıqta jaylasqan zaryadqa kúshlerdiń tásir etiwinen kórinedi. Házirshe bunday ózgerislerdiń tábiyatın qaramay, biz tınıshlıqta turǵan zaryadlar bar bolǵan jaǵdayda olardı qorshaǵan keńislikte elektr maydanı payda boladı dep aytamız.

Eki zaryadtıń bir biri menen tásirlesiwiniń mınadan ibarat: zaryadlardıń hár qaysısı ózin qorshaǵan ortalıqta maydan payda etedi hám bul maydan basqa zaryadqa belgili kúsh penen tásir etedi.

Elektrostatikalıq maydan materiyanıń ayrıqsha túri bolıp tabıladı; bul maydan bir elektrlengen deneniń basqa elektrlengen denegge tásin alıp beredi. Maydanniń qásiyetleri usı maydanniń zaryadlarǵa tásir etetuǵın kúshleri baǵınatuǵın nızamlarınıń tiykarında úyreniledi.

Zaryadlangan denelerdiń óz-ara tásirlesiwiniń olardıń formalarınan da, ólshemlerinen de ǵárezsiz bolǵanlıqtan, óz-ara tásirlesiw nızamın tabıw ushın noqatlıq zaryadlardı qaraydı. Noqatlıq

³ Biz internacionallıq bolǵan "orientaciya" sózin qollanamız hám onıń "baǵıtı" sózine sáykes keletuǵınlıǵın atap ótemiz (Awdarıwshılar).

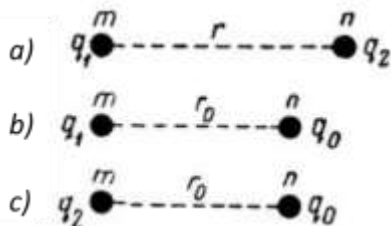
zaryadlar dep aytqanda olardıń ólshepleri olardıń arasındaqı qashıqlıqtan kishi bolǵan jaǵdaydı túsinedi. Álbette, qálegen zaryadlanǵan deneni noqatlıq zaryadlardıń jıynaǵı dep qarawǵa boladı.

Eki noqatlıq zaryadtıń arasındaqı óz-ara tásirlesiw nızamın eksperimentte Kulon 1785-jılı taptı. Usınıń menen birge Kulon zaryadı óziniń ishine zaryadtıń shamasınıń anıqlamasın da aladı.

Óziniń barlıq ólsheplerin Kulon hawada ótkerdi. Biraq, qatań túrde aytqanda, bul paragrafta qaralatuǵın Kulon nızamınıń ańlatpası boslıqqa, yaǵnıy atomlardıń, molekulalardıń yamasa basqa da bólekshelerdiń sezilerliktey sanı bolmaǵan keńislikke tiyisli.

Noqatlıq zaryadlardıń óz-ara tásirlesiw nızamın Kulon aylanatuǵın táreziniń járdeminde orınlanǵan ólsheplerdiń járdeminde ashtı (7-súwret). Bunday táreziniń dúzilisi mınaday: úlken shiyshe idistiń ishine jıńışke simǵa (sabaqqa) shiysheden islengen táreziniń oǵı ildirilgen. Onıń bir ushına metal sharik m , al ekinshi ushına teńlestiriwshi júk bekitilgen. Ekinshi n metall sharigi shiyshe tayaqqa qozǵalmaytuǵın etip bekitilgen. Eki sharikke de sırttan elektr zaryadların beriwge boladı. Sharikler bir birinen hám qorshaǵan ortalıqtan izolyaciyalanǵan bolǵanlıqtan, berilgen zaryadlar bazı bir waqıttıń ishinde saqlanadı. m hám n sharikleriniń arasındaqı qashıqlıqtı táreziniń m sharigi bar oǵın uslap turǵan sabaq bekitilgen golovkanı buriw arqalı ózgertiwge boladı. m hám n shariklerine zaryadlaǵanda olar bir biri menen tartıladı yamasa iyterisedi (zaryadlardıń belgilerine ǵárezli). Nátiyjede m sharigi bekitilgen táreziniń oǵı bazı bir múyeshke burıladı. Táreziniń golovkasın buriw arqalı m sharigin óziniń burınǵı ornına alıp keliwge boladı; bunday jaǵdayda sabaqtıń buralıw momenti m sharigine túsken elektr kúshiniń momentine teń boladı. Eger sabaq aldın ala gradirovkalanǵan bolsa, onda golovkanıń burılıw múyeshiniń shaması boyınsha kúsh momentiniń shamasın tikkeley anıqlawǵa boladı. Bunday jaǵdayda táreziniń oǵınıń uzınlıǵın bilip shariklerdiń arasındaqı óz-ara tásirlesiw kúshiniń shamasın anıqlaw múmkin.

Kulon nızamına alıp keletuǵın pikirlewdiń barısı mınaday. Eń birinshiden, baqlawlar zaryadlardıń arasındaqı óz-ara tásirlesiw kúshleriniń baǵıtı sol zaryadlardı tutastıratuǵın tuwrı menen baǵıtlas. Eger zaryadlar birdey belgige iye bolsa, onda 121-paragrafta kórsetilgende, kúshler iyterelis kúshleri, al hár qıylı belgige iye bolǵan jaǵdayda tartılıs kúshleri bolıp tabıladı. Bazı bir turaqlı zaryadlar berilgen m hám n sharikleriniń arasındaqı r qashıqlıǵın ózgerte otırıp, tájiriybeden óz-ara tásirlesiw kúshleriniń r qashıqlıǵınıń kvadratına kerı proporcional ekenligine iseniwge boladı (8-a súwret).



8-súwret. Kulon nızamın tiykarlaw ushın.



9-súwret. Radius-vektordıń baǵıtı.

q_1 hám q_2 zaryadlarınıń shamarların salıstırıw ushın bul zaryadlardıń belgili bolǵan bazı bir úshinshi q_0 zaryadı menen f_1 hám f_2 óz-ara tásirlesiw kúshlerin ólsheymiz (eger olardı úshinshi zaryad q_0 ge birdey r_0 qashıqlıǵında jaylasqan bolsa) (8-b hám 8-c súwretler). Onıń ushın m sharigine q_1 hám q_2 zaryadların beremiz, al n shariginiń zaryadın ózgerissiz hám q_0 shamasına teń etip qaldıramız.

Tájiriybeler kúshlerdiń f_1/f_2 qatnasınıń úshinshi zaryadtıń shaması q_0 den de, usı zaryadtan q_1 hám q_2 zaryadları jaylasqan r_0 qashıqlıqlardan da ǵárezsiz ekenligin kórsetedi. Demek, kúshlerdiń qatnası bolǵan f_1/f_2 shaması q_1 hám q_2 zaryadlarınıń ózleri boyınsha anıqlanadı eken. Bunnan zaryadlardıń qatnası bolǵan q_1/q_2 shamasınıń kúshlerdiń qatnası f_1/f_2 ge teń ekenligi kelip shıǵadı. Solay etip, biz *eki zaryadtıń shamarlarınıń qatnasın ólshew usılına* iye bolamız.

Zaryadlardı *ólshewdiń birliklerin* anıqlaǵannan zaryadlardıń absolyut shamarların anıqlawǵa

boladı. Biz onı keyinirek qaraymız.

Zaryadlarıń muǵdarların salıstırıw usılına iye bolıp, biz hár qıylı bolǵan $q_1, q_2, q_3, \dots$ zaryadların *jup-juptan birdey r qashıqlıqta jaylastıra alamız*. Tájiriye bunday jaǵdayda jup zaryadtıń arasındaǵı óz-ara tásir etiw kúshi f tiń olardıń shamalarınń kóbeymesi $q_i \cdot q_k$ ge teń bolatuǵınlıǵın kórsetedi.

Solay etip, Kulon nızamı ushın mınaday anıqlamanı bere alamız: *eki noqatlıq zaryadtıń arasındaǵı óz-ara tásirlesiw kúshi f tiń shaması q_1 hám q_2 zaryadlarınıń kóbeymesine tuwrı proporcional hám olardıń arasındaǵı qashıqlıq r diń kvadratına kerı proporcional*:

$$f = k \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad (1)$$

Bul teńlikte k arqalı proporcionallıq koefficienti belgilengen.

Eger oń zaryadlarǵa plyus (+) belgisin, al teris zaryadlarǵa minus (-) belgisin bersek, onda kúshtiń teris mánisi tartılıs kúshine, al kúshtiń oń mánisi iyterilis kúshine sáykes keledi.

(1)-Kulon nızamın vektorlıq túrde de jazıwǵa boladı. q_1 noqatlıq zaryadınan (9-súwret) q_2 noqatlıq zaryadına $\mathbf{r}$ radius-vektorın júrgizemiz. q_2 zaryadına tásir etetuǵın $\mathbf{f}$ kúshi (1)-formulaǵa sáykes san mánisi boyınsha $k \frac{q_1 q_2}{r^2}$ shamasına teń hám $\mathbf{r}$ radius-vektori menen baǵıtlas. Solay etip, Kulon nızamın vektorlıq túrde bilayınsha jazadı:

$$\mathbf{f} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \cdot \frac{\mathbf{r}}{r}. \quad (1a)$$

Zaryadtıń CGS-birligin tabıw ushın (1)-Kulon nızamındaǵı proporcionallıq koefficienti k nı birge teń etip alamız:

$$f = \frac{q_1 q_2}{r^2}.$$

Bunnan, mınaday jaǵdayǵa iye bolamız: *CGS sistemasında zaryadtıń bir birligi sıpatında bir birinen 1 sm qashıqlıqta 1 dina kúshi menen tásirlesetuǵın noqatlıq zaryad alınadı*. Bul birlik zaryadtıń *absolyut elektrostatikalıq birligi* dep ataladı.

Elektr haqqındaǵı tálimatta CGS sistemasınıń tiykarında belgilengen birlikler hám elektrostatikaniń nızamları *absolyut elektrostatikalıq birlikler* dep ataladı CGSE simvolı menen belgilenedi.

Házirgi waqıtlardaǵı xalıq aralıq birlikler sistemasındaǵı elektrostatikalıq birliktiń kishi ekenligine baylanıslı (I tomǵa qarańız) zaryadtıń birligi sıpatında zaryadtıń CGSE-birliginen $c/10$ ese úlken bolǵan zaryadtıń birligi qabıl etilgen. Bul jerde c arqalı elektrodinamikalıq birlik dep atalatuǵın birlik belgilengen (196-paragraftı qarańız). Bul birlik kulon dep ataladı. Elektrdinamikalıq turaqlı bolǵan c shaması joqarı dálilikte $3 \cdot 10^{10}$ sm/sek ke teń bolǵanlıqtan

$$1 \text{ kulon} = 3 \cdot 10^9 \text{ zaryadtıń CGSE-birligi}.$$

teńligine iye bolamız.

CGSE sistemasındaǵı ólshemler (1)-formulanıń tiykarında alınǵan:

$$[q^2] = [f] \cdot [r^2].$$

Bunnan

$$[q] = [f^{1/2}] \cdot L = M^{1/2} \cdot L^{3/2} T^{-1}$$

teńliklerine iye bolamız.

Zaryadlangan denelerdiń arasındaǵı óz-ara tásirlesiw kúshin anıqlawǵa misal keltiremiz.

Mısal. Salmaq maydanında turǵan eki kishkene sharik (hár qaysısınıń massası 0,1 grammnan) uzınlıǵı $l = 25$ sm bolǵan sabaqqa ildirip qoyılǵan (10-súwret). Bunnan keyin shariklerge birdey zaryad berilgen. Nátiyjede olar bir birinen $r = 5$ sm ge qashıqlasqan. Olarǵa berilgen zaryadları CGSE-sistemasında hám kulonlarda anıqlańız.

Sheshimi. Shariklerdiń arasındaǵı iyterilis kúshi

$$f = \frac{q^2}{r^2}$$

formulasınıń járdeminde anıqlanadı. q arqalı hár bir sharikke berilgen zaryad belgilengen. f iyterisiw kúshiniń teń tásir etiwshisi F penen salmaq kúshi $P = mg$ sabaqtıń boyı menen bağıtlangan jaǵdayda teń salmaqlıq ornaydı. 10-súwretten biz mınaǵan iye bolamız:

$$f = P \cdot \operatorname{tg} \alpha = mg \cdot \operatorname{tg} \alpha.$$

α múyeshiniń kishi mánislerinde $\operatorname{tg} \alpha$ nı juwıq túrde $\sin \alpha$ ge teń dep esaplawǵa boladı. Biraq

$$\sin \alpha = \frac{\frac{r}{2}}{l}, \text{ bunnan } f = \frac{mgr}{2l}$$

teńligine iye bolamız. f tiń usı mánisin q^2/r^2 shamasına teńlestirip

$$\frac{q^2}{r^2} = \frac{mgr}{2l}$$

qatnasına iye bolamız hám ol biz izlegen juwaptı beredi:

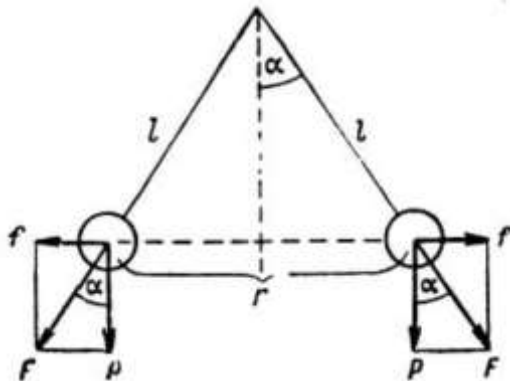
$$q = r \sqrt{\frac{mgr}{2l}} = 5 \sqrt{\frac{0,1 \cdot 981 \cdot 5}{2 \cdot 25}} \text{ CGSE} = 15,6 \text{ CGSE}$$

Bul zaryadtı kulonlarǵa ótkerip

$$q = \frac{15,6}{3 \cdot 10^9} k = 5,2 \cdot 10^{-9} k.$$

teńligine iye bolamız.

Bul esaptan kulonniń úlken birlik ekenligine hám denelerdi ádettegidey elektrlegende baqlanatuǵın zaryadlar kulonniń júdá kishkene bólegindey shama menen anlatılatuǵınlıǵına kóz jetkeremiz.



10-súwret. Elektrlengen sharlarǵa tásir etetuǵın kúshler.

§ 124. Elektrostatikalıq maydanniń kernewligi. Biz 123-paragrafta hár bir zaryadtıń qorshaǵan ortalıqta elektrostatikalıq maydandı payda etetuǵınlıǵın aytqan edik. Maydanniń qásiyetin oǵan noqatlıq zaryadları qoyıp hám olarǵa tásir etetuǵın kúshlerdi baqlaw arqalı úyreniwge boladı. Bunday jaǵdayda alıp kelingен zaryadları dim kishi hám sonlıqtan *olar maydanı payda etken zaryadlarıń muǵdarın da, jaylasıwlarıń da ózgerge almaydı* dep boljaymız. Kulon nızamınan maydanniń bazı bir noqatına jaylastırılǵan q oń zaryadına usı zaryadtıń shamasına proporcional f kúshi tásir etedi. Bul kúshtiń shaması menen bağıtı maydandı payda etetuǵın barlıq zaryadlarıń shaması hám jaylasıwları boyınsha anıqlanadı. Zaryadqa tásir etetuǵın f kúshiniń usı zaryadtıń shaması q ǵa qatnası, Kulon nızamında kórinip turǵanıday, q zaryadınıń shamasınan ǵárezli emes hám maydanniń berilgen noqatın táriyipleydi. Solay etip, maydanniń barlıq noqatları ushın tabılǵan f/q qatnası maydanniń belgili bolǵan obektiv qásiyetleriniń fizikalıq xarakteristikasını beredi. Bul qatnas elektrostatikalıq maydanniń kernewligi dep atalatuǵın fizikalıq shamalı anıqlaydı. Onı biz E arqalı belgileybiz:

$$E = \frac{f}{q}. \quad (1)$$

Eger bul formulada $q = +1$ dep boljasaq, onda $\mathbf{E}$ shaması boyınsha da, bağıtı boyınsha da $\mathbf{f}$ shamasına sáykes keledi. Demek, *bazı bir noqattaǵı elektrostatalıq maydanniń kernewligi san mánisi hám bağıtı boyınsha usı noqatqa jaylastırılǵan bir birlik óń zaryadqa tásir etetuǵın kúshke teń*. Bul anıqlamadan kernewliktiń vektorlıq shama ekenligi kelip shıǵadı.

Kernewliktiń birligi sıpatında *bir birlik zaryadqa bir birlik kúsh tásir etetuǵın maydanniń kernewligi qabıl etiledi*. Bunnan CGSE-sistemada kernewliktiń birligi elektrostatalıq bir birlik zaryadqa bir dina kúsh tásir etetuǵın maydanniń noqatındaǵı kernewlik alınadı. Bul sistemadaǵı kernewliktiń ólshemi (1)-formula boyınsha anıqlanadı:

$$[E] = \frac{[f]}{[q]} = \frac{MLT^{-2}}{M^{1/2}L^{3/2}T^{-1}} = M^{1/2}L^{-1/2}T^{-1}. \quad (2)$$

Mısallar sıpatında, bazı bir áhmiyetli dara jaǵdaylar ushın elektrostatalıq maydanniń kernewligin esaplaymız.

1. Noqatlıq zaryadtiń maydanınıń kernewligi. q noqatlıq zaryadın alamız hám usı zaryadтан r qashıqlıǵında jaylasqan A noqatındaǵı maydandı anıqlaymız.

Kulon nızamı boyınsha q zaryadınan r qashıqlıǵında jaylasqan q_0 óń zaryadına tásir etetuǵın kúsh mınaǵan teń:

$$f = \frac{q \cdot q_0}{r^2}.$$

Bunnan A noqatındaǵı kernewlik

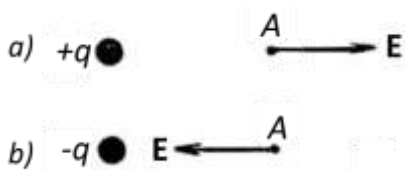
$$E = \frac{f}{q_0} = \frac{q}{r^2} \quad (3)$$

shamasına teń boladı. (3)-ańlatpa A noqatındaǵı kernewliktiń shamasın anıqlaydı. Kernewliktiń bağıtı $\mathbf{f}$ kúshiniń bağıtına sáykes keledi. Demek, $\mathbf{E}$ vektorı q zaryadın A noqatı menen tutastıratuǵın sızıqtıń boyında jatadı hám onıń bağıtı bılayınsha anıqlanadı: eger q zaryadınıń shaması óń bolsa, onda usı q zaryadınan sırtqa qaray, al eger q zaryadı teris bolsa, onda usı zaryadqa qaray baǵıtlangan (11-súwret).

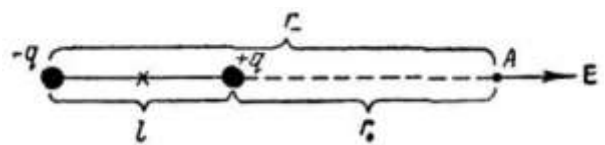
Vektorlıq túrde kernewlik $\mathbf{E}$ bılayınsha jazıladı:

$$\mathbf{E} = \frac{q}{r^2} \cdot \frac{\mathbf{r}}{r}. \quad (3a)$$

Bul formulada $\mathbf{r}$ arqalı q noqatlıq zaryadı turǵan orınnan kernewligi $\mathbf{E}$ esaplanıp atırǵan noqatqa túsirilgen radius-vektor belgilengen.



11-súwret. Elektrostatalıq maydanniń kernewligi $\mathbf{E}$ niń bağıtı.



12-súwret. Dipoldiń kósherindegi maydanniń kernewligin anıqlawǵa.

Eger kernewlik bir neshe $q_1, q_2, \dots, q_n$ zaryadları tárepinen payda etiletuǵın bolsa, onda bazı bir noqattaǵı *qosındı maydan hár bir zaryad payda etken maydanniń kernewlikleriniń geometriyalıq qosındısına turadı*. Bul mınaday faktten kelip shıǵadı: berilgen noqatta turǵan q_0 zaryadına tásir etetuǵın $\mathbf{f}$ kúshi hár bir zaryad óz aldına payda etken $\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \dots, \mathbf{f}_n$ kúshlerdiń geometriyalıq qosındısına teń:

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}_1 + \mathbf{f}_2 + \dots + \mathbf{f}_n.$$

Bul teńlikten $\mathbf{f}$ kúshiniń q_0 zaryadına qatnası bolǵan kernewliktiń

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{f}}{q_0} = \frac{\mathbf{f}_1}{q_0} + \frac{\mathbf{f}_2}{q_0} + \dots + \frac{\mathbf{f}_n}{q_0}.$$

shamasına teń bolatuǵınligi kóremiz. Teńliktiń óń tárepinde turǵan aǵzalar $q_1, q_2, \dots, q_n$ zaryadları

payda etken $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2 \dots, \mathbf{E}_n$ kernewlikleri bolıp tabıladı. Demek,

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \dots + \mathbf{E}_n. \quad (4)$$

2. Dipoldiń maydanınıń kernewligi. Dipol dep bir birinen l qashıqlıǵında turǵan belgileri hár qıylı bolǵan eki zaryadtıń jıynaǵına aytadı. l diń shaması dipol payda etken maydanınıń kernewligi anıqlanatuǵın noqattan dipolge shekemgi qashıqlıqtan ádewir kishi bolıwı kerek. Zaryadlar arqalı ótetuǵın sıızıqtı dipoldiń kósheri dep ataydı. Dipoldiń kósheriniń boyında turǵan A noqatındaǵı elektrostatikalıq maydannıń kernewligin anıqlaymız (12-súwret). A noqatınan $+q$ hám $-q$ zaryadlarına shekemgi qashıqlıqtı sáykes r_+ hám r_- arqalı belgileymiz. A noqatınan dipoldiń ortasına shekemgi qashıqlıq r bolsın. Bunday jaǵdayda:

$$r_+ = r - \frac{l}{2}, r_- = r + \frac{l}{2}.$$

$\mathbf{E}$ kernewligi hár bir zaryad óz aldına payda etken $\mathbf{E}_+$ hám $\mathbf{E}_-$ kernewlikleriniń geometriyalıq summasına teń. $\mathbf{E}_+$ hám $\mathbf{E}_-$ vektorları dipoldiń kósheri boylap baǵıtlanǵan bolǵanlıqtan, geometriyalıq summa algebralıq summaǵa alıp kelinedi:

$$E = \frac{q}{r_+^2} - \frac{q}{r_-^2}$$

yamasa

$$E = \frac{q(r_-^2 - r_+^2)}{r_+^2 \cdot r_-^2} = \frac{q(r_- + r_+)(r_- - r_+)}{r_+^2 \cdot r_-^2} - \frac{q}{r_-^2}.$$

Bunnan keyin mınaǵan iye bolamız:

$$r_- + r_+ = l, \quad r_+ + r_- = 2r;$$

shárt boyınsha $r \gg l$. Sonlıqtan juwıq túrde

$$r_+^2 \cdot r_-^2 \cong r^4$$

ańlatpasına iye bolamız hám v E ushın jazılǵan ańlatpa mınaǵan teń boladı:

$$E = \frac{2ql}{r^3}.$$

q zaryadınıń zaryadlardıń arasındaǵı qashıqlıqqa kóbeymesi

$$p = ql$$

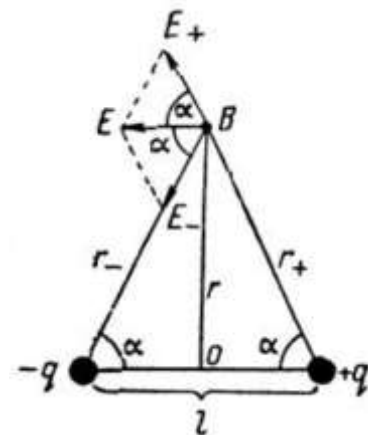
dipoldiń momenti dep ataladı. $\mathbf{E}$ ushın jazılǵan formulaǵa p dipoldiń momentin kirgizip, eń aqırında mınaday formulaǵa iye bolamız:

$$E = \frac{2p}{r^3}. \quad (5)$$

A noqatındaǵı maydannıń kernewligi E dipoldiń kósherinen ońǵa qaray baǵıtlanǵan.

13-súwret.

Dipoldiń maydanınıń B noqatındaǵı kernewligin anıqlawǵa.



Dipoldiń kósherine perpendikulyar bolǵan OB tuwrısınıń boyında ornasqan B noqatındaǵı kernewlikti qaraymız (13-súwret). B noqatındaǵı kernewlik $+q$ hám $-q$ zaryadları payda etken kernewliklerdiń geometriyalıq qosındısına teń. Eki zaryadtan B noqatına shekemgi qashıqlıqlar r_+

hám r_- ler óz ara teń. Sonlıqtan san mánisi boyınsha:

$$E_+ = E_- = \frac{q}{r_+^2}.$$

E_+ hám E_- kernewlikleri vektorlarınǵı baǵıtları 13-súwrette keltirilgen.

13-súwrette kórinip turǵanıday, qosındı kernewlik vektóri bolǵan $E = E_+ + E_-$ vektorınıń shaması mınaǵan:

$$E = E_+ \cos \alpha + E_- \cos \alpha = \frac{2q}{r_+^2} \cos \alpha$$

yamasa

$$E = \frac{2q}{r_+^2} \cdot \frac{l/2}{r_+} = \frac{2l}{r_+^3}$$

shamasına teń.

Dipoldiń ortasınan B noqatına shekemgi qashıqlıqtı r arqalı belgileyik. Bunday jaǵdayda $l \ll r$ teńsizligi juwıq túrde orınlanatuǵın bolǵanlıqtan, sońǵı formulanı bılayınsha jaza alamız:

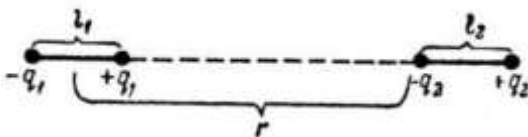
$$E = \frac{ql}{r^3}.$$

Aqırında dipoldiń momenti bolǵan $p = ql$ shamasın kirgizip

$$E = \frac{p}{r^3}. \quad (6)$$

formulasına iye bolamız. (5)- hám (6)- formulalardı salıstırıp eki jaǵdayda da dipoldiń maydanınıń kernewliginiń dipol momenti p ge proporcional dipolden qashıqlıq r diń kubına kerı proporcional eken.

Joqarıda keltirilgen mısallar qosındı kernewliktiń elektrlik sistemanı payda etetuǵın noqatlıq zaryadlar payda etken kernewliklerdiń geometriyalıq summasına teń ekenligin kórsetedi. Biraq, kópshilik jaǵdaylarda noqatlıq zaryadlardan turatuǵın sistema kóz-qarasınıń járdeminde islenetuǵın esaplawlar júdá quramalı, hátte orınlaw múmkin emestey dárejede boladı; sonlıqtan, kóp sanlı máselelerdegi kernewlikti anıqlaw ayırım qosımsha usıllardıń járdeminde orınlanadı. Olar haqqında biz tómenge gáp etemiz.



14-súwret.

Eki dipoldiń arasındaǵı óz-ara tásirlesiw kúshin anıqlawǵa.

Dipoldiń kernewligi ushın jazılǵan (5)-formuladan kelip shıqqan halda dipoldiń óziniń ólshemlerinen ádewir úlken bolǵan r qashıqlıǵında bir tuwrınıń boyında jaylasqan eki qattı dipoldiń óz-ara tásirlesiw kúshin anısat tabıwǵa boladı.

Qattı dipol dep sırtqı kúshlerdiń tásirinde zaryadlardıń arasındaǵı l qashıqlıǵı ózgermeytuǵın dipolge aytadı; bunday dipoldiń eki zaryadı da bir biri menen qattı (bekkem) baylanısqan.

Birinshi jaǵdaydı qaraymız. Bul jaǵdayda eki dipoldiń de hár qıylı belgige iye zaryadları bir birine qarap tur (14-súwret). Meyli, r birinshi dipoldiń ortası menen ekinshi dipoldiń — q_2 zaryadınıń arasındaǵı qashıqlıq bolsın.

(5)-formula boyınsha, birinshi dipoldiń maydanınıń — q_2 turǵan orındaǵı kernewligi E_1 shamasına teń

$$E_1 = \frac{2p_1}{r^3}.$$

Bul ańlatpada $p_1 = q_1 l_1$ birinshi dipoldiń momenti bolıp tabıladı. Usı kernewliktiń bar bolıwınıń sebebinen ekinshi dipoldiń — q_2 zaryadına

$$f_1 = -\frac{2p_1}{r^3} q_2$$

kúshi tásir etedi. Sol dipoldiń $+q_2$ zaryadına

$$f_2 = +\frac{2p_1}{(r+l_2)^3} q_2$$

kúshi tásir etedi. Ekinshi dipoldiń ózine tásir etetuǵın qosındı kúsh

$$f = f_1 + f_2 = -\frac{2p_1}{r^3} q_2 + \frac{2p_1}{(r+l_2)^3} q_2 = -\frac{2p_1}{r^3} \left[1 - \frac{2p_1}{\left(1 + \frac{l_2}{r}\right)^3} \right] q_2$$

shamasına teń. Qoyılǵan shárt boyınsha $l \ll r$ teńsizligi orınlı bolǵanlıqtan, onda juwıq túrde

$$\frac{1}{\left(1 + \frac{l_2}{r}\right)^3} \cong 1 - 3\frac{l_2}{r}$$

teńligin, al bunnan

$$f = -\frac{6p_1 l_2 q_2}{r^4}$$

teńligine iye bolamız. Sonıń menen birge $l_2 q_2 = p_2$ teńligi orınlı bolǵanlıqtan (p_2 – ekinshi dipoldiń momenti)

$$f = -\frac{6 p_1 p_2}{r^4}. \quad (7)$$

formulasına iye bolamız. Minus belgisi qosındı kúshniń tartısıw kúshi ekenligin bildiredi.

Eki dipol bir birine birdey zaryadlangan ushları menen qarap turǵan bolsa, onda olardıń arasındaǵı óz-ara tásirlesiw kúshiniń oń mániske iye bolatuǵınlıǵın, yaǵnıy iyterilis kúshi bolatuǵınlıǵın ańsat kóriwge boladı.

(7)-formula dipoller arasındaǵı óz-ara tásirlesiw kúshiniń olardıń momentleriniń kóbeymesine tuwrı proporcional hám olardıń arasındaǵı qashıqlıqtıń tórtinshi dárejesine kerı proporcional ekenligin kórsetedi. Bizler ótkergen esaplawlarda eki dipol de bir tuwrınıń boyında jatır edi. Dipoller bir birine salıstırǵanda basqasha jaylasqanda da, olardıń arasındaǵı óz-ara tásirlesiw kúshiniń qashıqlıqtıń tórtinshi dárejesine kerı proporcional ekenligin kórsetiwge boladı.

§ 125. Kernewlik sızıqları. Ótken paragrafta elektrostatikalıq maydannıń hár bir noqatına **E** kernewlik vektorın sáykes keltiriwge bolatuǵınlıǵı anıqlanǵan edi.

Endi *kernewlik sızıqları* yamasa *kúsh sızıqları* haqqındaǵı túsinikti kirgizemiz. Kernewlik sızıǵı haqqında gáp etkende hár bir noqatında kernewlik vektorı **E** urınba baǵıtta baǵıtlangan sızıqtı túsinemiz (15-súwret). Kernewlik sızıǵına sızıqtıń hár bir noqatında kernewdiń baǵıtı menen sáykes keletuǵın baǵıttı beremiz.

Solay etip, kernewlik sızıǵı usı sızıqtıń boyındaǵı hár bir noqattaǵı maydannıń kernewligi **E** niń baǵıtın hám usıǵan sáykes maydannıń usı noqatına jaylastırılǵan oń $+q$ zaryadına tásir etetuǵın kúshniń baǵıtın anıqlaydı eken. **f** kúshiniń baǵıtın usı $+q$ zaryadı jaylasqan deneniń alatuǵın tezleniwi ǵana anıqlaytuǵın bolǵanlıqtan (al onıń orın almastırıwınıń baǵıtı emes), demek, zaryadlangan dene maydan tárepinen tásir etetuǵın kúshniń tásirinde, ulıwma aytqanda, kernewlik sızıǵınıń boyı menen qozǵalmaydı. Elektrik kúshlerden basqa kúshler tásir etpeytuǵın oń zaryadlangan dene kernewlik sızıǵı boylap tek usı sızıq tuwrı hám baslanǵısh tezlik kernewlik sızıǵına parallel bolǵan jaǵdayda ǵana qozǵaladı.

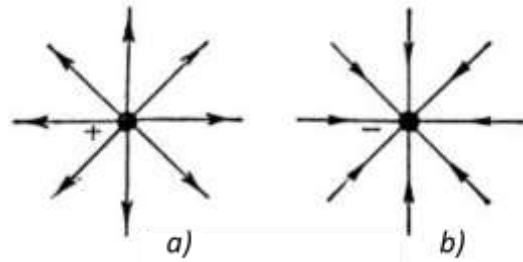
Kernewlik sızıqlarına misallardı qaraymız.

1. Noqatlıq zaryadtıń kernewlik sızıqları. Noqatlıq zaryadlardıń kernewlik sızıqlarınıń tuwrı sızıqlar ekenligin ańsat kóriwge boladı - eger zaryad oń bolsa, onda kernewlik sızıqları onnan shıǵadı, al zaryad teris bolsa, onda kernewlik sızıqları oǵan kiredi (16-a hám b súwretler). Solay etip, oń zaryadtı kernewlik sızıqları baslanatuǵın orın, al teris zaryadtı kernewlik sızıqları tamamlatuǵın orın dep qarawǵa boladı. Eki jaǵdayda da kernewlik sızıqlarına túsirilgen urınbalar

sızıqlardıń ózlerine sáykes keledi hám kernewliktiń baǵıtı menen baǵıtlas.

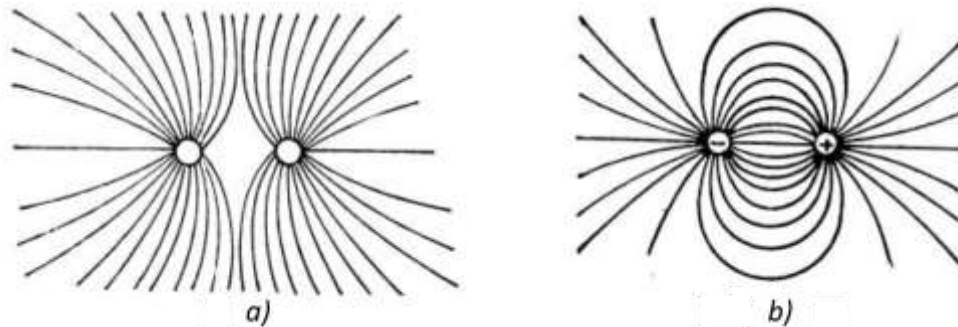


15-súwret. Kernewlik sızıǵı.



15-súwret. Noqatlıq zaryadtıń kernewlik sızıqları. a) - oń zaryadtıń, b) teris zaryadtıń.

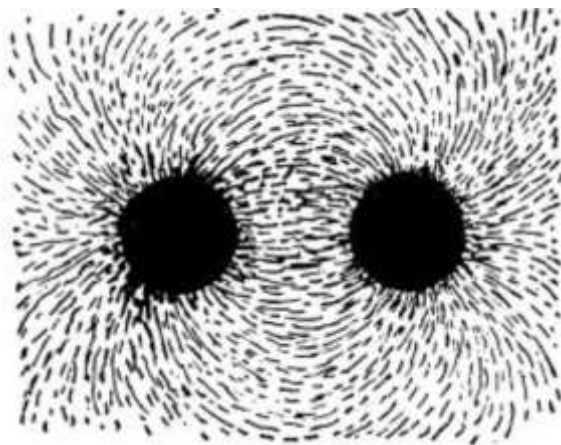
2. Eki noqatlıq zaryadlardıń kernewlik sızıqları. 17-a súwrette shamaları da, belgileri de birdey bolǵan eki noqatlıq zaryadlardıń kernewlik sızıqları, al 17-b súwrette bolsa belgileri hár qıylı, biraq absolyut shamaları birdey bolǵan eki noqatlıq zaryadtıń kernewlik sızıqları, basqa sóz benen aytqanda dipoldıń kernewlik sızıqları kórsetilgen.



17-súwret. Eki noqatlıq zaryadtıń kernewlik sızıqları. a) - zaryadlar birdey belgige hám b) - hár qıylı belgige iye.

3. Bir tekli maydanniń kernewlik sızıqları. Barlıq noqatlarında kernewlik geometriyalıq jaqtan teń, yaǵnıy shaması boyınsha da, baǵıtı boyınsha da birdey bolǵan maydandı bir tekli maydan dep ataydı. Álbette, bir tekli maydanniń kernewlik sızıqları kernewlik vektorına parallel bolǵan tuwrılar bolıp tabıladı.

Kernewlik sızıqlarınıń qalayınsha jaylasqanlıǵın dielektriktiń sozılǵan bólekleriniń polarizaciyanıwdıń saldarınan kernewlik sızıqlarınıń boyı menen jaylasatuǵınlıǵın paydalanıp eksperimentlerde anıqlawǵa boladı. Demonstraciya ushın gipstiń iyne tárizli mayda kristalların paydalanadı. Olardı stanioldıń bólekleri jabıstırılǵan shiyshe plastinkaǵa sebeleydi, al sol stanioldıń bóleklerine zaryad beriledi. 18-súwrette hár qıylı belgige iye zaryadlar menen zaryadlangan eki staniol tárizli dóńgelektiń arasındaǵı gipstiń mayda kristallarınıń qalayınsha jaylasatuǵınlıǵı kórsetilgen.



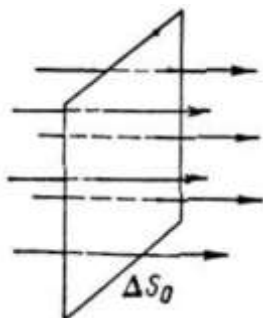
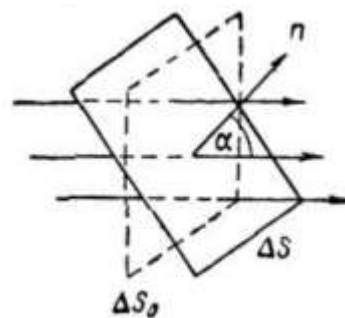
18-súwret.

Hár qıylı belgige iye zaryadlar menen zaryadlangan staniol dóńgelekleriniń arasındaǵı gipstiń mayda kristallarınıń jaylasıwı.

Keńisliktiń hár bir noqatında maydanniń kernewligi tek bir baǵıtqa iye bolǵanlıqtan, kernewlik sıızqları hesh qashan kesilise almaydı. Kernewlik sıızqları oń zaryadlarda baslanadı hám teris zaryadlarda tamam boladı.

§ 126. Kernewlik aǵısı. Ostrogradskiy-Gauss teoreması. Ótken paragraftan kernewlik sıızǵın keńisliktiń qálegen noqatı arqalı ótkeriwge bolatuǵınlıǵın kórdik. Sonlıqtan keńislikte ótkeriletuǵın sıızqlardıń sanı qanday da bir sebepler menen sheklenbegen.

Kernewlik sıızǵı kernewliktiń baǵıtın táriyiplep, ol ózinen-ózi kernewliktiń shamasın táriyiplep almaydı. Biraq, kernewliktiń shaması menen ótkeriletuǵın *kernewlik sıızqlarınıń sanın* baylanıstratuǵın shártti kirgiziwge boladı. Kernewlik úlken bolǵan orınlarda sıızqlardı qoyıw etip, al kernewlik kishi bolǵan orınlarda sıızqlardı siyrek etip ótkeremiz.

19-súwret. Kernewlik sıızqlarına perpendikulyar bolǵan ΔS_0 beti.20-súwret. Kernewlik sıızqlarına qıya jaylasqan ΔS_0 beti.

Iqtıyarlı maydandı oyımızda kishkene bolǵan oblastlarǵa bóle alamız hám usı kishi oblasttıń sheklerinde kernewlikti bir tekli dep esaplay alamız. Oyımızda usınday oblastta kernewlik sıızqlarına perpendikulyar ΔS_0 betin ótkeremiz (19-súwret).

Endi usı bet arqalı kernewliktiń ΔN sıızǵı ótedi dep hám bettiń maydan birligi arqalı ótetuǵın sıızqlardıń sanı bet oblastındaǵı kernewliktiń mánisine teń dep shárt qoyayıq. Demek

$$\frac{\Delta N}{\Delta S_0} = E \quad (1)$$

shárti orınlanadı dep boljayıq hám bul shárt orınlanganda kernewliktiń shaması haqıyqatında da kernewlik sıızqlarınıń tıǵızlıǵı (qoyıwlıǵı) menen baylanıslı bolıp shıǵadı. Maydanniń kernewligi kishi orınlarında kernewlik sıızqlarınıń tıǵızlıǵı kemlew, al kernewlik úlken bolǵan orınlarda sıızqlar tıǵız (qoyıw) bolıp ótedi.

Bazı bir bet arqalı ótken kernewlik sıızqlarınıń ulıwmalıq sanın *kernewliktiń aǵısı* dep ataymız N arqalı belgileybiz. ΔS_0 elementar beti arqalı ótetuǵın sıızqlardıń sanı ΔN usı bet arqalı ótetuǵın elementar aǵısı payda etedi.

Kishkene ΔS maydanı arqalı ótetuǵın sızıqlardıń sanı ΔN di qaraymız. Bul jaǵdayda usı betke túsirilgen $\mathbf{n}$ normaldıń baǵıtı menen kernewlik sızıqlarınıń baǵıtınıń arasındaǵı múyesh α bolsın. Meyli ΔS_0 arqalı kernewlik sızıqlarınıń baǵıtına túsirilgen ΔS tiń proekciyası bolsın. ΔS beti arqalı ótetuǵın sızıqlardıń ΔS_0 beti arqalı da ótetuǵını óz-ózinen túsiniikli. Demek, (1)-teńlikten biz mınaǵan iye bolamız:

$$\Delta N = \Delta S_0 \cdot E = \Delta S \cdot \cos \alpha \cdot E.$$

Biraq, $E \cos \alpha$ shaması kernewlik vektorınıń ΔS betine túsirilgen $\mathbf{n}$ normaldıń baǵıtına túsirilgen proekciyası bolıp tabıladı:

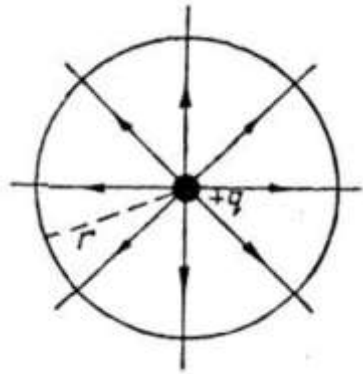
$$E \cos \alpha = E_n.$$

Demek,

$$\Delta N = E_n \cdot \Delta S. \quad (2)$$

Bul qatnas ıqtıyarlı túrde baǵıtlanǵan bettiń ΔS elementi arqalı ótetuǵın kernewliliktiń elementar aǵısın beredi. Demek, bettiń ıqtıyarlı jaylasqan elementi arqalı ótetuǵın kernewliliktiń aǵısı E kernewliginiń usı elementke normal bolǵan qurawshısı menen elementtiń maydanına kóbeytkenge teń.

Eger ΔS beti kernewlik sızıqlarına parallel bolsa, onda usı bet arqalı ótip atırǵan aǵıs nolge teń. Sebebi bul jaǵdayda $\alpha = \pi/2$ hám $E_n = 0$.



21-súwret.
Ostrogradskiy-Gauss teoremasın keltirip
shıǵarıwǵa.

Aǵıstıń belgisi kernewlik vektorı sızıqları menen oń baǵıt dep qabıl etilgen normaldıń baǵıtı arasındaǵı múyeshten ǵárezli.

20-súwrettegi aǵıs oń; eger biz $\mathbf{n}$ normalınıń oń baǵıtı sıpatında 20-súwrette kórsetilgen baǵıtqa qarama-qarsı baǵıtta alsaq, onda aǵıstıń belgisi qarama qarsı belgige ózgergen bolar edi.

Shekli S beti arqalı ótetuǵın kernewlik aǵısı elementar aǵıslardıń algebralıq summası túrinde anıqlanadı:

$$N = \sum \Delta N = \sum E_n \Delta S. \quad (3)$$

Biz S betin neshe elementke bólsek, summalaq da sol elementlerdiń barlıǵı boyınsha júrgiziledi.

Bettiń ΔS elementlerin sheksiz kishi etip alıw kerek Sonlıqtan bet elementin dS arqalı belgilep, kernewliliktiń elementar aǵısı dN ushın mınaday ańlatpanı alamız:

$$dN = E_n dS.$$

S beti arqalı ótetuǵın kernewliktiń aǵısı N sheksiz kóp bolǵan elementar aǵıslardıń qosındısı, yaǵnıy integral sıpatında ańlatıladi:

$$N = \int_S E_n dS. \quad (3a)$$

Bul ańlatpada integral alınatuǵın S belgisi integraldıń biz qarap atırǵan barlıq S betine tarqalatuǵınlıǵın bildiredi.

Maydanınıń kernewligi qashıqlıqtıń kvadratına keri proporcional ózgeretuǵın q noqatlıq

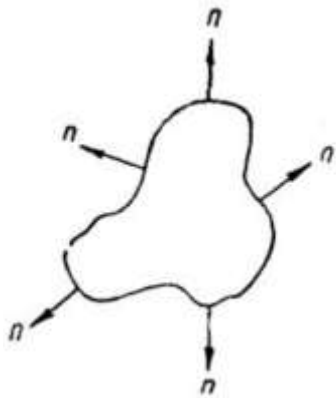
zaryadınan neshe kernewlik sızıǵın ótkeriwge bolatuǵınlıǵın qaraymız (124-paragraf). q noqatlıq zaryadı sferalıq simmetriyaǵa iye bolǵan maydandı payda etetuǵın bolǵanlıqtan, 125-paragrafta atap ótilgenindey, kernewlik sızıqları simmetriyalı jaylasqan radiallıq sızıqlardan ibarat boladı (21-súwret). Olardıń ulıwmalıq sanın N arqalı belgileybiz. Oyımızda orayı q zaryadında jaylasqan ıqtıyarlı r radiusına iye bolǵan sferanı júrgizemiz. Qabıl etilgen shártke sáykes, bettiń bir birligin kesip ótetuǵın kernewlik sızıqlarınıń sanı bettiń noqatlarındaǵı kernewliktiń mánisine teń. Ótkerilgen sferalıq bet radiallıq kernewlik sızıqlarına perpendikulyar. Boljawımız boyınsha, olardıń ulıwmalıq sanı N ge teń, demek, bettiń bir birligi arqalı $\frac{N}{4\pi r^2}$ dana sızıq ótedi. (1)-shárt boyınsha, san mánisi boyınsha bul shama zaryadtan r qashıqlıǵındaǵı kernewlikke teń bolıwı kerek, yaǵnıy

$$\frac{N}{4\pi r^2} \cdot \frac{q}{r^2}.$$

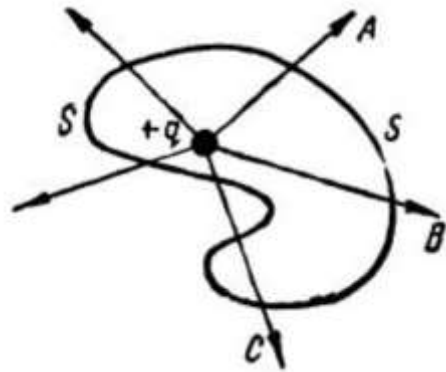
Bunnan

$$N = 4\pi q. \quad (4)$$

teńligine iye bolamız. Demek, *hár bir q noqatlıq zaryadınan simmetriyalı jaylasqan $4\pi q$ dana kernewlik sızıǵın ótkeriwge boladı eken.*



22-súwret. Jabıq betke túsirilgen normallardıń oń baǵıtı.



23-súwret. ıqtıyarlı jabıq betti kernewlik sızıqlarınıń kesiwi.

Bul jaǵdaydı ulıwmalastırıw arqalı tuyıq bet arqalı ótetuǵın kernewlik sızıqlarınıń sanın usı bettiń ishinde jaylasqan zaryadlardıń muǵdarı menen baylanıstıratuǵın Ostrogradskiy-Gauss teoremasın dep atalatuǵın teoremanı keltirip shıǵaradı. Bul teorema kóp sanlı dara jaǵdaylar ushın shekli ólshemlerge yamasa hátte sheksiz úlken ólshemlerge iye bolǵan denelerdegi zaryadlar tárepinen payda etilgen maydanniń kernewlik vektorın anıqlawdı jeńillestiredi.

Ostrogradskiy-Gauss teoremasın bılayınsha aytıwǵa boladı: zaryadlardı óziniń ishine alatuǵın qálegen tuyıq (jabıq) bet arqalı ótetuǵın kernewlik aǵısı sol zaryadlardıń algebralıq qosındısı 4π ge kóbeytkenge teń.

Bul jaǵdaydı túsindiriw ushın jabıq bet ushın oń baǵıt sıpatında bettiń elementine usı bet qorshap turǵan kólemnen sırtqa qaray túsirilgen normaldıń baǵıtın alıwdı shárt etip alayıq (22-súwret). Bunday jaǵdayda berilgen bet penen qorshalǵan kólemnen shıǵatuǵın kernewlik sızıqları oń belgige iye aǵıstı payda etedi; al kólemge kiretuǵın sızıqlar teris belgige iye aǵıstı payda etedi.

Normaldıń baǵıtı sıpatında biz qabıl etken shártti qabıl etip bir noqatlıq zaryad ushın Ostrogradskiy-Gauss teoremasınıń durıs ekenligin kórsetemiz. Oń belgige iye q noqatlıq zaryadın ıqtıyarlı S beti menen qorshaymız (23-súwret). Joqarıda dálillengen jaǵday boyınsha zaryadtan $4\pi q$ dana kernewlik sızıǵın shıǵaramız. Bul sızıqlardıń hár qaysısı S betin tek bir ret kesip ótedi (A hám B sızıqları sıyaqlı) yamasa taq san ret kesip ótedi (mısalı, C sızıǵı betti úsh ret kesip ótken). Biraq, C sızıǵı S betinen eki ret sırtqa shıǵadı hám tek bir ishke kiredi; aǵıstıń belgisi sıpatında

qoyılğan shárt boyınsha betten shıǵıw ornında ol oń aǵıstı, al kiriw ornında teris aǵıstı payda etedi. Sonlıqtan, jabıq S beti arqalı ótetuǵın kernewlik aǵısın esaplaǵanda C kernewlik sızıǵınıń tek bir ret ǵana esapqa alınıwı kerek. Basqa kernewlik sızıqları ushın da awhal tap usınday boladı. Nátiyjede q zaryadın qorshap turǵan qálegen formaǵa iye bolǵan tuyıq bet arqalı aǵıp ótetuǵın kernewlik sızıqlarınıń sanı q noqatlıq zaryadınan shıqqan kernewlik sızıqlarınıń sanına, yaǵnıy $4\pi q$ ǵa teń boladı eken. Anıqlaması boyınsha, kernewlik sızıqlarınıń tolıq sanı bolǵan N shaması S tuyıq beti arqalı ótetuǵın aǵıstı anıqlaydı.

Solay etip, bir noqatlıq zaryad ushın Ostrogradskiy-Gauss teoremasınıń durıs ekenligi dálillendi.

Tuyıq bettiń ishinde k dana $q_1, q_2, \dots, q_k$ zaryadları bar bolǵan jaǵday ushın olardıń biriniń (onı q_i arqalı belgileybiz) payda etken kernewlik aǵısın qaraymız. Joqarıda ayılǵanlarǵa sáykes bul zaryad payda etetuǵın aǵıs $N_i = 4\pi q_i$ shamasına teń hám bul aǵıstıń belgisi zaryadtıń belgisindey.

Barlıq zaryadlar payda etken barlıq aǵıs N hár bir zaryad payda etken aǵıslardıń algebralıq summasına teń, yaǵnıy

$$N = \sum N_i = 4\pi \sum q_i. \quad (5)$$

Bul nátiyje joqarıda ayılǵan Ostrogradskiy-Gauss teoremasınıń mazmunın quraydı.

Ostrogradskiy-Gauss teoremasınan bir qatar áhmiyetli nátiyjeler kelip shıǵadı.

Birinsiden, teoremadan kernewlik sızıqlarınıń tek oń zaryadlardan baslanatuǵınlıǵı hám tek teris zaryadlarda tamam bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı.

Ekinshiden, eger biz absolyut summası nolge teń bolǵan zaryadlardı óziniń ishine alatuǵın tuyıq betti alatuǵın bolsaq, onda usı bet arqalı ótetuǵın kernewlik aǵısı da nolge teń boladı; bul tuyıq bet penen qorshalǵan kólemge kiretuǵın kernewlik sızıqlarınıń sanınıń usı kólemnen shıǵatuǵın kernewlik sızıqlarınıń sanına teń bolatuǵınlıǵın arǵartadı.

Úshinshiden, eger maydanda tuyıq bet ishinde zaryadlar joq etip ótkerilgen bolsa, onda kernewlik sızıqları onıń ishinde payda bolmay yamasa tamam bolmay usı bet arqalı. Demek, usı kólemge kiretuǵın kernewlik sızıqlarınıń sanı onnan shıǵatuǵın kernewlik sızıqlarınıń sanı da hám bunday bet arqalı ótetuǵın kernewlikliktiń aǵısı da nolge teń boladı.

§ 127. Ostrogradskiy-Gauss teoremasın qatańıraq keltirip shıǵarıw. 126-paragrafta qaralǵan máselelerdiń áhmiyetli ekenligin názerde tutıp, Ostrogradskiy-Gauss teoreması kernewlik sızıqları túsiniǵine súyenip emes, al tikkeley Kulon nızamınan keltirip shıǵaramız. Bunnan burırǵı jaǵdaydaǵıday, oblastlardıń sheklerinde maydandı bir tekli dep qaraw ushın maydandı júdá kishi bolǵan oblastlarǵa bólemiz.

Eger usınday oblastta sheksiz kishi bolǵan dS betin alsaq (ris. 24), onda onıń sheklerinde $\mathbf{E}$ kernewligin shaması boyınsha da, baǵıtı boyınsha da turaqlı dep esaplawǵa boladı. Maydangá túsirilgen normaldıń oń baǵıtın saylap alamız hám onı $\mathbf{n}$ arqalı belgileybiz. dS beti arqalı ótetuǵın kernewlikliktiń dN elementar aǵısı

$$dN = E_n dS$$

qatnasınıń járdeminde anıqlanadı. Bul qatnasta E_n arqalı $\mathbf{E}$ vektorınıń $\mathbf{n}$ normalınıń baǵıtına túsirilgen proekciyası belgilengen. Endi usı dS elementi $d\omega$ denelik múyeshinde kórinetuǵın noqattaǵı noqatlıq q zaryadı tárepinen payda etilgen dS maydanı arqalı ótetuǵın elementar aǵıstı esaplaymız (24-súwret). Kulon nızamı boyınsha $\mathbf{E}$ kernewligi zaryad turǵan orında baslanatuǵın $\mathbf{r}$ radius-vektorınıń boyı menen baǵıtlanǵan. Sonlıqtan, $\mathbf{n}$ normalı menen $\mathbf{E}$ kernewligi arasındagı α múyeshi dS hám dS_0 bet elementleri arasındagı múyeshke teń boladı (dS_0 arqalı dS betiniń $\mathbf{r}$ radius-vektorına perpendikulyar baǵıtqa túsirilgen proekciyası belgilengen). Bunnan

$$dN = E_n dS = E \cos \alpha \, dS = E dS_0$$

teńligi kelip shıǵadı. Al Kulon nızamı boyınsha

$$E = \frac{q}{r^2}$$

teńligi orınlı bolǵanlıqtan, dN ushın jazılǵan ańlatpanı

$$dN = \frac{q}{r^2} dS_0$$

túrinde jaza alamız.

Anıqlaması boyınsha $\frac{dS_0}{r^2}$ shaması zaryad turǵan orınnan dS elementi kórinetuǵın $d\omega$ denelik múyeshine teń. Bunday jaǵdayda eń aqırında

$$dN = q d\omega \quad (1)$$

ańlatpasına iye bolamız, yaǵnıy noqatlıq zaryad tárepinen dS elementar beti arqalı payda etiletuǵın kernewliliktiń elementar aǵısı bolǵan dN shaması zaryadtıń shaması q menen zaryad turǵan orınnan dS beti kórinetuǵın denelik múyesh $d\omega$ nıń kóbeymesine teń.

Tuyıq bet arqalı aǵıp ótetuǵın tolıq aǵıs N bettiń elementleri arqalı ótetuǵın elementar aǵıslardıń qosındısınan turadı. Eger biz elementar aǵıslardıń sheksiz kishi ekenligin názerde tutatuǵın bolsaq, onda summalawdı integrallaw menen almasırw kerek boladı:

$$N = \int dN.$$

dN ushın jazılǵan (1)-formulanı paydalanıp, sońǵı ańlatpanı bılayınsha kóshirip jazamız:

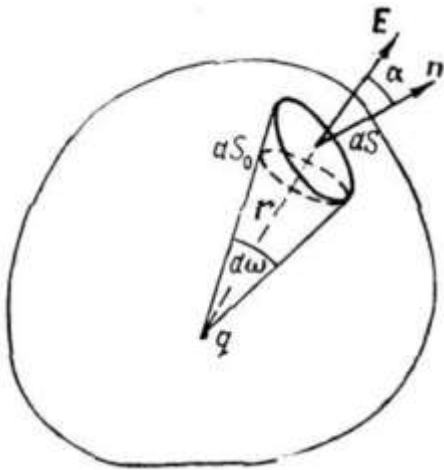
$$N = q \int d\omega. \quad (2)$$

Burıńıday, normaldıń oń baǵıtı sıpatında berilgen bet penen sheklengen kólemnen shıǵatuǵın baǵıtı qabıl etemiz. Eger zaryad turǵan orınnan qaraǵanda bettiń ishki tárepi kórinetuǵın bolsa, onda sáykes denelik múyeshti oń dep esaplaymız.

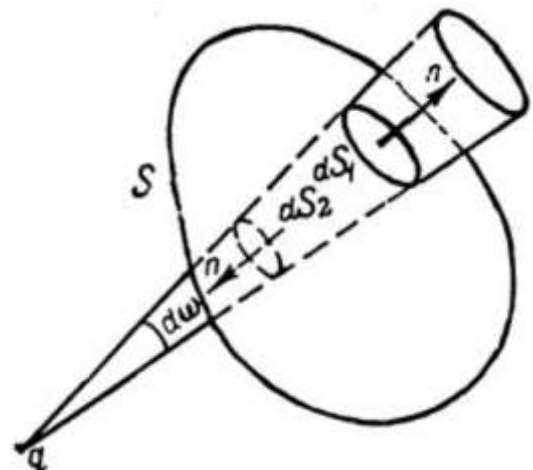
Eger zaryad bettiń ishinde jaylasqan bolsa, onda (2)-formuladaǵı integral usı bettiń ishinde turıp qaraǵanda tuyıq bet kórinetuǵın barlıq denelik múyesh boyınsha alınadı. Onıń 4π ge teń ekenligi belgili. Bunnan

$$N = q \int d\omega = 4\pi q$$

teńligine iye bolamız.



24-súwret. Ostrogradskiy-Gauss teoremasın dálirek keltirip shıǵarıwǵa.



25-súwret. Tuyıq betten sırtta jaylasqan zaryadтан shıǵatuǵın aǵıstı anıqlawǵa.

Eger zaryad tuyıq betten sırtta jaylasqan bolsa (25-súwret), onda hár bir $d\omega$ denelik múyeshi integraldıń astına plus belgisi menen (zaryad turǵan noqattan bettiń dS_1 elementi ishki tárepinen kórinetuǵın jaǵdayda) hám zaryad turǵan noqattan bettiń dS_1 elementi ishki tárepinen kórinetuǵın jaǵdayda minus belgisi menen kiredi; demek, bul jaǵdayda integrallawdıń nátiyjesinde noldı alamız. Bunnan $N = 0$ teńliginiń orınlanatuǵınlıǵı kelip shıǵadı.

Bul integrallawlardıń nátiyjeleri Ostrogradskiy-Gauss teoremasın beredi: tuyıq bet arqalı

ósetuǵın kernewlik aǵısı usı bettiń ishinde jaylasqan zaryadtıń 4π ge kóbeymesine teń.

§ 128. Ostrogradskiy-Gauss teoremasınıń qollanılıwı. Qálegen zaryadtı sheksiz kishi bolǵan sheksiz úlken sanlı kishi zaryadlardıń qosındısınan turadı dep esaplawǵa bolatuǵın bolǵanlıqtan, Ostrogradskiy-Gauss teoremasın qálegen formaǵa hám ólshemlerge iye bolǵan zaryadlar ushın durıs dep esaplawǵa boladı. Onı qollanıwdıń jemisli ekenligi usı jaǵdayǵa tiykarlanǵan.

Ostrogradskiy-Gauss teoremasın paydalanıw máselesin qaramastan burın zaryadlardıń kólemlik hám betlik tıǵızlıqları túsinipleri menen tanısamız.

Kóp sanlı máselelerdi qaraǵanda zaryadlar bazı bir kólemde tarqalǵan bolıp shıǵadı. Bunday máselelerde zaryadlardıń kólemlik tarqalıwın kirgiziw áhmiyetli. Meyli, bazı bir ΔV kóleminde Δq zaryadı bar bolsın. Bunday jaǵdayda ortasha kólemlik tıǵızlıq haqqında gáp etkende

$$\bar{\rho} = \frac{\Delta q}{\Delta V} \quad (1)$$

qatnasınıń járdeminde anıqlanatuǵın fizikalıq shamanı túsinemiz. Berilgen noqattaǵı ρ tıǵızlıǵın tabıw ushın ΔV kólemin nolge umtıldırǵandaǵı usı qatnas umtılatuǵın shekti esaplawımız kerek:

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta q}{\Delta V} \right). \quad (1a)$$

Bazı bir jaǵdaylarda zaryadlar denelerdiń betinde jaylasadı. Sonıń menen birge zaryadlardıń qatlamınıń qalırlıǵı esapqa almawǵa bolatuǵınday dárejede kishi boladı. Bunday jaǵdaylarda biz zaryadlardıń betlik tıǵızlıǵı túsiniǵın kirgizemiz. Meyli, bazı bir ΔS betindegi Δq zaryad bar bolsın. Sonlıqtan, zaryadtıń ortasha betlik tıǵızlıǵı $\bar{\sigma}$

$$\bar{\sigma} = \frac{\Delta q}{\Delta S} \quad (2)$$

qatnasınıń járdeminde anıqlanadı. Berilgen noqattaǵı betlik tıǵızlıq bolǵan σ shamasın tabıw ushın ΔS beti nolge umtıldırǵandaǵı shekti alıw kerek:

$$\sigma = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta q}{\Delta S} \right). \quad (2a)$$

Endi Ostrogradskiy-Gauss teoremasınıń járdeminde bar qatar jaǵdaylar ushın maydannıń kernewligin anıqlaymız.

1. Betiniń maydanı sheksiz úlken teń ólsheimli zaryadlangan tegisliktiń maydanı. Betiniń maydanı sheksiz úlken bolǵan zaryadınıń betlik tıǵızlıǵı barlıq noqatlarında $+\sigma$ ǵa teń zaryadlangan bet payda etken elektrostatikalıq maydandı qaraymız Simmetriya kóz-qarasları tiykarında kernewlik sıızqların betke perpendikulyar hám onnan sırtqı qaray baǵıtlangan dep esaplaw kerek. Usı boljawdıń durıs ekenligine iseniw ushın qarama-qarsı pikirde bolayıq hám kernewlik sıızqları betke túsirilgen perpendikulyarǵa salıstırǵanda bazı bir múyeshke burılǵan dep boljayıq. Eger kernewlik sıızqları 26-súwrette punktir sıızqlarday bolıp baǵıtlangan bolsa, onda bul jaǵdaydıń ózi oń zaryad joqarǵı yarım tegislikten tómengi yarım tegislikke salıstırǵanda kúshlirek iyterilgen bolar edi. Bul jaǵday biziń tegisliktiń sheksiz ekenligi hám onıń betindegi zaryadtıń tıǵızlıǵınıń turaqlı ekenligi haqqındaǵı biziń boljawımızǵa qayshı kelgen bolar edi. Tap usınday tallawlardıń tiykarında kernewlik sıızqlarınıń betke normal baǵıtta ǵana baǵıtlanatuǵınlıǵın, al basqa baǵıtlar boyınsha baǵıtlana almaytuǵınlıǵın kórsetiwge boladı. Bettiń oń tárepinde jaylasqan A noqatın qaraymız. Bul noqattaǵı kernewlik ońǵa qaray baǵıtlangan; bul bir birlik oń zaryadqa zaryadlangan tegislik tárepinen tásir etetuǵınlıǵınan kelip shıǵadı. Eger biz tegisliktiń shep tárepinde jaylasqan B noqatın alsaq, onda tallawımızdı qaytalap, sol noqattaǵı E kernewliginiń oǵan simmetriyalı jaylasqan A noqatındaǵı kernewlikke qarama-qası baǵıtlanganına kóz jetkeriwge boladı. Demek, kernewlik sıızqları tegislikten shıǵatuǵın hám sol tegislikke perpendikulyar bolǵan tuwrılar bolıp tabıladı eken.

Ostrogradskiy-Gauss teoremasın paydalanıp, A noqatındaǵı kernewlikti anıqlaymız. Tuyıq bet sıpatında bılayınsha saylap alıńǵan cilindrlik betti saylap alamız (27-súwret): cilindrdiń ortasha kesimi sıpatında zaryadlangan bette iqtıyarlı túrde S uchastkasın alamız; cilindrdiń qaptal betlerin

kernewlik sızıqlarına parallel etip alamız. Cilindrдің eki ultanı bolğan S_1 hám S_2 betlerin sáykes A hám B noqatları arqalı ótetuǵın hám tegislikke parallel etip alamız. Bunday jaǵdayda simmetriya kóz-qarasınan S_1 hám S_2 betleriniń hár bir noqatındaǵı kernewliklerdi san mánisleri boyınsha bir birine teń hám A noqatındaǵı biz izlep atırǵan E kernewligine teń dep esaplay alamız. Biz qarap atırǵan cilindrlik bet arqalı ótip atırǵan kernewlik aǵısın esaplaymız. Qaptal betler arqalı ótip atırǵan aǵıs nolge teń, sebebi aǵıs qaptal betlerge parallel. Demek, N tolıq aǵıs S_1 hám S_2 betleri arqalı ótetuǵın aǵıslardan qosıladı. Bul eki aǵıs ta oń belgige iye. S_1 hám S_2 betleri kernewlik sızıqlarına perpendikulyar bolǵanlıqtan, olar arqalı ótetuǵın aǵıslar kernewliktiń shamasın menen bettiń maydanınıń kóbeymesine teń boladı. Solay etip, mınaǵan iye bolamız:

$$N = N_1 + N_2 = ES_1 + ES_2 = E \cdot 2S.$$

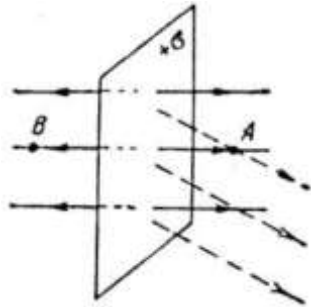
Ostrogradskiy-Gauss teoreması boyınsha, tolıq aǵıs bettiń ishinde jaylasqan zaryadtır muǵdarı menen 4π diń kóbeymesine teń. Bul zaryadtıń shaması σS ke teń. Demek,

$$2SE = 4\pi\sigma S.$$

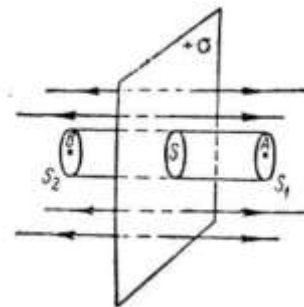
Bunnan, biz izlep atırǵan E kernewligi mınaǵan teń bolıp shıǵadı:

$$E = 2\pi\sigma. \quad (3)$$

E niń mánisi A noqatı menen tegislikke shekemgi qashılıqtan ǵárezsiz eken. Tap usınday juwmaq B noqatına da tiyisli. Solay etip, biz tegisliktiń oń tárepinde de, shep tárepinde de bir tekli maydanlardı aladı ekenbiz. Eger tegislik teris zaryadlangan bolsa, onda kernewliktiń baǵıtı bir tallaǵan jaǵdaydaǵıǵa qarama-qarsı: sızıqlar tegislikke kiredi. Alınǵan nátiye tek betiniń maydanı sheksiz úlken bolǵan tegislik ushın durıs. Sebebi tek usınday jaǵdayda ǵana joqarıda paydalanılǵan simmetriya kóz-qarasın paydalanıwǵa boladı; biraq ótkerilgen tallawlardı juwıq túrde shekli tegisliktiń shetlerinen qashıq bolǵan orta bólimi ushın paydalanıwǵa boladı.



26-súwret. Beti sheksiz úlken bolǵan tegisliktiń maydanınıń kernewlik sızıqları.



27-súwret. Beti sheksiz úlken bolǵan tegisliktiń maydanınıń kernewligin esaplawǵa.

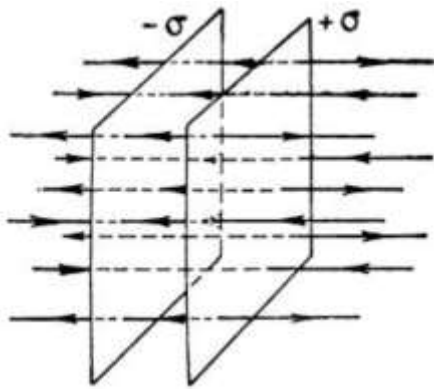
2. Tıǵızlıqları $+\sigma$ hám $-\sigma$ shamalarına teń hár qıylı belgilerge iye zaryadlar menen bir tekli zaryadlangan bir birine parallel bolǵan eki tegisliktiń maydanı.

Sheshimdi belgileri hár qıylı zaryadlar menen zaryadlangan eki tegisliktiń maydanların geometriyalıq jaqtan qosıw jolı menen tikkeley alıwǵa boladı. 28-súwretten eki tegisliktiń arasındaǵı eki maydanniń da bir tárepke qaray baǵıtlanganlıǵı hám usıǵan sáykes olardıń geometriyalıq qosındısıń arifmetikalıq qosındı bolıp tabılatuǵınlıǵın kórinip tur. Hár bir bettiń kernewliginiń $2\pi\sigma$ shamasına teń ekenligin kórdik. Demek, tegisliklerdiń arasındaǵı tolıq kernewlik mınaǵan teń:

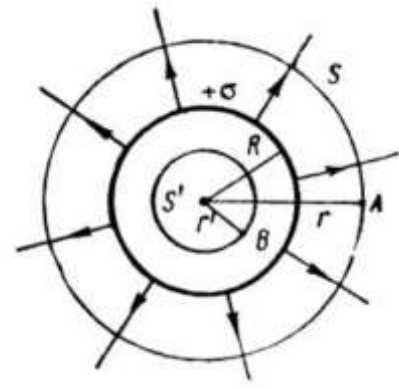
$$E = 2\pi\sigma + 2\pi\sigma = 4\pi\sigma. \quad (4)$$

Eki tegislik tárepinen oń táreptegi tegisliktiń oń tárepindegi hám shep táreptegi tegisliktiń shep tárepindegi payda etilgen kernewliklerdiń baǵıtları qarama-qarsı. Demek, olardıń geometriyalıq qosındısı olardıń san mánisleriniń ayırmasına teń; hár bir tegisliktiń payda etken kernewlikleriniń san shaması $2\pi\sigma$ ge teń bolǵanlıqtan, tegisliklerden sırtta jaylasqan noqatlardaǵı qosındı kernewlik nolge teń:

$$E = 0. \quad (4a)$$



28-súwret. Bir birine parallel bolǵan eki tegisliktiń kernewlik sıızıqları.



29-súwret. Zaryadlangan sferanıń maydanınıń kernewligin tabıwǵa.

3. Bir tekli zaryadlangan sferalıq bet payda etken maydannıń kernewligi. Radiusı R bolǵan sferalıq bet oń belgige iye zaryad penen zaryadlangan hám bettiń barlıq noqatlarında zaryadtıń betlik tıǵızlıǵı $+\sigma$ turıqlı dep boljayıq. Sferalıq bettiń ulıwmalıq zaryadın q arqalı belgileymiz. Máseleni eki bólimge bólemiz: a) *sferalıq betten sırttaǵı elektrostatikalıq maydannıń* kernewligin anıqlaw, b) *sferalıq maydannıń ishindegi* kernewlikti anıqlaw.

Zaryadlangan bettiń orayınan $r > R$ qashıqlıǵında jaylasqan A noqattı alamız (29-súwret). Usı noqat arqalı orayı zaryadlangan sferanıń orayında jaylasqan radiusı r ge teń S sferalıq betin ótkeremiz. Simmetriya kóz-qarasınan bul bettiń barlıq noqatlarındǵı kernewliktiń san mánisleri birdey bolıwı kerek. Sonıń menen birge, simmetriya kóz-qarasınan bettiń hár bir noqatındǵı kernewlik radius-vektordıń dawamı túrinde baǵıtlangan.

Radiusı r bolǵan S sferalıq betine Ostrogradskiy-Gauss teoremasın qollanamız. Bul bet kernewlik sıızıqlarına perpendikulyar bolǵanlıqtan, tolıq aǵıstı E kernewligin bettiń maydanınıń shamasına kóbeytiw jolı menen alamız. Bunnan tolıq aǵıstıń $E \cdot 4\pi r^2$ shamasına teń ekenligi kelip shıǵadı.

Ostrogradskiy-Gauss teoreması boyınsha

$$E \cdot 4\pi r^2 = 4\pi q.$$

Bunnan $r > R$ teńsizligi orınlanatuǵın jaǵday ushın

$$E = \frac{q}{r^2} \quad (5)$$

teńligine iye bolamız, yaǵnıy *bir tekli zaryadlangan sferalıq bet óziniń sırtındǵı noqatlarda usı bettegi barlıq zaryad usı bettiń orayında jaylasqan jaǵdaydaǵıday kernewlikti payda etedi eken.*

Endi sferalıq bettiń ishinde jaylasqan noqatlarǵa kelemiz. Sferanıń orayınan $r' < R$ qashıqlıǵında jaylasqan B noqatın alamız (ris. 29) hám usı noqat arqalı orayı zaryadlangan sferanıń orayı bolǵan S' sferalıq betti ótkeremiz. Bul bettiń barlıq noqatlarındǵı kernewliktiń san mánisi boyınsha birdey bolatuǵınlıǵı ayqın. Tap sol sıyaqlı, joqarıda kórsetilgen jaǵdaydaǵıday, simmetriya kóz-qarası boyınsha kernewlik (eger kernewlik nolge teń bolmasa) tek radiallıq baǵıtqa iye, yaǵnıy S' sferalıq betine perpendikulyar.

Ostrogradskiy-Gauss teoremasın S' sferalıq betine qollanıp, mınanı alamız:

$$E \cdot 4\pi r'^2 = 0.$$

Sebebi S' betiniń ishindegi zaryad nolge teń, yaǵnıy $r' < R$ teńsizligi orınlanatuǵın jaǵdaylarda

$$E = 0. \quad (6)$$

Demek, *bir tekli zaryadlangan sferalıq bettiń ishindegi elektrostatikalıq maydannıń kernewligi nolge teń.*

(5)- hám (6)-formulalardıń zaryadı q bolǵan ótkizgish shar ushın da orınlanatuǵınlıǵın

kórsetiwge boladı (132-paragraf penen salıstırınız).

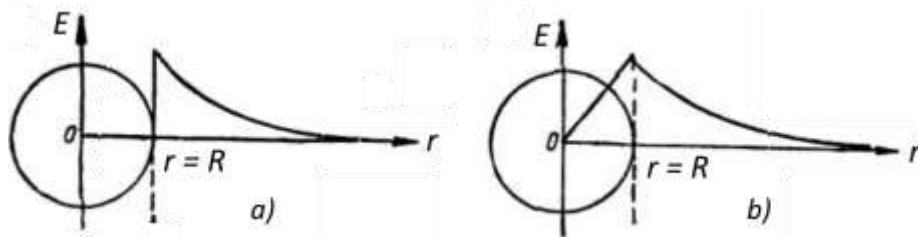
4. Teń ólsheuli zaryadlangan sfera payda etetuǵın maydannıń kernewligi. Radiusı R bolǵan sferanı alamız. Usı sferanıń betinde q zaryadı bir tekli tarqalǵan dep boljayıq. Bunday jaǵdayda zaryadtıń kólemlik tıǵızlıǵı

$$\rho = \frac{q}{V} = \frac{q}{\frac{4}{3}\pi R^3}$$

formulasınıń járdeminde esaplanadı. Zaryadlangan sferadan sırtta $r > R$ qashıqlıǵında jaylasqan ıqtıyarlı túrde alınǵan A noqattaǵı (29-súwret) maydannıń kernewligi zaryadlangan sferalıq bet ushın alınǵan formula boyınsha tabıladı:

$$E = \frac{q}{r^2}.$$

Bul kernew radius-vektordıń dawamı túrinde baǵıtlangan, sebebi simmetriya kóz-qarası boyınsha esaplawlar sferalıq bet ushın júrgizilgen esaplawlarday boladı. Solay etip, *teń ólsheuli zaryadlangan sfera ózinen sırttaǵı noqatlarda onıń zaryadı usı sferanıń orayında jaylasqan jaǵdaydaǵıday kernewlikti payda etedi.*



30-súwret. Maydannıń kernewligi: a) - beti zaryadlangan sferaǵa, b) - kólemlik zaryadlangan sferaǵa tiyisli.

Zaryadlangan sferanıń ishinde hám onıń orayınan $r' < R$ qashıqlıqta jaylasqan B noqatındaǵı kernewlikti anıqlaymız. Bul jaǵdayda da simmetriya tárepinen qoyılatuǵın shárt joqarıdaǵıday hám usıǵan baylanıslı radiusı r' bolǵan sferalıq bettiń barlıq noqatlarındaǵı kernewlikler san mánisleri boyınsha birdey hám usı sferanıń ishindegi q' zaryadtıń usı sferanıń dál orayında turǵan jaǵdayǵa sáykes keledi. Sonıń menen birge bettiń hár bir noqatında kernewlikler radially baǵıtqa iye. Radiusı r' bolǵan bettiń ishindegi q' zaryadı mınaǵan teń:

$$q' = \rho \cdot \frac{4}{3}\pi r'^3$$

yamasa

$$\rho = \frac{q}{\frac{4}{3}\pi R^3}$$

teńligi orınlı bolǵanlıqtan,

$$q' = q \frac{r'^3}{R^3}.$$

Ostrogradskiy-Gauss teoremasın radiusı r' bolǵan sferalıq betke qollansaq, onda

$$N = E \cdot 4\pi r'^2 = 4\pi q' = 4\pi \frac{r'^3}{R^3} q$$

hám bunnan

$$E = \frac{N}{4\pi r'^2} = \frac{q}{R^3} r' \quad (7)$$

teńligin alamız. (7)-formuladan *teń ólsheuli zaryadlangan sferanıń kernewliginiń onıń orayınan qashıqlıqqa proporcional* ósetuǵınlıǵın kóremiz. Bul jaǵday kernewliktiń sferanıń orayınan kernewligi esaplanıp atırǵan noqatqa shekemgi qashıqlıqlarda jaylasqan zaryadlar tárepinen

payda etiletuǵınlıǵı menen baylanıslı. Ostrogradskiy-Gauss teoreması boyınsha oyımızda ótkerilgen radiusı r' bolǵan sferanıń sırtında jaylasqan zaryadlar usı sferanıń betinde hesh qanday kernewlikti payda etpeydi.

30-a súwrette zaryadlangan sferalıq bet, al 30-b súwrette kólemi boyınsha zaryadlangan sfera ushın kernewliktiń grafikleri berilgen.

5. Teń ólsheuli zaryadlangan sheksiz cilindr tárizli bet tárepinen payda etiletuǵın maydanniń kernewligi. Radiusı R , zaryadtıń tıǵızlıǵı $+\sigma$ turaqlı bolǵan cilindrlik betti alamız. Cilindrdiń kósherinen $r > R$ qashıqlıǵında turǵan A noqattaǵı kernewlikti tabamız (31-súwret). Máseleniń simmetriyası A noqatındaǵı kernewliktiń $\mathbf{r}$ radius-vektorınıń dawamı boyınsha baǵıtlangan ekenligin aytıwǵa múmkinshilik beredi. Ostrogradskiy-Gauss teoremasın A noqatı arqalı ótkerilgen kósheri zaryadlangan cilindrdiń kósheri menen sáykes keletuǵın cilindr ushın qollanamız. Cilindrdiń joqarǵı hám tómengi ultanları cilindrdiń kósherine perpendikulyar hám bir birinen l qashıqlıǵında jaylasqan bolsın. Bul bet arqalı ótetuǵın tolıq aǵıs tek qaptal betler arqalı ótetuǵın aǵıslar menen ańlatıladı, sebebi aǵıs cilindrdiń ultanlarına parallel hám olar arqalı ótip atırǵan aǵıs nolge teń. Kernewlik sıızıqları cilindrdiń qaptal betlerine perpendikulyar bolǵanlıqtan, biz N tolıq aǵıstı E kernewligin qaptal bettiń maydanı $2\pi r l$ ge kóbeytiw arqalı alamız:

$$N = 2\pi r l \cdot E. \quad (8)$$

Ostrogradskiy-Gauss teoremasına sáykes, N aǵısı san mánisi boyınsha usı aǵıs ótetuǵın bettiń ishinde jaylasqan zaryadtıń 4π ge kóbeymesine teń; bul q zaryadı cilindrdiń l uzınlıǵına sáykes keletuǵın zaryadqa teń:

$$q = \sigma \cdot 2\pi R l$$

Demek, Ostrogradskiy-Gauss teoreması boyınsha:

$$N = 4\pi q = 4\pi \sigma \cdot 2\pi R l$$

teńliklerine iye bolamız hám N ushın jazılǵan bul ańlatpanı (8)-ańlatpa menen salıstırıp

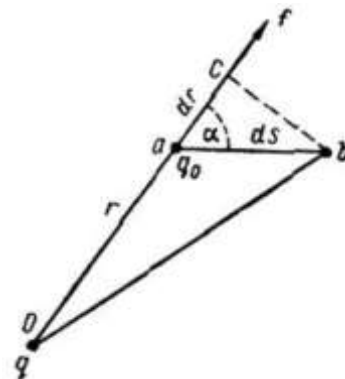
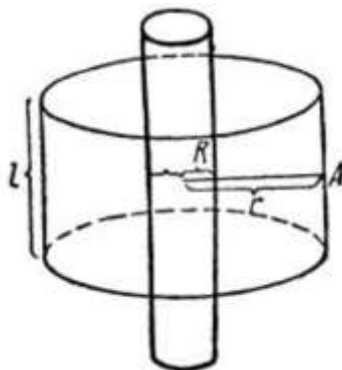
$$E = \frac{4\pi \sigma R}{r} \quad (9)$$

formulasına iye bolamız. $2\pi R$ kóbeymesi san mánisi boyınsha cilindrdiń qaptal betiniń maydanına teń bolǵanlıqtan, $\eta = 2\pi R \sigma$ zaryadı cilindrdiń uzınlıǵınıń bir birligine sáykes keletuǵın zaryadtıń muǵdarı bolıp tabıladı. Bunnan (9)-formulaǵa mınaday túrdi beriwge boladı:

$$E = \frac{2\eta}{r}. \quad (9a)$$

Maydanniń kernewligi cilindrdiń kósherine shekemgi qashıqlıqqa keri proporcional ózgeredi. Tap usınday usıl menen teń ólsheuli zaryadlangan cilindrdiń ishindegi maydanniń kernewliginiń nolge teń bolatuǵınlıǵın ańsat kórsetiwge boladı.

Joqarıda keltirilgen mısallar Ostrogradskiy-Gauss teoremasın paydalanıp simmetriyalı bolǵan elektrostatikalıq maydanlardı esaplawdıń múmkin ekenligin kórsetedi. Bunday jaǵdayda simmetriya kóz-qarasları tiykarında kernewlik sıızıqlarınıń baǵıtların aldın-ala kórsetiwdiń múmkinshiligi tuwıladı.



31-súwret. Zaryadlangan cilindrдің
maydanınıń kernewligin anıqlawǵa.

32-súwret. q_0 zaryadın ds jolı boyınsha
qozǵaǵanda islengen jumıstı anıqlawǵa.

§ 129. Elektrostatikalıq maydan kúshleriniń jumısı. Potencial. Zaryadlardı elektrostatikalıq maydanda qozǵaǵanda zaryadqa tásir etetuǵın kúshler jumısı isleydi. Tórende mınaday jaǵday elektrostatikalıq maydanniń kúshleriniń mınaday qásiyetke iye ekenligi kórsetiledi: usı kúshler tárepinen islengen jumıstıń shaması zaryadtıń qanday jol menen orın almasıratuǵınlıǵınan ǵárezli emes, al tek dáslepki hám aqırǵı orınlardan ǵana ǵárezli. Maydanniń bul qásiyeti onıń qálegen noqatın maydanniń noqatınıń potencialı dep atalatuǵın ayırıqsha funkciyanıń járdeminde táriyiplewge múmkinshilik beredi. Zaryadtı bir noqattan ekinshi noqatqa kóshirgende islengen jumıstıń shaması usı noqatlardıń potenciallarınıń ayırması arqalı anılatıladı.

Dáslep elektrlik kúshlerdiń noqatlıq zaryadlardıń maydanında islegen jumısın qaraymız.

q zaryadınıń maydanında a noqatınan oǵan júdá jaqın jaylasqan b noqatına qozǵalatuǵın q_0 oń zaryadın alamız (32-súwret). Meyli, q zaryadı bazı bir O noqatında tınıshlıqta turǵan bolsın. q_0 zaryadınıń a hám b noqatlarınıń arasındaǵı sheksiz kishi bolǵan ds orın almasırwın tuwrı sızıqlı hám usı orın almasıwdıń barısında q_0 zaryadına tásir etetuǵın f kúshin shaması boyınsha da, baǵıtı boyınsha da turaqlı dep esaplawǵa boladı. Jumıstıń anıqlamasına sáykes f kúshiniń ds aralıǵına kóshirgende islegen jumısı dA mınaǵan teń:

$$dA = f ds \cdot \cos \alpha.$$

Bul anılatpada α arqalı f kúshi menen (bul kúshitiń baǵıtı E kernewiniń baǵıtı menen birdey) ds orın almasıwı arasındaǵı múyesh belgilengen. b noqatınan Oa tuwrısınıń dawamı túrinde perpendikulyar túsiremiz, bunday jaǵdayda $ds \cdot \cos \alpha = Oc - Oa$ teńlikleriniń orınlı ekenligin kóremiz. Biraq, sheksiz kishi ds orın almasıwında Oc kesindisin Ob kesindisine teń boladı dep esaplaw múmkin. Bunnan $ds \cdot \cos \alpha = Ob - Oa = dr$ teńliklerine iye bolamız (dr arqalı q_0 zaryadın a noqatın b noqatına kóshirgende q menen q_0 zaryadlarınıń arasındaǵı qashıqlıqtıń ózgerisi belgilengen). Bunnan dA elementar jumısı ushın mınaday anılatpanı alamız:

$$dA = f dr. \quad (1)$$

f kúshi q_0 zaryadı menen q zaryadınıń arasındaǵı kulonlıq óz-ara tásirlesiw kúshi bolıp tabıladı; ds orın almasıwınıń kishi bolıwına baylanıslı usı aralıqtıń ishinde usı f kúshin turaqlı dep esaplawǵa bolatuǵınlıǵın atap óttik. Demek, onıń san shaması

$$f = \frac{qq_0}{r^2}$$

formulasınıń járdeminde anıqlanadı (bul formulada $r = Oa$). f tiń usı mánisin jumıstıń anılatpası bolǵan (1)-anılatpaǵa qoyıp, mınanı alamız:

$$dA = \frac{qq_0}{r^2} dr. \quad (2)$$

Meyli, endi q_0 zaryadı q zaryadınan r_1 qashıqlıǵında jaylasqan A noqatınan q zaryadınan r_2 qashıqlıǵında jaylasqan noqatına orın almasıratuǵın (33-súwret) hám A menen B noqatları bir birine jaqın emes bolsın. AB shekli orın almasırwındaǵı jumıstı anıqlaw ushın onı sheksiz kishi bolǵan ds orın almasırwlarına bólemiz. Usınday sheksiz kishi bolǵan hár bir ds orın almasırwında islengen dA jumısı (2)-formula menen anılatıladı, al AB shekli orın almasırwında islengen tolıq jumıs A barlıq elementar jumıslardıń qosındısınan, yaǵnıy r_1 den r_2 ge shekemgi sheklerde alıńǵan integralǵa teń:

$$A = \int_{r_1}^{r_2} \frac{qq_0}{r^2} dr. \quad (3)$$

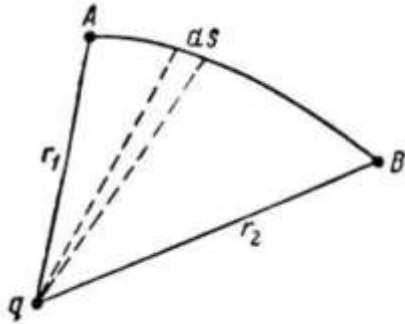
qq_0 kóbeymesin turaqlı shama sıpatında integral belgisiniń aldına shıǵarıp,

$$A = qq_0 \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = qq_0 \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

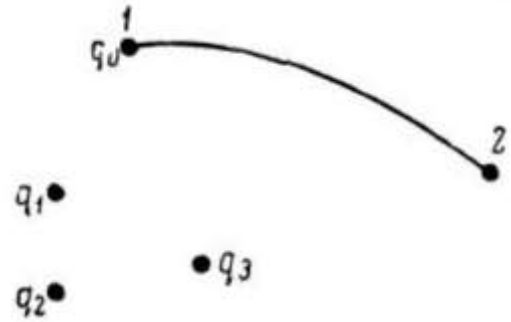
ańlatpasına iye bolamız. A jumısı ushın jazılǵan bul ańlatpanı biz

$$A = q_0 \left(\frac{q}{r_1} - \frac{q}{r_2} \right) \quad (4)$$

túrinde jaza alamız. Bunnan q_0 zaryadın noqatlıq q zaryadınıń maydanında orın almasırdında islengen jumıstıń qozǵalatuǵın zaryadtıń muǵdarı menen orın almasırdıń baslanǵısh hám aqırǵı noqatları ushın jazılǵan q/r shamalarınıń ayırmasına kóbeymesine teń bolatuǵınlıǵın kóremiz.



33-súwret. q zaryadın AB jolında qozǵaǵanda islengen jumıstı anıqlawǵa.



34-súwret. q_0 zaryadınıń $q_1, q_2, \dots, q_n$ zaryadlar sistemasınıń maydanında orın almasırdı.

Endi

$$V = \frac{q}{r} + C \quad (5)$$

teńliginiń járdeminde anıqlanatuǵın V shamasın kirgizemiz (C arqalı iqtıyarlı turaqlı belgilengen). A noqatı ushın V funkciyası mınaday

$$V_1 = \frac{q}{r_1} + C,$$

al B noqatı ushın mınaday

$$V_2 = \frac{q}{r_2} + C$$

mánislerge iye boladı.

$V_1 - V_2$ ayırması $\frac{q}{r_1} - \frac{q}{r_2}$ ayırmasına teń boladı, al additivlik C shamaları jıyısadı. (5)-teńliktiń járdeminde anıqlanatuǵın V funkciyası q noqatlıq zaryadınıń *potencialı* dep ataladı. Potencialdıń mánisin (4)-formulaǵa kirgizip

$$A = q_0(V_1 - V_2) \quad (6)$$

formulasın alamız. Bul formulada V_1 hám V_2 arqalı V funkciyasınıń A hám B noqatlarındaǵı mánisleri belgilengen. Solay etip, *zaryadtı kóshirgende maydannıń kúshleriniń islegen jumısı usı zaryadtıń muǵdarı menen joldıń baslanǵısh hám aqırǵı noqatlarınıń potenciallardıń ayırmasınıń kóbeymesine teń* hám usıǵan sáykes, islengen jumıstıń shaması joldıń formasınan ǵárezsiz bolıp, baslanǵısh hám aqırǵı noqatlardıń turǵan orınlarınan ǵárezli. Eger jol tuyıq bolsa, onda baslanǵısh hám aqırǵı noqatlar bir noqat bolıp tabıladı, bunnan $V_1 = V_2$ hám (6)-formula boyınsha $A = 0$. Demek *zaryadtı tuyıq jol menen qozǵaǵanda elektrlik kúshlerdiń islegen jumısı nolge teń*.

Endi zaryadtı noqatlıq zaryadlardıń sistemasınıń maydanında qozǵaǵanda islengen jumıstı qaraymız. $q_1, q_2, \dots, q_n$ noqatlıq zaryadlardıń sistemasın alamız (34-súwret) hám q_0 zaryadı usı sistemaniń maydanında 1 noqatınan 2 noqatına orın almasırdıń bolsın. q_0 zaryadına tásir

etetuğın $\mathbf{f}$ kúshi sol $q_1, q_2, \dots, q_n$ noqatlıq zaryadların hár biri tárepinen tásir etetuğın $\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \dots, \mathbf{f}_n$ kúshlerini qosındısı tárepinen islengen jumısqa teń. Sol teń tásir etetuğın kúштиń islengen jumısı $q_1, q_2, \dots, q_n$ noqatlıq zaryadların hár qaysısınıń payda etken maydanındaǵı islengen jumıslardıń algebralıq qosındısı bolǵan $A_1 + A_2 + \dots + A_n$ shamasına teń. Bul ańlatpada $A_1, A_2, \dots, A_n$ ler arqalı $f_1, f_2, \dots, f_n$ kúshlerini hár biri tárepinen islengen jumıslar belgilengen. (6)-teńlik boyınsha, f_1 kúshiniń jumısı bolǵan A_1 di $A_1 = q_0(V_1^{(1)} - V_2^{(1)})$ túrinde kórsetiwge boladı. Bul teńlikte $V_1^{(1)}$ hám $V_2^{(1)}$ arqalı q_1 zaryadı tárepinen 1 hám 2 noqatlarında payda etilgen potenciallar belgilengen. $V_1^{(2)}$ hám $V_2^{(2)}$ ler arqalı q_2 zaryadı 1 hám 2 noqatlarında payda etken potenciallardı belgilep $A_2 = q_0(V_1^{(2)} - V_2^{(2)})$ hám t. b. alamız. Toliq jumıs A mınaǵan teń:

$$A = q_0(V_1^{(1)} - V_2^{(1)}) + q_0(V_1^{(2)} - V_2^{(2)}) + \dots + q_0(V_1^{(n)} - V_2^{(n)}).$$

Bul ańlatpanı bilayınsha kóshirip jazıwǵa boladı:

$$A = q_0 \left[(V_1^{(1)} + V_1^{(2)} + \dots + V_1^{(n)}) - (V_2^{(1)} + V_2^{(2)} + \dots + V_2^{(n)}) \right].$$

Berilgen noqattaǵı barlıq potenciallardıń qosındısı V arqalı belgileybiz. Bunday jaǵdayda:

$$\left. \begin{aligned} V_1^{(1)} + V_1^{(2)} + \dots + V_1^{(n)} &= V_1, \\ V_2^{(1)} + V_2^{(2)} + \dots + V_2^{(n)} &= V_2, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

hám jumıs ushın

$$A = q_0(V_1 - V_2) \quad (8)$$

túrindegi formula alınadı. YAǵnıy A jumısı san mánisi boyınsha q_0 shamasınıń 1 hám 2 noqatlarındaǵı V funkciyasınıń mánisleriniń ayırmasınıń kóbeymesine teń (bul noqatlar joldıń bası menen aqırına sáykes keledi). Demek, V funkciyası barlıq $q_1, q_2, \dots, q_n$ zaryadları tárepinen berilgen noqatta payda etilgen potencial eken. (7)-teńlik boyınsha *noqatlıq zaryadlar sistemasınıń payda etken V potencialı ayırım zaryadlardıń payda etken $V^{(1)}, V^{(2)}, \dots, V^{(n)}$ potenciallarınıń algebralıq qosındısına teń boladı eken.*

Qálegen zaryadlangan sistemanı sheksiz kishi bolǵan zaryadlardıń sheksiz úlken sanına bóliwge boladı. Bunday sheksiz kishi bolǵan zaryadtı usı sistemanıń sırtında turǵan noqatlar ushın noqatlıq zaryad dep esaplawǵa boladı. Solay etip, joqarıda ayılǵanlarǵa sáykes, qálegen zaryadlangan sistema tárepinen onnan sırtta payda etilgen potencial haqqında gáp etiwge boladı. Eger sistema shekli betlik yamasa kólemlik tıǵızlıq penen zaryadlangan bolsa, onda potencial túsinigin zaryadlangan sistemanıń óziniń noqatları ushın da ulıwmalastırıwǵa boladı. Potential túsiniginiń bunday ulıwmalastırılıwı elektr maydanınıń ulıwma teoriyasında beriledi.

Potencialdıń jáne bir fizikalıq mánisin qaraw ushın toqtaymız. (8)-formuladan elektrostatalıq maydanniń eki noqatındaǵı potenciallardıń ayırmasınıń maydanniń kúshleri tárepinen zaryadtı bir noqattan ekinshi noqatqa kóshirgende islegen jumıstıń zaryadtıń muǵdarına qatnasına teń:

$$\frac{A}{q_0} = V_1 - V_2. \quad (9)$$

Eger biz $q_0 = +1$ dep boljasaq, onda *eki noqattaǵı potenciallar ayırması bir birlik on zaryadtı usı noqattıń birinshisinen ekinshisine orın almasırdıǵanda maydan kúshleri tárepinen islengen jumısqa teń.*

(9)-qatnastan potenciallardıń ayırmasınıń ólshem birligin anıqlaymız CGSE-sistemada potenciallar ayırmasınıń ólshem birligi sıpatında bir birlik zaryadtı bir noqattan ekinshi noqatqa kóshirgende bir erg jumıs islenetuğın birlik qabıl etilgen. Bul birlik potenciallar ayırmasınıń elektrostatalıq birligi dep ataladı Xalıq aralıq birlikler sistemasında potenciallar ayırmasınıń birligi sıpatında bir kulon zaryadtı bir noqattan ekinshi noqatqa kóshirgende bir djoul muǵdarındaǵı jumıs islenetuğın birlik qabıl etilgen. Potenciallar ayırmasınıń bul birligin volt dep ataydı. Juwıq túrde $1 \text{ k} = 3 \cdot 10^9 \text{ CGSE}$ bolǵanlıqtan, dáliliktıń tap sonday dárejesinde

$$1 \text{ volt} = \frac{1}{300} \text{ potenciallar ayırmasınır elektrostatikalıq birligi}$$

ekenligin tabamız.

CGSE-sistemasındağı potenciallar ayırmasınır ólshem birligi (9)-qatnastan alınadı:

$$[V_1 - V_2] = \frac{[A]}{[q]} = \frac{ML^2T^{-2}}{M^{1/2}L^{3/2}T^{-1}} = M^{1/2}L^{1/2}T^{-1}.$$

(9)-qatnastırn zaryadlar orın almasırdındağı islenetuğın jumıstı tek potenciallar ayırması menen ǵana baylanıstıradı. (5)-formulaǵa sáykes, bızın noqatlıq zaryadtırn potencialı ushın bir birinen additivlik C turaqlısına ayrılatuğın sheksiz kóp sanlı funkciyalardı alıwımızdıń mǘmkin ekenligi usı jaǵdayǵa sáykes túsindiriledi. C shaması hár qıylı etip alǵan menen potenciallar ayırmasınırn mánisi ózgermeydi.

Solay etip C turaqlısın iqtıyarlı túrde saylap alıw mǘmkin eken. Eger $C = 0$ dep boljasaq eń ápiwayı bolǵan jaǵdayǵa kelemiz hám bir birinen r qashıqlıǵında turǵan q zaryadı ushın potencial

$$V = \frac{q}{r} \quad (5a)$$

shamasına teń boladı.

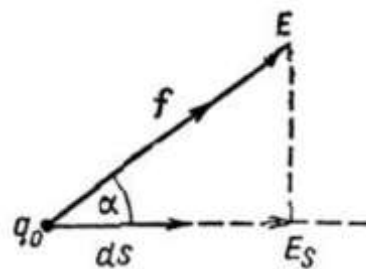
Anıqlaması boyınsha potencial skalyar shama bolıp tabıladı. Additiv turaqlı ushın $C = 0$ mánisin qabıl etsek, onda noqatlıq zaryadtırn potencialı mınaday fizikalıq mániske iye boladı: *berilgen noqattırn potencialı san mánisi boyınsha bir birlik óń zaryadtı maydannırn usı noqatınan sheksizlikke orın almasırdında maydannırn islegen jumısına teń*. Haqıykatında da bir birlik zaryadtı maydannırn berilgen noqatınan usı noqattan sheksiz qashıqlatılǵan noqatqa kóshirgende islengen jumıs mınaǵan teń:

$$A_0 = \frac{A}{q_0} = \frac{q}{r} - \frac{q}{\infty} = \frac{q}{r}.$$

Biz zaryadlardırn quramalı sisteması menen is alıp barsaq, onda potencialdıń ańlatpasına kiretuğın iqtıyarlı turaqlınıń mánisin sistemadan sheksiz alıslatılǵan noqatlardıń potencialların nolge teń bolatuǵına sáykes etip alamız⁴. Bunday jaǵdayda maydannırn berilgen noqatınırn potencialı bir birlik zaryadtı berilgen noqattan sheksizlikke kóshirgende maydan tárepinen islengen jumısqa teń. Bizdi tek potenciallar ayırması ǵana qızıqtıratuğın kúndelikli turmısta Jerdiń betiniń potencialın nolge teń dep shártli túrde esaplaǵan qolaylı.

35-súwret.

dA elementar jumısın esaplawǵa.



Endi q_0 zaryadın $\mathbf{E}$ kernewligi menen táriyiplenetuğın qálegen elektr maydanındağı kóshiriw menen baylanıslı bolǵan ulıwmalıq jaǵdaydı qaraymız. Sheksiz kishi aralıqqa orın almasırdında

$$dA = f \cos \alpha ds$$

jumısı islenedi. $\mathbf{f} = q_0 \mathbf{E}$ teńliginiń orın alatuǵınlıǵın esapqa alıp, dA elementar jumısı ushın jazılǵan ańlatpanı

$$dA = q_0 E \cos \alpha ds$$

túrinde kóshirip jazamız. Biraq, $\mathbf{E} \cos \alpha$ kóbeymesi kernewlik $\mathbf{E}$ niń joldırn berilgen noqatındağı urınbaǵa túsirilgen proekciyası bolıp tabıladı (35-súwret). Bul proekciyanı E_s arqalı belgilep,

⁴ Zaryadlangan sistema shekli ólshemlerge iye bolǵan jaǵdaylarda iqtıyarlı turaqlını usınday etip saylap alıw mǘmkin.

minanı alamız:

$$dA = q_0 E_s ds.$$

Shekli uchastkada islenetuǵın A jumısın dA ushın jazılǵan ańlatpanı integrallaw jolı menen alamız:

$$A = \int_A^B q_0 E_s ds.$$

Bul ańlatpada integral joldıń baslanǵısh noqatı A dan aqırǵı noqatı B ǵa shekem alınǵan. Joqarıda ayılǵan jaǵdaylarǵa baylanıslı bul jumıstıń mánisi q_0 zaryadı menen A hám B noqatlarındaǵı potenciallyar ayırmasına teń:

$$\int_A^B q_0 E_s ds = q_0 (V_A - V_B).$$

q_0 zaryadın turaqlı shama sıpatında integral belgisiniń aldına shıǵarıp hám sol q_0 shamasına qısqartıp

$$\int_A^B E_s ds = V_A - V_B$$

ańlatpasına iye bolamız. Tuyıq jol ushın $V_A = V_B$ hám, usıǵan sáykes

$$\oint_S E_s ds = 0, \quad (10)$$

teńligin alamız. Bul integral barlıq tuyıq kontur boyınsha alınǵan.

$\oint_S E_s ds$ konturlıq integralı tuyıq konturdıń barlıq Δs elementleri nolge umılǵandaǵı $\sum E_s \Delta s$ summasınıń shegi bolıp tabıladı. Bunday jaǵdayda Δs elementleriniń sanınıń sheksiz úlkeyetuǵınlıǵın názerde tutıw kerek. Bunday integral elektrostatikalıq kernewlik vektorınıń cirkulyaciyası dep ataladı. (10)-formula elektrlik kúshlerdiń tuyıq joldaǵı islegen jumısınıń nolge teń ekenliginiń matematikalıq ańlatpası bolıp tabıladı. Elektrostatikalıq kernewlik vektorınıń cirkulyaciyası nolge teń. Tuyıq jolda islegen jumıs nolge teń bolǵan maydandı potenciallyıq maydan dep ataydı. Sonlıqtan, (10)-ańlatpanıń elektrostatikalıq maydanniń potenciallyıq xarakterge iye ekenligin kórsetedi dep aytıwǵa boladı.

§ 130. Potencialdıń qáddileriniń betleri. Elektrostatikalıq maydanniń potencialı noqattan noqatqa ótkende ózgeretuǵın funkciya bolıp tabıladı. Biraq, qálegen haqıyqıy jaǵdayda potenciallyarı birdey bolǵan noqatlardıń jıynaǵın kórsetiwge boladı.

Turaqlı potencialǵa iye bolǵan noqatlardıń geometriyalıq ornın *potencialdıń qáddiniń beti yamasa ekvipotencial bet dep ataydı.*

Álbette, zaryadtı ekvipotencial bet arqalı kóshirgende islegen jumıs nolge teń.

Mısal sıpatında noqatlıq zaryadtıń potencialınıń qáddilerin qaraymız. Joqarıda kórsetilgendey, noqatlıq zaryadtıń potencialı mınaǵan teń:

$$V = \frac{q}{r}. \quad (1)$$

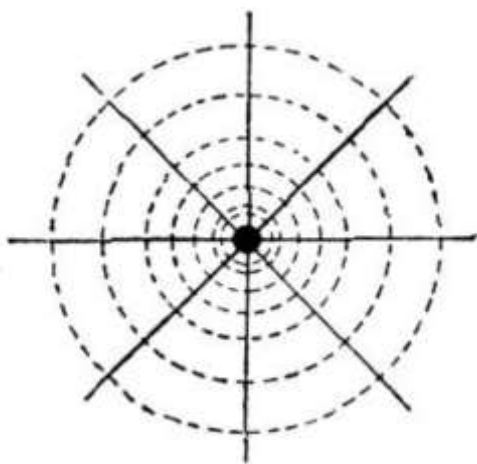
Bul teńlikte r arqalı q zaryadı payda etken potencialı esaplanatuǵın noqatqa shekemgi qashıqlıq belgilengen. Demek, potencialdıń qáddi tegisligi r diń turaqlı mánisine sáykes keletuǵın bet, yaǵnıy zaryad orayında jaylasqan sfera bolıp tabıladı (36-súwret).

Potencialdıń qáddi ushın betlerdi simmetriya kóz qaraslarında turıp anıqlawǵa boladı. Bunday jaǵdayda qáddi beti boyınsha zaryadtı qozǵaǵanda islegen jumıstıń nolge teń bolatuǵınlıǵına tiykarlanıp, potencialdı analitikalıq esaplawdıń zárúrligi bolmaydı. Mısalı, teń ólsheuli zaryadlanǵan sfera payda etken potencialdıń qáddilerin anıqlaw ushın sferanıń payda etken maydaniń sferalıq simmetriyaǵa iye bolatuǵınlıǵın ańǵarıw kerek. Usınıń nátiyjesinde

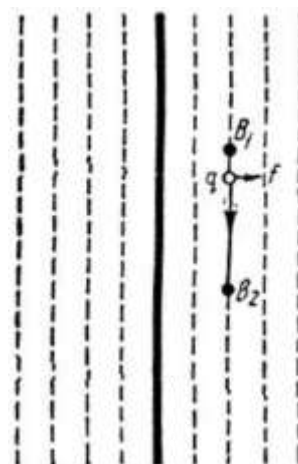
qálegen radiusqa iye bolǵan sferanıń beti boyınsha bir birlik óń zaryadtı kóshirgende islengen jumıstıń nolge teń boladı. Bul jaǵdayda potencialdıń qáddileriniń betleri zaryadlangan sfera menen koncentrlı bolǵan sferalar bolıp tabıladı.

Zaryadlangan shar ushın da tap usınday nátiyje alınadı. Eki jaǵdayda da shardıń sırtındaǵı hám shardıń betindegi potencial (1)-formulanıń járdeminde anıqlanadı.

Eger noqatlıq zaryad yamasa sferanıń zaryadı óń bolsa, onda maydan tárepinen zaryadqa tásir etetuǵın kúshler óń zaryadtı maydannıń dereginen qashıqlatqanda óń jumı isleydi. Demek, bul jaǵdayda qáddilerdiń betleriniń potenciallarınıń san mánisleri radiustıń úlkeyiwi menen kishireyedi. Eger noqatlıq zaryad yamasa sferanıń zaryadı teris bolsa, onda óń zaryadtı kúshtiń dereginen qashıqlatqanda maydannıń kúshleri teris jumıstı atqaradı. Bunday jaǵdayda qáddilerdiń betleriniń potenciallarınıń mánisleri teris boladı hám olardıń radiusları úlkeygen sayın potenciallar úlkeyedi (absolyut mánisi boyınsha kemeyedi).



36-súwret. Noqatlıq zaryadtıń potencialınıń qáddileri (punktir sızıqlar) hám kernewlik sızıqları (tutas sızıqlar).



37-súwret. Zaryadlangan sheksiz tegisliktiń potencialınıń qáddileriniń sızıqları.

Teń ólshewli zaryadlangan sheksiz tegislikti alamız; bunday tegislik payda etken maydan bir tekli, al kernewlik sızıqları tegislikke normal baǵıtlangan. Bunnan bazı bir B_1 noqatınan zaryadlangan tegislikten tap sonday qashıqlıqta jaylasqan qálegen B_2 noqatına kóshirgende islengen jumı nolge teń (37-súwret).

Demek, bunday noqatlardıń potencialları birdey:

$$V_{B_1} = V_{B_2}.$$

Demek, ekvipotencial tegislikler (potencialdıń qáddi tegislikleri) zaryadlangan tegislikke parallel bolǵan tegislikler bolıp tabıladı. Eger tegislik óń zaryad penen zaryadlangan bolsa, onda potencialdıń mánisi zaryadlangan tegislikten qashıqlasqan sayın kemeyedi. Qáddiniń betleriniń zaryadlangan bettiń eki tárepinde simmetriyalı jaylasqanlıǵı óz-ózinen túsiniqli.

Bizler joqarıda qarap ótken dara jaǵdaylardıń barlıǵında da kernewlik vektorları potencialdıń qáddi tegisligine perpendikulyar. Onıń ulıwmalıq jaǵday ushın da durıs bolatuǵınlıǵı kórsetemiz. Onıń ushın potencialdıń qáddi tegisligin alamız hám qáddi tegisliginde zaryadtı joldıń kishi bolǵan Δs uchastkasında orın almasırtıǵanda islengen jumıstı qaraymız. Bunday jaǵdayda, anıqlama boyınsha, $\mathbf{f} = q\mathbf{E}$ elektr kúshiniń usı jolda islegen jumısı

$$\Delta A = \mathbf{f} \Delta s \cos \alpha = qE \Delta s \cos \alpha$$

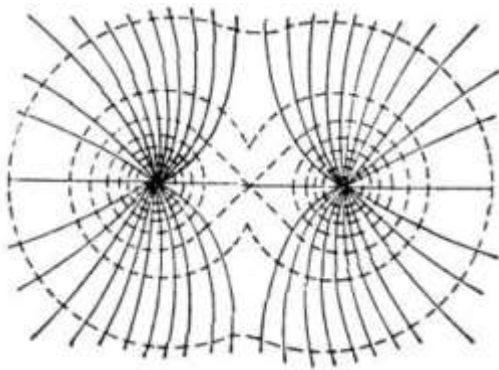
shamasına teń boladı. Bul teńlikte α - kúsh $\mathbf{f}$ penen orın almasırtıw Δs arasındalıq múyesh. Ekinshi tárepten bul jumı nolge teń. Sebebi ekvipotencial bettegi eki noqattıń arasındalıq potenciallar ayırması nolge teń.

Usı jaǵdayǵa sáykes biz

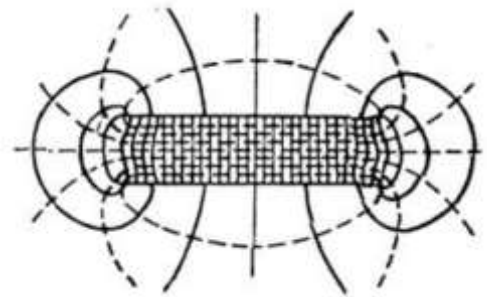
$$qE\Delta s \cos \alpha = 0$$

teńligine iye bolamız. q zaryadtıń ózi de, kernewlik $\mathbf{E}$ de, orın almasıw Δs te nolge teń emes. Sonlıqtan $\mathbf{f}$ kúshiniń baǵıtı menen orın almasıw Δs tiń arasındaqı múyeshtiń kosinusiniń nolge teń bolıwı kerek. Bunnan $\mathbf{f}$ kúshiniń Δs ke perpendikulyar ekenligi kelip shıǵadı. $\mathbf{f} = q\mathbf{E}$ kúshiniń baǵıtı kernewliktiń baǵıtına sáykes keledi ($q > 0$ bolǵan jaǵdayda) yamasa oǵan qarama-qarsı ($q < 0$ bolǵan jaǵdayda). Demek, $\cos \alpha = 0$ teńligi kernewliktiń baǵıtı potencialdıń qáddi tegisligine perpendikulyar boladı eken.

Solay etip, *kernewlik sıızqları potencialdıń qáddi tegislikleriniń semeystvosına (ekvipotencial betlerge) normal (ortogonal) baǵıtlanǵan*. 38-súwrette san mánisi birdey hám birdey belgige iye bolǵan eki noqatlıq zaryad payda etken kernewlik sıızqları hám ekvipotencial betler kórsetilgen. Al 39-súwrette bolsa ekewinde de zaryadlardıń tıǵızlıǵı birdey biraq, hár qıylı belgige iye zaryadlar menen zaryadlanǵan eki disk ushın kernewlik sıızqları menen ekvipotencial betler kórsetilgen.



38-súwret. Belgileri birdey bolǵan eki noqatlıq zaryad ushın potencialdıń qáddileri (punktir sıızqlar) hám kernewlik sıızqları (tutas sıızqlar).



39-súwret. Hár qıylı belgige iye zaryadqa iye disklerdiń potencialdıń qáddileri (punktir sıızqlar) hám kernewlik sıızqları (tutas sıızqlar).

§ 131. Elektrostatikalıq maydanniń kernewligi menen potencialı arasındaqı baylanıs. Endi potencial menen kernewliktiń arasındaqı qatnastı tabamız. Bunday baylanıstıń bar ekenligi kernewlik arqalı ańlatılǵan elektr kúshleriniń jumısınıń maydanniń noqatlarınıń arasındaqı potenciallar ayırması menen de anıqlanatuǵınlıǵınan kelip shıǵadı.

İqtıyarlı elektrostatikalıq maydandı alamız hám onda bir birine jaqın jaylasqan potencialdıń eki qáddi ushın tegisliklerdi júrgizemiz. Meyli, bir tegisliktiń potencialı V , al ekinshisiniń potencialı $V + \Delta V$ bolsın hám $\Delta V > 0$ teńsizligi orınlanadı dep boljayıq (40-súwret). V potencialınıń qáddiniń tegisligindegi bazı bir B noqatta usı tegislikke potencialdıń úlkeyiw baǵıtında $\mathbf{n}$ nomalıń túsiremez. $\mathbf{n}$ nomalı menen $V + \Delta V$ qáddi ushın júrgizilgen tegisliktiń kesilisiw noqatın B' arqalı belgileybiz. B hám B' noqatlarınıń arasındaqı qashıqlıq meyli Δn ge teń bolsın. $\mathbf{E}$ kernewligi potencialdıń qáddi tegisligine perpendikulyar, yaǵnıy $\mathbf{n}$ normalı menen baǵıtlas. B hám B' noqatlarınıń arasındaqı qashıqlıqtıń júdá kishi ekenligin názerde tutıp, olardıń arasındaqı maydanniń kernewligi E ni juwıq túrde turaqlı dep qarawǵa boladı. Bunday jaǵdayda bazı bir q zaryadın B noqatınan B' noqatına kóshirgende islegen jumıs mınanǵan teń boladı:

$$A = qE\Delta n.$$

Ekinshi tárepten usı A jumısı B hám B' noqatlarınıń potencialları arqalı da ańlatıladı:

$$A = q[V - (V + \Delta V)].$$

A jumısı ushın jazılǵan eki ańlatpanı salıstırıp

$$E \cdot \Delta n = -\Delta V$$

ekenligin tabamız. Bul ańlatpa E ushın mınaday ańlatpanı beredi:

$$E = -\frac{\Delta V}{\Delta n}. \quad (1)$$

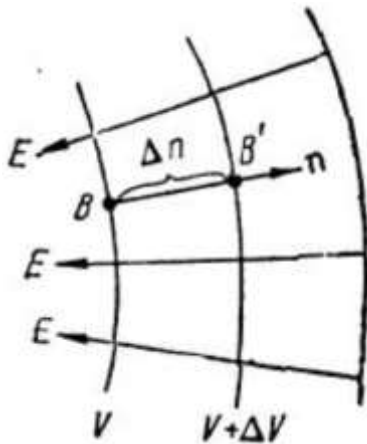
Minus belgisi E kernewliginiñ n normalına qarama-qarsı baǵıtlanǵanlıǵın bildiredi. Haqıyqatında da, biz n normalın potencialdıñ úlkeyiw baǵıtına qaray baǵıtladıq. Al, anıqlaması boyınsha E kernewligi oñ zaryadqa tásir etetuǵın kúshtiñ baǵıtına parallel, yaǵnıy potencialdıñ kemeyiw baǵıtına qaray baǵıtlanǵan. Eger (1)-formulada $\Delta n = 1$ dep boljasaq, onda mınaǵan iye bolamız: *san mánisi boyınsha maydanniñ kernewligi potencialdıñ qáddi tegisligine perpendikulyar baǵıttaǵı potencialdıñ bir birlik uzınlıqtaǵı ózgerisine teń hám potencialdıñ kemeyiw baǵıtına qaray baǵıtlanǵan.*

Potencialdıñ qáddi tegisligine perpendikulyar baǵıtta qozǵalǵandaǵı potencialdıñ ózgeriw tezligine teń bolǵan $\Delta V / \Delta n$ shaması *potencialdıñ gradienti* dep ataladı. Gradient túsiniǵin paydalanıp, (1)-ańlatpanı bilayınsha túsindiriwge boladı: *maydanniñ kernewliginiñ san mánisi potencialdıñ gradientine teń.*

Tómendegidey misaldı qaraymız:

Turaqlı potencialǵa iye bolǵan bir birine parallel eki plastinka arasındaqı elektrostatalıq maydanniñ kernewligin anıqlaymız.

Bir birine parallel, potencialları V_1 hám V_2 bolǵan eki sheksiz tegislikti alamız. Tegislikler arasındaqı qashılıq d ǵa teń (41-súwret). Simmetriya kóz-qarasları boyınsha potencialdıñ qáddileriniñ tegislikleri berilgen tegislikke parallel bolǵan tegislikler bolıp tabıladı.



40-súwret. Potencialdıñ bir birine jaqın eki qáddi ushın n normalı.



41-súwret. Zaryadlanǵan eki tegislik.

Zaryadlanǵan tegisliklerdiñ arasındaqı elektrostatalıq maydanniñ kernewligi barlıq noqatlarda birdey hám tegisliklerge perpendikulyar baǵıtlanǵan. Kernewliktiñ san mánisin potencialdıñ uzınlıqtıñ ekvipotencial betke perpendikulyar baǵıttaǵı bir birliğindegi ózgerisin tabıw jolı menen tabamız:

$$E = \frac{V_1 - V_2}{d}. \quad (2)$$

Kernewlik potencialdıñ kemeyiw baǵıtı menen baǵıtlas. Solay etip, belgili potencialǵa iye bolǵan eki tegisliktiñ arasındaqı maydanniñ kernewligi olardıñ arasındaqı potenciallardıñ ayırmasına tuwrı proporcional hám olardıñ arasındaqı qashılıqqa keri proporcional.

Bir tekli bolmaǵan maydan ushın biz maydanniñ berilgen noqatındaǵı kernewlik E niñ algebralıq mánisi ushın Δn shaması sheksiz kishireygendegi $-\Delta V / \Delta n$ qatnası umtılatuǵın shekti alamız:

$$E = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta V}{\Delta n} \right)$$

yamasa differenciallıq esaptıñ belgilerin paydalansaq

$$E = -\frac{dV}{dn} \quad (2a)$$

ańlatpasın alamız. Vektorlıq esaptaǵı gradient túsinigin paydalanamız. Meyli, C skalyarı x, y, z koordinatalarınń funkciyası sıpatında berilgen bolsın. $grad C$ haqqında gáp etkende tuwrı múyeshli koordinatalar sistemasındaǵı qurawshıları bolǵan A_x, A_y, A_z shamaları

$$A_x = \frac{\partial C}{\partial x}, A_y = \frac{\partial C}{\partial y}, A_z = \frac{\partial C}{\partial z}. \quad (3)$$

qatnaslarınń járdeminde anıqlanatuǵın vektordı túsinemiz. Bul vektor hár bir berilgen noqatta C skalyarınıń qáddiniń tegisligine normal baǵıtta usı C skalyarınıń ósiw baǵıtı menen baǵıtlas bolıp shıǵadı. Onıń uzınlıǵı dC/dn shamasına teń. Gradient haqqındaǵı túsiniktiń járdeminde (2a) teńlikti

$$E_x = -\frac{\partial V}{\partial x}, E_y = -\frac{\partial V}{\partial y}, E_z = -\frac{\partial V}{\partial z} \quad (4)$$

túrinde yamasa

$$\mathbf{E} = -grad V \quad (4a)$$

túrinde jazıwǵa boladı. Demek, $\mathbf{E}$ kernewlik vektorı teris belgi menen alınǵan V potencialdıń gradientine teń eken.

Mısal 1. Dipoldiń menshikli ólsheplerine salıstırǵanda úlken bolǵan r qashıqlıǵındaǵı maydanınıń kernewligin anıqlaymız.

Bul másele ni biz 124-paragrafta tikkeley sheshtik. Maydanniń kernewligi menen potencialınıń arasındaǵı (2a) qatnastı paydalanıp biz másele ni onnan da ápiwayı qılıp sheshemiz. A noqatındaǵı potencial (12-súwret) $+q$ hám $-q$ zaryadları payda etken potenciallardıń qosındısına teń:

$$V = \frac{q}{r_+} - \frac{q}{r_-} = q \frac{r_- - r_+}{r_+ r_-} = q \frac{l}{r_+ r_-}.$$

l ge salıstırǵanda kóp úlken bolǵan r_+ hám r_- qashıqlıqları ushın juwıq túrde $r_+ \cdot r_- = r^2$. Bunnan

$$V = \frac{ql}{r^2} = \frac{p}{r^2}$$

teńligine iye bolamız (p arqalı dipoldiń momenti belgilengen).

A noqatındaǵı ekvipotencial tegislikke túsilgen normal $\mathbf{n}$ niń baǵıtı r diń baǵıtına sáykes keledi, Demek (2a) boyınsha:

$$E = -\frac{dV}{dr} = \frac{2p}{r^3}$$

ańlatpasına iye bolamız hám bul ańlatpa 124-paragraftaǵı (5)-formulaǵa sáykes keledi.

§ 132. Kólemlik zaryadlardıń elektrostatikalıq maydanınıń kernewligi, potencialı hám tıǵızlıǵı arasındaǵı baylanıs. Elektrostatikalıq maydanniń kernewligi menen zaryadlardıń tarqalıwınıń arasında maydanniń hár bir noqatında durıs bolǵan differenciallıq qatnas bar. Bul qatnastı Ostrogradiskiy-Gauss teoremasın tereń tallaw jolı menen tabıwǵa boladı.

Biz qarap atırǵan oblastta zaryad ulıwma alǵanda turaqlı bolmaǵan ρ tıǵızlıǵı menen tarqalǵan dep boljayıq. Qabırǵaları dx, dy, dz shamasına teń hám olar koordinatalar kósherlerine parallel bolǵan elementar kubtı ayırıp alamız (42-súwret). Kubtıń kólemi $dx dy dz$ kóbeymesine teń. Kubtıń kishi bolǵanına baylanıslı onıń ishindegi barlıq noqatlarda zaryadtıń tıǵızlıǵın turaqlı dep esaplawǵa boladı. Bunday jaǵdayda kubtıń ishindegi q zaryadınıń muǵdarı $\rho dx dy dz$ shamasına teń. Kubtıń orayındaǵı maydanniń kernewligin E arqalı (42-súwrette juldızsha menen belgilengen), al onıń qurawshıların E_x, E_y, E_z arqalı belgileybiz.

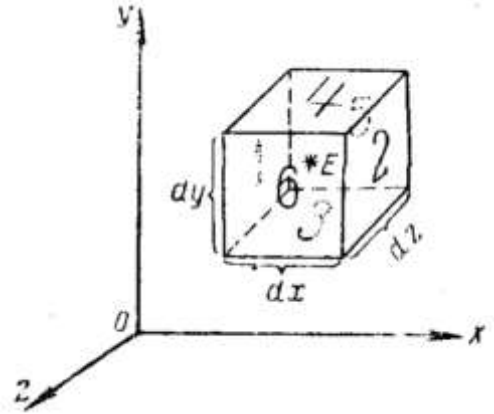
Bunday jaǵdayda 1 qaptalıındaǵı E_x qurawshısınıń mánisi mınaǵan teń:

$$E_{x_1} = E_x - \frac{\partial E_x}{\partial x} \cdot \frac{1}{2} dx.$$

Sebebi, 1 qaptalı kubtıń orayına salıstırǵanda $\frac{1}{2} dx$ shamasına kishi koordinataǵa iye boladı.

42-súwret.

Maydannıń kernewligin kólemlik zaryadlar menen baylanıstıratuǵın ańlatpanı keltirip shıǵarıwǵa.



Tap sol sıyaqlı 2 qaptaldaǵı E_{x_2} qurawshısı ushın mınanı alamız:

$$E_{x_2} = E_x - \frac{\partial E_x}{\partial x} \cdot \frac{1}{2} dx.$$

Usınday jollar menen kubtıń qalǵan qaptallarındaǵı E_y hám E_z qurawshıları ushın mınaday ańlatpalardı alamız:

$$\begin{aligned} E_{y_3} &= E_y - \frac{\partial E_y}{\partial y} \cdot \frac{1}{2} dy, & E_{z_5} &= E_z - \frac{\partial E_z}{\partial z} \cdot \frac{1}{2} dz, \\ E_{y_4} &= E_y + \frac{\partial E_y}{\partial y} \cdot \frac{1}{2} dy, & E_{z_6} &= E_z + \frac{\partial E_z}{\partial z} \cdot \frac{1}{2} dz. \end{aligned}$$

Biziń kubımız ushın Ostrogradskiy-Gauss teoremasın qollanamız. Onıń ushın kubtıń qaptal betindegi kernewliliktiń aǵısın esaplaymız. dS beti arqalı ótip atırǵan kernewlik aǵısı bolǵan dN shamasınıń $\mathbf{E}$ kernewliginiń dS betine normal qurawshısı menen usı bettiń maydanına kóbeymesine teń ekenligin eske túsiremiz. 1 qaptalına túsirilgen normal OX kósheriniń baǵıtına qarama-qarsı baǵıtlanǵan. Sonlıqtan $\mathbf{E}$ kernewliginiń usı 1 qaptalına túsirilgen normal qurawshısı $-E_{x_1}$ ge teń. 1 qaptalıń maydanı $dydz$ shamasına teń. Bunnan 1 qaptalı arqalı ótetuǵın kernewlik aǵısı

$$dN_1 = -E_{x_1} dy dz = -E_x dy dz + \frac{\partial E_x}{\partial x} \cdot \frac{1}{2} dx dy dz$$

shamasına teń.

2 qaptalına túsirilgen normal OX kósheriniń oń baǵıtı menen baǵıtlas hám, sonlıqtan, sol qaptal arqalı ótip atırǵan kernewlik aǵısı

$$dN_2 = +E_{x_2} dy dz = E_x dy dz + \frac{\partial E_x}{\partial x} \cdot \frac{1}{2} dx dy dz$$

ańlatpasınıń járdeminde anıqlanadı. 1 hám 2 qaptalları arqalı ótetuǵın aǵıslardıń qosındısı

$$dN_1 + dN_2 = \frac{\partial E_x}{\partial x} dx dy dz$$

shamasına teń boladı. Tap sol sıyaqlı, 3 hám 4 qaptalları arqalı ótetuǵın aǵıslardıń qosındısı

$$dN_3 + dN_4 = \frac{\partial E_y}{\partial y} dx dy dz$$

hám 5 hám 6 qaptalları arqalı ótetuǵın aǵıslardıń qosındısı

$$dN_5 + dN_6 = \frac{\partial E_z}{\partial z} dx dy dz$$

shamalarına teń boladı. Solay etip, kubtıń barlıq altı qaptalı arqalı aǵıp ótetuǵın aǵıs mına shamaǵa teń boladı:

$$dN = dN_1 + dN_2 + dN_3 + dN_4 + dN_5 + dN_6 = \left(\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} \right) dx dy dz. \quad (1)$$

Ostrogradskiy-Gauss teoreması boyınsha $dN = 4\pi q$. Bul teńlikte q arqalı kubtıń ishindegi zaryadtıń muǵdarı belgilengen. Biraq onıń shaması $\rho dx dy dz$ ke teń. Bunnan dN ushın onıń (1)-ańlatpasın paydalanıp,

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = 4\pi\rho \quad (2)$$

formulasına iye bolamız.

(2)-formula biz izlep atırǵan kólemlik zaryadlardıń tıǵızlıǵı ρ menen kernewlik vektory $\mathbf{E}$ niń tuwındılarınıń arasındaǵı baylanısı beredi. Vektorlıq analizden vektordıń qurawshılarınıń sáykes koordinatalar boyınsha alınǵan tuwındılarınıń qosındısınıń vektordıń divergenciya dep atalatuǵınlıǵı hám

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z}$$

arqalı belgilenetuǵınlıǵı málim. $\operatorname{div} \mathbf{E}$ belgilewin paydalanıp, (2)-formulanı

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = 4\pi\rho$$

túrinde kóshirip jazamız. $\mathbf{E}$ kernewliginiń qurawshıları menen potencialdıń koordinatalar boyınsha tuwındıların baylanıstıratuǵın 131-paragraftaǵı (4)-formulanı paydalanıp

$$E_x = -\frac{\partial V}{\partial x}, \quad E_y = -\frac{\partial V}{\partial y}, \quad E_z = -\frac{\partial V}{\partial z}$$

teńliklerine iye bolamız. Bul ańlatpalardan koordinatalar boyınsha ekinshi ret tuwındı alıp

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} = -\frac{\partial^2 V}{\partial x^2}, \quad \frac{\partial E_y}{\partial y} = -\frac{\partial^2 V}{\partial y^2}, \quad \frac{\partial E_z}{\partial z} = -\frac{\partial^2 V}{\partial z^2}$$

teńlikleriniń orınlı ekenligine kóz jetkermiz. Bunnan mınaday teńlik alınadı:

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = -\left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2}\right).$$

$\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z}$ summasınıń mánisin (2)-ańlatpaǵa qoyıp

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = -4\pi\rho \quad (3)$$

formulasına iye bolamız.

Bul formula kólemlik zaryadlardıń tıǵızlıǵı ρ menen potencialdıń koordinatalar boyınsha alınǵan ekinshi tártipli tuwındılar menen baylanısın beredi. Bazı bir $F(x, y, z)$ funkciyasınıń x, y, z ózgeriwshileri boyınsha alınǵan ekinshi tártipli tuwındılarınıń qosındısın $\Delta F(x, y, z)$ arqalı belgilew qabıl etilgen. Bul belgilewdegi Δ belgisin Laplas operatori dep ataydı. Onıń belgisin (3)-formulaǵa qoyıp

$$\Delta V = -4\pi\rho \quad (3a)$$

teńlemesin alamız. Bul teńleme elektrostatikalıq potencial ushın tiykarǵı differenciallıq teńleme bolıp tabıladı.

§ 133. Elektrostatikalıq maydandaǵı ótkizgishler. 122-paragrafta kórsetilip ótilgenindey, ótkizgish óziniń ishinde erkin elektronları bar dene bolıp tabıladı. Olardıń zaryadı ótkizgishtiń kristallıq pánjeresi menen baylanıslı bolǵan oń zaryadlar menen kompensaciyalanǵan. Ótkizgishtegi erkin elektronlar belgili baǵıtqa iye bolǵan elektrlik kúshlerdiń tásirinde usı kúshhtiń baǵıtındaǵı qurawshıǵa iye tezlikke iye bola aladı. Nátiyjede zaryadlardıń orın almasırwı - elektr toǵı payda boladı. Eger biz elektrostatikalıq máselelerdi qaraw menen sheklensek, onda zaryadlardıń teń salmaqlıq shártin ayqınlastırıwımız kerek. Ótkizgishtiń ishindegi zaryadlardıń zárúrli bolǵan teń salmaqlıq shárti elektrostatikalıq maydanniń kernewliginiń nolge teń bolıwı bolıp tabıladı. Eger maydanniń kernewligi nolge teń bolmaǵanda, onda bunday jaǵday elektronlardıń orın almasırwına alıp keletuǵın elektrlik kúshlerdi payda etken bolar edi. Solay etip, máseleniń elektrostatikalıq xarakteriniń shárti

$$E = 0 \quad (1)$$

túrine iye boladı hám bul shárttiń ótkizgishtiń ishindegi barlıq noqatlarda orınlanıwı kerek.

(1)-shárt zaryadlangan ótkizgishtegi kompensaciyanbağan zaryadlardıń tek ótkizgishtiń betinde jaylasatuǵınlıǵına alıp keledi. Bul juwmaqtıń durılıǵın dálillew ushın ótkizgishtiń ishindegi bazı bir kólemdi sheklep turǵan ıqtıyarlı túrde alınǵan betke Ostrogradskiy-Gauss teoremasın qollanamız. (1)-teńlikke sáykes, bul bettiń barlıq noqatlarında elektrostatikalıq maydanniń kernewligi nolge teń. Usınıń saldarınan biz qarap atırǵan bettiń ishindegi ulıwmalıq zaryad ta nolge teń. Bet ıqtıyarlı túrde alınǵanlıqtan, nátiyje ótkizgishtiń ishindegi qálegen uchastka ushın durıs boladı. Solay etip, elektrostatikalıq maydańǵa jaylastırılǵan qálegen ótkizgishtiń ishindegi qálegen uchastkadaǵı zaryad nolge teń. Zaryadlangan ótkizgishtegi zaryadlar tek ótkizgishtiń betinde ǵana jaylasadı.

Ótkizgishtiń ishki bólimlerindeki zaryadlardıń bolmaytuǵınlıǵı Ostrogradskiy-Gauss teoremasınıń nátiyjesi bolıp tabıladı. Bul teorema bolsa, óz gezeginde, Kulon nızamı boyınsha noqatlıq zaryadlardıń arasındǵı óz-ara tásirlesiw kúshiniń zaryadlardıń arasındǵı qashıqlıqtıń kvadratına kerı proporcional ekenliginen kelip shıǵadı. Eger

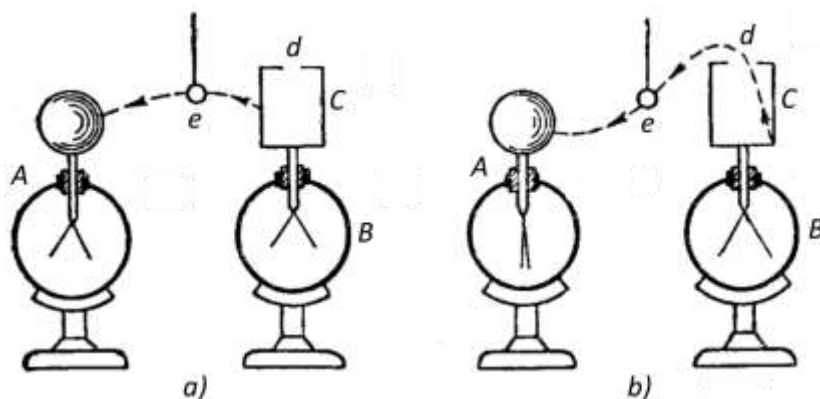
$$f = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

nızamındaǵı r diń dárejesi 2 ge emes, al basqa n ge teń bolǵanda, ótkizgishtiń ishki bólimlerinde zaryadlar tarqalǵan bolar edi. Solay etip, ótkizgishtiń ishki bólimlerinde zaryadlardıń bolmawı Kulon nızamınıń durılıǵınıń janapay tastıyıqlanıwı bolıp tabıladı. Aylanıwshı táreziniń járdeminde Kulon nızamın tikkeley ólshew (123-paragraf) úlken dálilgi menen ayrılıp turǵan joq. Ólshewlerdi júdá puqtalıq penen ótkeriw ańsat emes. Sebebi zaryadlardıń noqatlıq bolıwına sáykes keletuǵın sharayatlardı payda etiw qıyın máselelerdiń biri bolıp tabıladı. Al ótkizgishtiń ishki bólimlerindeki zaryadlardıń bolmaytuǵınlıǵın ádewir dál túrde anıqlawǵa boladı. Usınday tekseriw jumısları Kevendish tárepinen 1773-jılı (Kulon nızamı 12 jıldan keyin ashıldı) ótkerildi hám bul jumıslarda elektr kúshleriniń qashıqlıqtıń kvadratına kerı proporcional ekenligi tabıldı. Biraq, Kevendishtiń jumısları 1879-jılǵa shekem belgisiz bolıp keldi. Usı jılı Maksvell olardı baspadan shıǵardı.

Maksvell Kevendishtiń tájiriybesin bir qansha ózgeritilgen túrde hám joqarı dálilkte qaytaladı.

Ol eki ótkizgish shardı biriniń ishine birin ornalastırdı hám olardıń arasında ótkizgishtiń járdeminde kontakttı payda etti. Sırtqı shardı zaryadlaǵanda ishki shar zaryadlanbağan hám bul jaǵdaydıń orın alatuǵınlıǵın Maksvell joqarı dálilkte kórsete aldı. Bunnan ol Kulon nızamındaǵı dárejenıń 2 den $1/20000$ nan úlken shamaǵa ózgeshe emes ekenligin dálilledi.

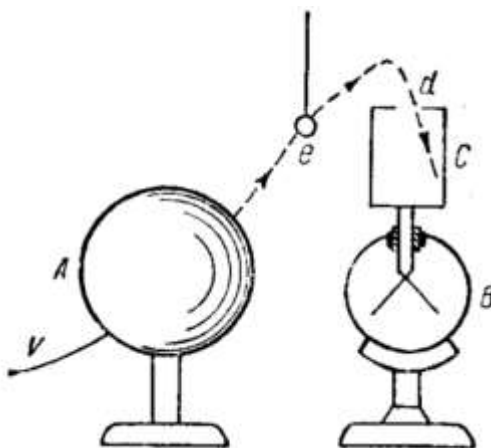
Biz keyinirek, zaryadlardıń tek ótkizgishtiń ishinde ǵana emes, al onıń ishindegi quwıslıqtı sheklep turǵan ishki betinde de bolmaytuǵınlıǵın kóremiz. Elektrostatikalıq qubılıslardıń ulıwmalıq teoriyasında zaryadlangan ótkizgishtiń ishindegi quwıslıqta da maydanniń kernewligi E niń nolge teń bolatuǵınlıǵı kórsetiledi. Bunday jaǵdayda quwıslıqtıń ishinde basqa zaryadlangan deneler joq dep boljanadı.



43-súwret. Faradey cilindri menen ótkerilgen tájiriybe.

Zaryadların ótkizgishtiń sırtqı betinde jaylasatuǵınlıǵın júdá kórgizbeli túrde demonstraciyalawǵa boladı. Eki A hám B elektroskopların alamız, olardıń birine derlik tuyıq hám joqarǵı tiykarında úlken bolmaǵan tesikke iye quwıs C cilindrde bekitemiz (43-súwret). Bunday cilindrde Faradey cilindri dep ataydı. B elektroskopına belgili zaryad beremiz. Elektroskoptıń zaryadlanganlıǵı japıraqlardıń ayrıluwı boyınsha biliwge boladı. Izolyaciyalawshı materialdan soǵılǵan sabaqqa bekitilgen kishi e sharigin alamız. e sharigin Faradey cilindrinıń sırtqı bólimine tiygizemiz hám bunnan keyin onı 43-a súwrette punktir sızıq penen jol menen alıp kelip A elektroskopına tiygizemiz. Usınday jol menen biz A elektroskopına bazı bir zaryadtı beremiz. Usınday usıl menen zaryadtı alıp ótiwdi bir neshe ret qaytalap A elektroskopınıń japıraqlarınıń bir birinen sezilerliktey iyteriskenin kóremiz. Eger biz e sharigin C Faradey cilindiriniń ishki bólimine tiygizsek (43-b súwret), onda biz sharikke hesh qanday zaryad bere almaymız hám soǵan sáykes A elektroskopın zaryadlay almaymız.

Táriyiplengen tájiriybeni keri tártipte qaytalawǵa boladı. Qanday da bir ekranlastırıwshı derek tárepinen turaqlı V potencialda uslap turılatuǵın bazı bir A denesin kóz aldımızǵa keltireyik (44-súwret). A denesine tiygiziw jolı menen e sharigin zaryadlaymız hám onı B elektroskopına alıp kelemiz. Bunnan keyin onı C Faradey cilindrinıń ishki bólimine tiygizemiz. Bunday jaǵdayda sharik Faradey cilindri menen birgelikte payda bolǵan quramalı deneniń ishki bólimin payda etetuǵın bolǵanlıqtan sharikte hesh qanday zaryadtıń qalmawı kerek. Basqa sóz benen aytqanda sharik óziniń zaryadın tolıǵı menen B elektroskopına beriwi kerek. Biz usınday jollar menen zaryadtı alıp beriwdi qansha bolsa da qaytalawımız múmkin hám sharik barlıq waqıtta da óziniń zaryadın elektroskopqa beredi. Sebebi, ótkizgishtiń ishki bólimindegi zaryadtıń bolmawı shárti zaryadtıń muǵdarınan hám onıń potencialınan ǵárezli emes. Solay etip, e sharigin kóp ret alıp keliw jolı menen B elektroskopın A denesiniń V potencialına salıstırǵanda *júdá joqarı potencialǵa* jetkenshe zaryadlawǵa boladı. Principinde zaryadtı alıp beriwdi sheklenbegen ret qaytalaǵanda B elektroskopınıń potencialın sheksizlikke shekem joqarılátıwǵa boladı⁵. Ámelde bolsa, potencialdıń joqarılawı zaryadtıń joǵalıwı menen sheklengen. Joqarıda táriyiplengen Faradey cilindri menen ótkerilgen tájiriybeniń sxeması potenciallar ayırmasınıń shamasın bir neshe million voltke shekem jetkeriwge múmkinshilik beretuǵın házirgi zaman generatorlarında paydalanıladı (III tomǵa qarańız).



44-súwret.
Faradey cilindri menen ótkerilgen tájiriybe.

Ótkizgishtiń ishindegi quwıslıqta maydannıń bolmawı elektrostatalıq qorǵanıwdı dóretiwge

⁵ 137-paragrafta biz zaryadlangan deneniń V potencialınıń ósiwi menen onıń energiyasınıń da ósetuǵınlıǵın kóremiz. Bunnan Faradey cilindri menen ótkerilgen tájiriybeniń energiyasını saqlanıw nızamına qayshı keledi degen pikirdiń payda bolıwı múmkin. Biraq, olay emes: e sharigin Faradeydiń zaryadlangan cilindirine alıp keliw ushın jumıs islew kerek hám cilindrde zaryadı qanshama úlken bolsa, jumсалған jumıstıń shaması da sonshama úlken boladı.

boladı. Berilgen quwıslıqtı barlıq tárepten qorshap turǵan ótkizgish sırtqı zaryadlar tárepinen payda etilgen elektrostatikalıq maydanlardan ekranlaydı. Ámelde tutas ótkizgishti qalıń metall tor menen almasırwǵa boladı. Elektrostatikalıq qorǵanıwdı payda etiw maqsetinde elektroskoptıń japıraqların metall korobkanıń (qutınıń) ishine jaylastıradı. Qutını Jer menen tutastıradı. Bunday jaǵdayda ol Jerdiń potencialın qabıl etedi hám sırtqı maydanlar qutınıń ishindegi maydandı da, potencialdı da ózgerge almaydı. Elektroskoptıń zaryadlanatuǵın japıtraqları qutıdan izolyaciyalanǵan bolıwı kerek. Eger olardı qutı menen ótkizgish arqalı tutastırısqaq, onda bizler elektroskoptıń qutısınıń sırtında elektrlewdiń qanday dereklerin paydalansaq ta, japıraqlar bir birinen iyerilmeydi.

§ 134. Ótkizgishtiń betiniń qasındaǵı maydanniń kernewligi. Ótkizgishtiń ishindegi kernewliktiń nolge teń bolıwı onıń turaqlı potencial oblastı bolıp tabılatuǵınlıǵın ańǵartadı. Haqıyqatında da kernewliktiń san mánisi qáddiniń betine normal baǵıttaǵı bir birlik uzınlıqtaǵı potencialdıń ózgerisine teń. Bunnan ótkizgishtiń barlıq noqatlarındaǵı maydanniń nolge teń ekenliginen ótkizgishtiń barlıq noqatlarındaǵı potencialdıń da ózgerisiniń nolge teń ekenligin alamız; demek, potencialdıń mánisiniń ózi turaqlı; *solay etip, ótkizgishtiń ishindegi hám betindegi barlıq noqatları birdey potencialda jaylasadı.* Bunnan ótkizgishtiń betiniń potencialdıń qáddiniń beti (ekvipotencial bet) bolıp tabılatuǵınlıǵı tikkeley kelip shıǵadı. Hár bir noqatta elektrostatikalıq maydanniń kernewligi potencialdıń qáddiniń betine normal bolǵanlıqtan ótkizgishten sırttaǵı elektrostatikalıq maydanniń kernewligi ótkizgishtiń betine normal baǵıtlanǵan.

Ótkizgishtiń betine tikkeley jaqın jaylasqan orınlardaǵı elektrostatikalıq maydanniń kernewligi menen ótkizgishtiń betindegi zaryadlardıń betlik tıǵızlıǵı arasında belgili baylanıs orın alǵan. Ostrogradskiy-Gauss teoremasın paydalanıp, usı baylanıstı tabamız. *A* ótkizgishtiniń betinde kishi ΔS uchastkasın alamız (45-súwret). Bul uchastkadaǵı zaryadtıń betlik tıǵızlıǵın turaqlı dep esaplawǵa boladı hám ol σ ǵa teń dep boljaymız. Bunday jaǵday usı uchastkadaǵı zaryad q mınaǵan teń:

$$q = \sigma \cdot \Delta S. \quad (1)$$

Oyımızda kishi, tuyıq S cilindrlik betin júrgizeyik. Onıń payda etiwshisi ótkizgishtiń betine perpendikulyar, al onıń ultanları $\Delta S'$ penen $\Delta S''$ ler ΔS ke parallel bolsın. Ostrogradskiy-Gauss teoreması boyınsha, tuyıq S beti arqalı ótetuǵın kernewlik sıziqlarınıń sanı $4\pi q$ ǵa teń. $\Delta S''$ ultanı ótetuǵın ótkizgishtiń ishinde maydanniń kernewligi $E = 0$, al qaptal bet E ge parallel. Sonlıqtan barlıq $4\pi q$ sıziqları $\Delta S'$ ultanı arqalı ótedi. Bul $\Delta S'$ ultanınıń sheklerindegi maydanniń kernewligin E arqalı belgilep

$$E \cdot \Delta S' = 4\pi q$$

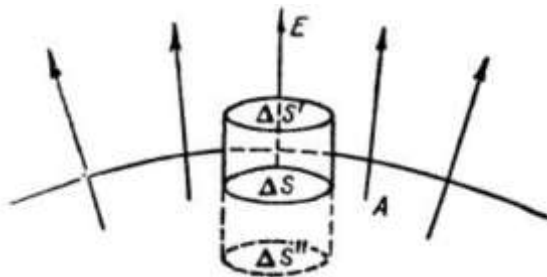
teńligine iye bolamız. Bunnan, (1)-qatnastı paydalanıp hám $\Delta S' = \Delta S$ teńliginiń orınlı ekenligin esapqa alıp

$$E = 4\pi\sigma \quad (2)$$

ańlatpasına iye bolamız. (2)-ańlatpadan ótkizgishtiń betindegi elektrostatikalıq maydanniń kernewliginiń zaryadtıń tıǵızlıǵına tuwrı proporcional ekenligin kóremiz.

45-súwret.

Zaryadlanǵan ótkizgishtiń betiniń qasındaǵı maydanniń kernewligi E ni ańıqlawǵa.



Eger ótkizgishtiń beti dúńkiyip turǵan orınlarǵa iye bolsa, onda ótkizgishtiń qasınan ótetuǵın

potencialdın qáddı tegislikleri sol dúńkiyıp turǵan orınlardıń qasında bir birine jaqınlasadı. Bul oblastlarda maydannıń kernewligi úlken mániske iye boladı, sebebi sol orınlarda potencialdın uzınlıqtıń bir birligine sáykes ózgeriwi úlken mániske jetedi. Demek, dúńkiyıp turǵan orınlardıń qasında elektr maydanınıń kernewligi úlken hám usıǵan sáykes ótkizgishtegi sol orınlardaǵı zaryadlardıń betlik tıǵızlıǵı da úlken. 46-súwrette dúńkiygen orın menen oyıs orınǵa iye bolǵan zaryadlanǵan ótkizetuǵın dene kórsetilgen; qorshaǵan keńislikte maydannıń kernewligi dóńes orınnıń qasında maksimallıq, al oyıs orınnıń qasında minimallıq mániske iye. 46-súwrette punktir sızıqlar menen súwretlengen ekvipotenciallıq sızıqlar maydan kúshli orınlarda jiyilisedi. Usıǵan sáykes, deneniń betindegi dóńes orınlarda zaryadlardıń tıǵızlıǵı eń úlken mániske, al oyıs orınlarda eń kishi mániske iye boladı.

Ótkizgishtiń ishki oblastlarında maydannıń kernewligi nolge teń hám usıǵan sáykes ótkizgishtiń ishki oblastlarındaǵı zaryadlardıń tıǵızlıǵı da nolge teń.

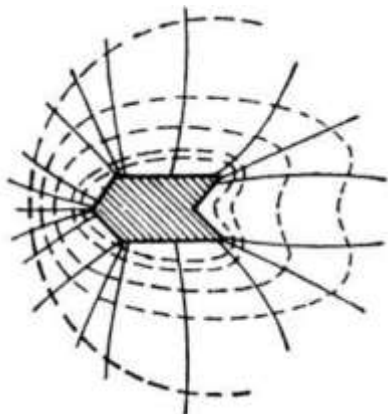
Júdá ushlı dóńeslerdiń qasındaǵı maydan ayrıqsha úlken boladı. Ótkizgishterdi júdá joqarı potencialǵa iye bolǵansha zaryadlaǵanda bul jaǵdaydı esapqa alıwǵa tuwrı keledi: ushlı dóńes orınlar bar bolǵan jaǵdayda onıń átirapında qorshap turǵan dielektriktiń tessiliwi múmkin (dara jaǵdayda hawanıń) hám razryad baslanadı (tajdıń payda bolıwı dep atalatuǵın); sonlıqtan, joqarı potencialǵa shekem zaryadlanatuǵın ásbaplardıń barlıq metall bólimlerine domalaq forma beriledi hám olardıń betlerin tegis etip isleydi.

Zaryadlanǵan ótkizgishtiń betiniń uchastkalarınıń hár biri sol ótkizgishtiń qalǵan bólimi payda etken elektrostatalıq maydanda jaylasadı.

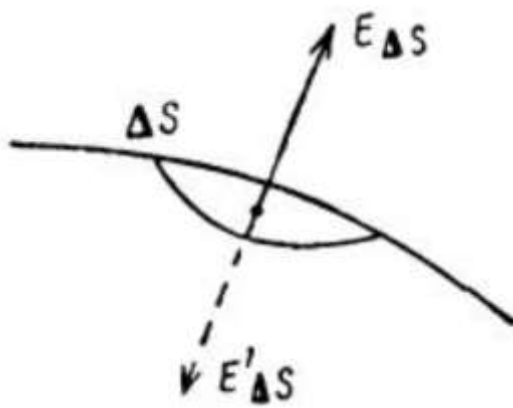
Bunday jaǵdayda zaryadlanǵan ótkizgishtiń hár bir ΔS uchastkasına (47-súwret)

$$\Delta f = \sigma \Delta S \cdot E_1 \quad (3)$$

kúshi tásir etedi. Bul ańlatpada E_1 arqalı ótkizgishtiń qalǵan bólimi tárepinen payda etilgen maydannıń kernewligi belgilengen.



46-súwret. Dóńes hám oyıs orınları bar deneniń ekvipotencial betleriniń (punktir sızıqlar) hám kernewlik sızıqlarınıń (tutas sızıqlar) jaylasıwı.



47-súwret. Zaryadlanǵan ótkizgishtiń betiniń elementi payda etken maydannıń kernewligi.

E_1 maydanın anıqlaw ushın ΔS elementi óziniń betine júdá jaqın jaylasqan noqatlarda payda etken maydandı qaraymız. Bul maydan ΔS elementiniń betine normal baǵtlanǵan hám usı elementtiń eki tárepinde simmetriyalı tarqalǵan.

47-súwrette ΔS elementiniń eki tárepindegi bul maydannıń kernewligi $E_{\Delta S}$ hám $E'_{\Delta S}$ strelkalarınıń járdeminde kórsetilgen.

ΔS elementiniń qasındaǵı deneniń sırtında zaryadlanǵan deneniń barlıq beti tárepinen payda etilgen tolıq E kernewlik E_1 hám $E_{\Delta S}$ kernewlikleriniń qosındısına teń ekenligi kórinip tur:

$$E = E_1 + E_{\Delta S}.$$

E_1 hám $E_{\Delta S}$ kernewlikleri ΔS elementiniń betine perpendikulyar bolǵanlıqtan usı elementtiń betine E_1 vektori da perpendikulyar hám, sonlıqtan, soǵı teńlikti

$$E = E_1 + E_{\Delta S}$$

algebraıq qosındı túrinde kóshirip jazıwǵa boladı. (2)-teńlik boyınsha $E = 4\pi\sigma$. Bunnan

$$E_1 + E_{\Delta S} = 4\pi\sigma \quad (4)$$

teńligine iye bolamız. Tap usınday jollar menen ΔS elementiniń qasındaǵı deneniń ishindegi maydanniń $E_1 + E'_{\Delta S} = E_1 - E_{\Delta S}$ qosındısına teń bolatuǵınlıǵın kóremiz. Al, deneniń ishinde qosındı kernewlik nolge teń bolǵanlıqtan

$$E_1 - E_{\Delta S} = 0 \quad (5)$$

teńliginiń orınlı bolatuǵınlıǵın kóremiz. (4)- hám (5)-teńliklerden

$$E_1 = E_{\Delta S} = 2\pi\sigma$$

teńligin tabamız hám bunnan keyin (3)-teńlik zaryadlangan deneniń betiniń elementine tásir etetuǵın kúshti tabamız:

$$\Delta f = 2\pi\sigma^2 \cdot \Delta S.$$

Eger (2)-teńlikke itibar bersek, onda

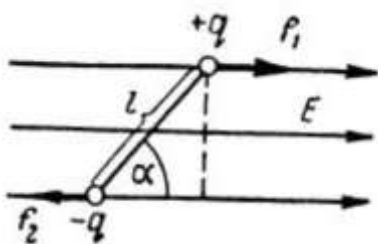
$$\Delta f = \frac{E^2}{8\pi} \Delta S$$

teńliginiń orınlı ekenligine kóz jetkeremiz. Birdey belgige iye zaryadlar iyterisetuǵın bolǵanlıqtan, Δf kúshi zaryadtıń belgisinen gárezsiz ótkizgishtiń sırtına qaray baǵıtlangan.

§ 135. Sırtqı elektr maydanındaǵı dipol. Sırtqı bir tekli E elektr maydanındaǵı dipoldi qaraymız. Meyli, dipol ara qashıqlıǵı ózgermeytuǵın eki $+q$ hám $-q$ zaryadlarınan turatuǵın bolsın. 124-paragrafta ayılǵanıday, usınday dipoldiń elektr momenti $p = ql$ shamasına teń. Meyli, dipoldiń baǵıtı menen kernewlik E niń arasındaǵı múyesh α bolsın (48-súwret). Dipoldiń oń zaryadına maydan menen baǵıtlas $f_1 = qE$ kúshi tásir etedi, al teris belgige iye zaryadqa maydanǵa qarama-qarsı baǵıtlangan $f_2 = -qE$ kúshi tásir etedi. Bul kúshler momenti $M = fl \sin \alpha = qlE \sin \alpha$ shamasına teń bolǵan kúshlerdiń jubın payda etedi. $ql = p$ teńliginiń orınlı ekenligin názerde tutıp, sırtqı bir tekli elektr maydanında dipolge momenti

$$M = pE \sin \alpha \quad (1)$$

shamasına teń bolǵan kúshlerdiń jubı tásir etedi eken. Bul juptıń tásirinde dipol maydanniń kernewliginiń baǵıtında jaylasıwǵa umtıladı.



48-súwret.

Sırtqı bir tekli maydandaǵı dipol.

Dipol momenti bolǵan p shamasın vektorlıq shama dep qarawǵa boladı. Onıń ushın I di teris $-q$ zaryadtan oń $+q$ zaryadqa qaray ótkeremiz.

p vektorın

$$p = ql \quad (2)$$

teńliginiń járdeminde anıqlaymız. Demek, sırtqı bir tekli elektr maydanında dipol óziniń p elektrlik momentin baǵıtı boyınsha E vektorınıń baǵıtı menen parallel etip jaylastırıwǵa tırsadı. Bul jaylasıwǵa (1)-ańlatpadaǵı $\alpha = 0$ teńligi sáykes keledi (bul dipolge tásir etetuǵın kúshlerdiń momentiniń nolge teń bolıwına sáykes keledi). Álbette, tásir etetuǵın kúshlerdiń momenti $\alpha = \pi$ teńligi orınlanganda da nolge teń boladı. Biraq bul soǵı awhal ornıqlı emes: dipoldiń kishi múyeshke burılıwında onı onnan da úlkenirek múyeshke buratuǵın moment payda boladı.

Eger dáslep dipol kernewlik sızıqları menen nolge teń bolmaǵan α múyeshin jasaǵan bolsa,

onda ol teń salmaqlıq halına jaqınlaǵanda bazı bir aylanıw tezligine iye boladı hám inerciya boyınsha teń salmaqlıq ornı arqalı ótip ketedi. Kúsh momenti M niń tásirinde dipol óziniń teń salmaqlıq halınıń átirapında terbele baslaydı. Eger dipolge M kúsh momentinen basqa súykelis kúshi de tásir etetuǵın bolsa, onda terbelis sóniwshi terbeliske aylanadı hám eń aqırında dipol kernewlik sızığınıń boyında jaylasadı. Súykelis kúshleri júdá úlken bolǵan jaǵdayda dipoldiń qozǵalıǵı dáwirlik emes boladı hám bunday jaǵdayda dipol óziniń tezligin turaqlı túrde nolge shekem kemeytip, teń salmaqlıq halına asimptotalıq jaqınlaydı.

I tomnıń 35-paragrafında biz kúshlerdiń momenti M di baǵıtı kúshlerdiń baǵıtı menen oń burǵınıń baǵıtı arasındaqı qaǵıyda boyınsha anıqlanatuǵın vektor sıpatında qarawǵa bolatuǵınlıǵın kórdik. 48-súwrette M vektorı súwrettiń tegisligine perpendikulyar baǵıtlanǵan. SHaması boyınsha da, baǵıtı boyınsha da ol $\mathbf{p}$ hám $\mathbf{E}$ vektorlarınıń kóbeymesi túrinde anıqlanadı:

$$\mathbf{M} = \mathbf{p} \times \mathbf{E}. \quad (1a)$$

Endi sırtqı bir tekli bolmaǵan elektr maydanındaǵı dipoldi qaraymız. Bunday jaǵdayda kernewlik sızıqları qosılatuǵın yamasa tarqalatuǵın sızıqlar bolıp tabıladı. biraq, dipoldiń ólshemleriniń sheklerinde bir tekli bolmaw sızilerliktey emes hám $+q$ hám $-q$ zaryadlarına tásir etetuǵın f_1 jáne f_2 kúshleri qarama-qarsı táreplerge qaray tásir etedi dep boljaymız (Z kósheriniń baǵıtında hám oǵan qarama-qarsı). Sonıń menen birge maydannıń kernewligi Z kósheriniń baǵıtında tezirek ózgeredi dep esaplaymız. Bul kúshler mınaǵan teń:

$$f_1 = +qE_1, f_2 = -qE_2.$$

Bul ańlatpalarda E_1 hám E_2 ler arqalı $+q$ hám $-q$ zaryadları turǵan orınlardaǵı maydannıń kernewlikleri belgilengen. Bul kúshlerdiń qosındısı mınaǵan teń:

$$f = f_1 + f_2 = q(E_1 - E_2). \quad (3)$$

z koordinatasın 49-súwrette kórsetilgendey, kúshlerge parallel etip jaylastıramız. Bunday jaǵdayda

$$E_1 - E_2 = \left(\frac{\Delta E}{\Delta z} \right) Z$$

teńligine iye bolamız. Bul ańlatpada $\Delta E / \Delta z$ maydannıń kernewliginiń gradienti bolıp tabıladı. $Z = l \cos \alpha$ teńliginiń orınlı ekenligi ańǵarıp, mınaǵan iye bolamız:

$$E_1 - E_2 = \left(\frac{\Delta E}{\Delta z} \right) l \cos \alpha.$$

$E_1 - E_2$ niń bul mánisin (3)-ańlatpaǵa qoyıp,

$$f = ql \left(\frac{\Delta E}{\Delta z} \right) \cos \alpha$$

yamasa

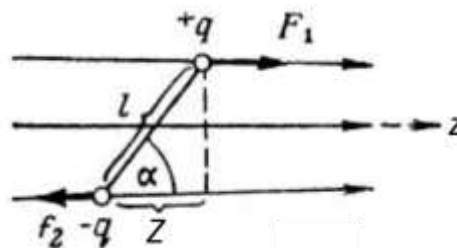
$$f = p \left(\frac{\Delta E}{\Delta z} \right) \cos \alpha \quad (4)$$

teńlikleriniń orınlı ekenligine kóz jetkeremiz.

Solay etip, bir tekli bolmaǵan sırtqı elektr maydanında dipolge kúshlerdiń momentinen basqa *maydannıń gradienti qanshama úlken bolsa, yaǵnıy maydannıń bir tekli emesligi qanshama kúshli bolsa, sonshama úlken kúsh tásir etedi eken.* (4)-teńlik boyınsha, $\alpha < \frac{\pi}{2}$ teńsizligi orınlanǵanda f kúshi maydannıń kernewligi san mánisi boyınsha úlken bolǵan tárepke qaray baǵdarlanǵan. Berilgen p menen $(\Delta E / \Delta z)$ shamalarında f kúshi óziniń maksimalıq mánisine $\alpha = 0$ teńligi orınlanǵanda, yaǵnıy dipol maydannıń kernewlik sızığınıń boyında jaylasqan jaǵdayda erisedi. Eń aqırında mınaday juwmaqqa kelemiz: sırtqı maydanda dipol óziniń oń ushı menen $\mathbf{E}$ kernewlik sızıqlarınıń baǵıtına qaray burılıwǵa umtıladı; sonıń menen birge dipolge onıń momenti p ǵa hám maydannıń kernewliginiń gradienti $(\Delta E / \Delta z)$ shamasına proporcional bolǵan kúsh tásir etedi. Bul kúsh dipoldi maydannıń kernewligi úlken bolǵan tárepke qaray jılistıradı.

49-súwret.

Bir tekli emes elektr maydanındaǵı dipol.



Dipoldi maydannıń kernewligi úlken bolǵan oblastına qaray jılastıratuǵın kúshlerdiń bar ekenligin elektrlengen shıyshe yamasa ebonit tayaqshalardı usı tayaqshalar menen tiyispegen jeńil predmetlerdi tartatuǵınlıǵı boyınsha kóriwge boladı. Elektrostatikalıq maydannıń tásirinde predmette indukciyalangan zaryadlar payda boladı hám predmet dipolge aylanadı. Maydannıń bir tekli bolmaǵanı sebepli bul dipol maydannıń san mánisi boyınsha úlken bolǵan oblastına qaray jıladı, yaǵnıy zaryadınıń belgisinen ǵárezsiz tayaqshaǵa qaray tartıladı.

§ 136. Ótkizgishlerdiń elektr sıymılgı. Endi ótkizgishlerdiń elektr sıymılgı yamasa ápiwayı túrde sıymılgı dep atalatuǵın júdá áhmiyetli bolǵan qásiyetin qarawǵa ótemiz. Tájiriybeler birdey muǵdardaǵı zaryadlar menen zaryadlangan hár qıylı ótkizgishlerdiń hám qıylı potencialǵa iye bolatuǵınlıǵın kórsetedi. Bul jaǵday olardıń sıymılgı dep atalatuǵın fizikalıq qásiyeti boyınsha ayırılauǵınlıǵın kórsetedi.

Ótkizgishtiń sıymılgı qorshap turǵan denelerdiń qalayınsha jaylasqanlıǵınan ǵárezli. Sonlıqtan, biz dáslep qasında hesh qanday basqa deneler bolmaǵan ótkizgishtiń sıymılgı anıqlaymız (bunday jaǵdayda basqa deneler berilgen denedegi zaryadlardıń tarqalıwına tásir ete almaydı hám bunday deneni ońashalangán dene dep ataymız). Ońashalangán ótkizgishtiń potencialı V ondaǵı zaryadtıń shaması Q ǵa tuwrı proporcional. Sebebi zaryadtıń shaması neshe ese úlkeyse maydannıń kernewligi de, demek, zaryadtı ótkizgishten sheksizlikke jılastırǵanda islenetuǵın jumıstıń shaması da sonshama ese úlkeyedi:

$$Q = CV. \quad (1)$$

Proporcionallıq koefficienti C ótkizgishtiń forması menen ólshemlerinen ǵárezli hám onıń sıymılgı dep ataladı. C ushın (1)-teńlikten

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2)$$

qatnasın alamız. Bul qatnas *ońashalangán ótkizgishtiń sıymılgıınıń san mánisi boyınsha zaryadlangán ótkizgishtiń potencialın bir birlikke joqarılatıw ushın kerek bolatuǵın elektr zaryadınıń muǵdarına teń fizikalıq shama bolıp tabılatuǵınlıǵın kórsetedi.* ($V = 1$ teńligi orınlanganda $C = Q$ teńligine iye bolamız). Bunday jaǵdayda ótkizgishten sheksizlikke qashıqlatılǵan noqatlardıń potencialları nolge teń dep esaplanganda potencialdıń ańlatpasındaǵı anıq bolmaǵan turaqlınıń mánisiniń nolge teń bolatuǵınlıǵı esapqa alıńan.

Sıymılgıtıń ólshemi (2)-qatnastan alınadı:

$$[C] = \frac{[Q]}{[V]} = \frac{M^{1/2}L^{3/2}T^{-1}}{M^{1/2}L^{1/2}T^{-1}} = L,$$

yaǵnıy sıymılgıtıń ólshemi uzınlıqtıń ólshemindey eken. Sıymılgıtıń birliǵı sıpatında bir birlik zaryad berilgen jaǵdayda potencialı bir birlikke ózgeretuǵın ońashalangán ótkizgishtiń sıymılgıın qabıl etemiz. CGSE-sistemasında sıymılgıtıń ólshem birliǵı sıpatında CGSE-sistemasındaǵı potencialınıń bir birliǵe ózgeriwi ushın CGSE-sistemasındaǵı zaryadtıń bir birliǵı talap etiletuǵın ótkizgishtiń sıymılgı qabıl etilgen; bul radiusı 1 sm ge teń bolǵan ótkizgish shardıń sıymılgı ekenligin ańsat kóriwge boladı. Haqıyqatında da ótkiziwshi shardıń sıymılgı (130-paragrafqa qarańız)

$$V = \frac{Q}{R}$$

formulasınıń járdeminde anıqlanadı. Bul qatnastaǵı R - shardıń radiusı; bul ańlatpanı (2)-formula menen salıstırıp

$$C = R$$

teńligine iye bolamız, yaǵnıy shardıń sıyımlıǵı onıń radiusına teń eken. Sonlıqtan CGSE-sistemada sıyımlıqtıń birligi sıpatında radiusı 1 sm ge teń bolǵan ońashalanǵan shardıń sıyımlıǵı qabıl etilgen. Usı CGSE-sistemasındaǵı sıyımlıqtıń birligin shártli túrde *santimetr* dep ataydı.

Xalıq aralıq birlikler sistemasında sıyımlıqtıń birligi sıpatında zaryadınıń muǵdarı bir kulonǵa úlkeygende potencialı bir voltke ózgeretuǵın ótkizgishtiń sıyımlıǵı qabıl etilgen. Bunday birlikti *farada* dep ataydı. Sıyımlıqtıń CGSE-sistemasındaǵı birligi menen farada arasındaǵı baylanıs mınaday:

$$\begin{aligned} 1 \text{ farada} &= \frac{1 \text{ kulon}}{1 \text{ volt}} \cong \frac{3 \cdot 10^9 \text{ CGSE} - \text{zaryadtıń birligi}}{\frac{1}{300} \text{ CGSE} - \text{potencialdıń birligi}} \cong \\ &\cong 9 \cdot 10^{11} \text{ CGSE} - \text{sıyımlıqtıń birligi}. \end{aligned}$$

Kórinip turǵanıday, farada sıyımlıqtıń júdá úlken birligi. Haqıyqatında da 1 farada radiusı $9 \cdot 10^{11}$ sm bolǵan, yaǵnıy 9 million kilometr bolǵan (bul shama Jerdiń radiusınan 1400 ese úlken) ońashalanǵan shardıń sıyımlıǵı bolıp tabıladı. Sonlıqtan, sıyımlıqtıń birligi farada menen bir qatar da faradanıń millionnan bir bólegine teń mikrofarada qollanıladı. Bir mikrofarada sıyımlıǵına radiusı 9 km bolǵan ońashalanǵan shar iye boladı (bul da júdá úlken shar).

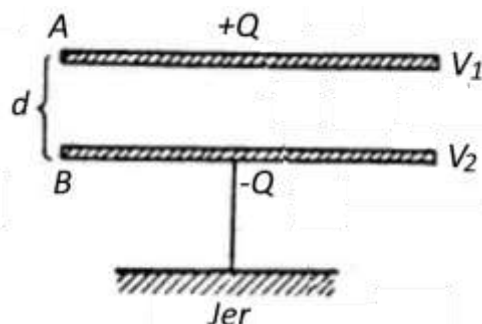
Ótkizgishtiń sıyımlıǵı onı qorshap turǵan denelerden gárezli. Haqıyqatında da, ótkizgishtiń zaryadı haqqında gáp etilgende biz onıń zaryadınıń potencialına qatnasın túsineміz. Al ótkizgishtiń potencialı bolsa tek usı ótkizgishtiń zaryadınan ǵana emes, al onı qorshap turǵan barlıq denelerdiń potencialınan gárezli. Eger, hátte berilgen ótkizgishti qorshap turǵan deneler aldın-ala zaryadlanbaǵan bolsa da, onda biz qarap atırǵan ótkizgishti zaryadlaǵanda olar usı zaryadlanıwdıń tásirinde zaryadlanadı hám, usıǵan sáykes, berilgen ótkizgishtiń potencialın ózgerterdi. Bunday jaǵdayda sıyımlıq ushın dinamikalıq máselelerdi sheshkende de paydaǵa asatuǵın

$$C = \frac{dQ}{dV}$$

anıqlamasın beriw kerek. Demek, sıyımlıq potencialdıń ósimi sheksiz kishi bolǵan jaǵdaydaǵı zaryadtıń ósiminiń potencialdıń ósimine qatnasına teń eken. Bul qatnas ótkizgishtiń zaryadınıń onıń potencialı boyınsha alınǵan tuwındısı bolıp tabıladı. Biraq, sıyımlıǵı qorshaǵan denelerden is júzinde gárezsiz bolǵan ótkizgishterdiń sistemasın júzege keltiriwge boladı; onıń ushın sistema basqa denelerdiń tásirinen izolyaciyalanǵan bolıwı kerek. Kondensatorlar usınday sistemalarǵa mısál bolıp tabıladı.

Tegis kondensator dep atalatuǵın kondensator bir birine parallel bolǵan, bir birinen d qashıqlıǵında jaylasqan A hám B plastinkalarınan turadı (50-súwret) d qashıqlıǵınıń shaması plastinkalardıń ózleriniń sızıqlı ólshemlerinen kishi boladı. Plastinkalardıń arası boslıqtan turadı dep esaplaymız (haqıyqatında hawanıń bolıwı múmkin).

Meyli, B plastinkası Jer menen tutasqan bolsın. Eger ekinshi A plastinkasına $+Q$ zaryadı berilse, onda elpektrostatikalıq indukciyaǵa baylanıslı B plastinkasında $-Q$ zaryadı payda boladı (oǵan teń bolǵan $+Q$ zaryadı Jerge beriledi hám onıń áhmiyeti joq). Jer menen tutastırılǵan B plastinkası Jerdiń potencialın qabıl etedi, onıń mánisin biz V_2 arqalı belgileymiz. Bunday jaǵdayda A plastinkası bazı bir V_1 potencialına iye boladı hám onıń mánisi zaryadtıń shaması Q hám B plastinkasınıń V_2 potencialı boyınsha anıqlanadı. Baska zaryadlanbaǵan deneler V_1 potencialına hám soǵan sáykes kondensatordıń C sıyımlıǵına tásir etpeydi. Sebebi $+Q$ hám $-Q$ zaryadlarınń maydanları tek A hám B plastinkalarınń arasında ǵana boladı, sonlıqtan sırttaǵı basqa denelerde indukciyalanǵan zaryadları payda ete almaydı.



50-súwret.
Tegis kondensator.

Kondensatordıń sıymılgı dep plastinkalardıń biriniń (oń zaryadlangan) zaryadınıń eki plastinkanıń arasındagı potenciallar ayırmasına qatnası menen ólshenetuǵın shamanı aytamız:

$$C = \frac{Q}{V_1 - V_2}. \quad (3)$$

Bul ańlatpada $V_1 > V_2$ teńsizligi orınlanadı dep esaplaymız.

Tegis kondensatordıń sıymılgı onıń ólshemlerin táriyipleytuǵın shamalar arqalı ańǵartayıq. Plastinkalardıń sıızıqlı ólshemleri olardıń arasındagı qashıqlıqtan úlken bolǵanlıqtan olardıń arasındagı maydannıń kernewligi qarama-qarsı belgige iye zaryadlar menen zaryadlangan betleri sheksiz úlken bolǵan plastinkalardıń arasındagı elektr maydanınıń kernewligindey boladı. Bunday jaǵdayda, 128-paragrafta ayılǵan jaǵdaylarǵa sáykes, plastinkalardıń arasındagı maydannıń kernewligi E ushın mınaday ańlatpanı jaza alamız:

$$E = 4\pi\sigma.$$

Bul ańlatpadaǵı σ - zaryadlardıń betlik tıǵızlıǵı. Plastinkalardıń birewiniń betiniń maydanın S arqalı belgileybiz. Bunday jaǵdayda $\sigma = \frac{Q}{S}$ hám bunnan

$$E = 4\pi \frac{Q}{S}$$

teńligine iye bolamız hám bunnan

$$Q = \frac{ES}{4\pi} \quad (4)$$

formulasına iye bolamız. Elektr maydanınıń kernewligi E ni potenciallar ayırması $V_1 - V_2$ arqalı ańlatamız (131-paragrafqa qarańız):

$$E = \frac{V_1 - V_2}{d}.$$

E niń bul shamasın (4)-formulaǵı qoyıp, zaryadtıń muǵdarı ushın

$$Q = \frac{(V_1 - V_2)S}{4\pi d}$$

formulasın alamız. Bul formulanı hám (3)-formulanı paydalanıp, tegis kondensatordıń sıymılgı C ushın

$$C = \frac{Q}{V_1 - V_2} = \frac{S}{4\pi d} \quad (5)$$

túrindegi formulaǵa iye bolamız. (5)-formuladan tegis kondensatordıń sıymılgıınıń plastinkanıń betiniń maydanı S ke hám plastinkalardıń arasındagı qashıqlıq d ǵa kerı proporcional ekenligin kóremiz. Plastinkalar bir birine qanshama jaqın jaylasqan bolsa, sol plastinkalardan soǵılǵan kondensatordıń sıymılgı sonshama úlken boladı. Keyinirek, biz (139-paragrafqa qarańız) eger plastinkalardıń arasındagı keńislikti qanday da bir ótkizbeytuǵın (dielektriklik) ortalıq penen toltırǵanda kondensatordıń sıymılgıınıń qalayınsha ózgeretuǵınlıǵın kóremiz.

§ 137. Zaryadlar sistemasınıń energiyası. Zaryadlangan denelerdiń qálegen sistemasın payda etkende jum islenedi, sebebi zaryadlar bir biri menen Kulon nızamı boyınsha tásirlesedi hám olardı berilgen orınlarda jaylastırıw ushın jum islew kerek. Bul jumıstıń qanday da bir sırtqı kúshler tárepinen, misalı, galvanikalıq elementtegi ximiyalıq processlerdiń energiyasınıń h.t.b.

esabınan isleniwi kerek. Energiyanıń saqlanıw nızamı boyınsha, sistemanıń ústinen islengen sırtqı kúshlerdiń jumısı onıń energiyasınıń ózgeriwin anıqlaydı. Solay etip, zaryadlangan denelerdiń sisteması bazı bir muǵdardaǵı energiyaǵa iye boladı. Eger dene bunnan keyin zaryadsızlanatuǵın yamasa orın almasırtıtuǵın bolsa, onda onıń elektr energiyasınıń bir bólimi yamasa tolıǵı menen qaytadan energiyanıń basqa túrlerine ótedi.

Mısal retinde B_1 hám B_2 noqatlarında jaylasqan hám bir birine salıstırǵanda r qashıqlıǵında jaylasqan q_1 hám q_2 zaryadlarınan turatuǵın sistemanıń elektr energiyasın esaplaymız. Onıń ushın q_1 hám q_2 zaryadların sheksizlikten B_1 hám B_2 noqatlarına alıp keliw ushın orınlangan jumıstı esaplaw jetkilikli. Sheksizlikte jaylasqan zaryadlardıń bir biri menen tásir etisiwi nolge teń. Usınıń menen birge q_1 hám q_2 zaryadlarınń ózleriniń payda bolıwı ushın islengen jumıstı da esapqa almaymız hám sol zaryadlar bizge berilgen dep esaplaymız.

q_1 hám q_2 zaryadların sheksiz qashıq oblastlardan alıp kelgende islengen jumıs zaryadlardı alıp keliwdiń tártibinen ǵárezsiz. Dáslep q_1 zaryadın sheksizlikten B_1 noqatına alıp kelemiz. q_1 zaryadın sheksizlikten alıp keliw ushın islengen jumıs nolge teń, sebebi zaryadlardıń bir biri menen tásirlesiw kúshi de nolge teń. q_1 zaryadın B_1 noqatına alıp kelgennen keyin q_2 zaryadın B_2 noqatına alıp kelemiz. Bunday jaǵdayda jumıs islenedi. Onıń shaması q_2 zaryadın B_2 noqatı menen sheksiz alıstaǵı noqattıń potenciallarınıń ayırmasına kóbeytkenge teń. Sheksiz alısta jaylasqan noqattıń potencialı nolge teń, B_2 noqattaǵı potencialdı q_1 zaryadı payda etedi hám onıń shaması (129-paragrafta kórsetilgendey) q_1/r shamasına teń. Solay etip, q_1 hám q_2 zaryadların bir birinen r qashıqlıqqa alıp keliw ushın islengen jumıs mınaǵan teń:

$$A = \frac{q_1 q_2}{r}.$$

Bul jumıs eki noqatlıq zaryadtan turatuǵın sistemadaǵı óz-ara tásirlesiwiniń W energiyasınıń ólshemi bolıp tabıladı:

$$W = \frac{q_1 q_2}{r}.$$

q_2 zaryadı tárepinen B_1 noqatında payda etilgen potencialdı V_1 arqalı, al q_1 zaryadı tárepinen B_2 noqatında payda etilgen potencialdı V_2 arqalı belgilep

$$V_1 = \frac{q_2}{r}, V_2 = \frac{q_1}{r}$$

teńliklerine iye bolamız. Usıǵan baylanıslı W ushın alınǵan ańlatpanı bılayınsha kóshirip jazamız:

$$W = \frac{q_1 q_2}{r} = \frac{1}{2} \cdot \frac{q_1}{r} \cdot q_2 + \frac{1}{2} \cdot \frac{q_2}{r} \cdot q_1. \quad (1)$$

Bunnan

$$W = \frac{1}{2} q_1 V_1 + \frac{1}{2} q_2 V_2 \quad (1a)$$

formulasın alamız. Eger zaryadlardıń belgileri birdey bolsa, onda energiya onı belgige, al zaryadlardıń belgileri hár qıylı bolsa, energiya teris mániske iye boladı.

Energiya ushın jazılǵan (1a) ańlatpasın bir birinen belgili qashıqlıqlarda jaylasqan n dana zaryadtan turatuǵın sistema ushın ańsat ulıwmalastırıwǵa boladı; bul energiya q_i zaryadlarınń hár birin sheksizlikten olardıń turatuǵın orınlarına kóshirip alıp keliw ushın zárúr bolǵan jumıslardıń qosındısınan turadı. Bunday jaǵdayda

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n q_i V_i \quad (2)$$

ańlatpası alınadı hám bul ańlatpadaǵı V_i shaması i -zaryad jaylasqan orındaǵı usı i -zaryadtan basqalarınıń barlıǵı payda etken potencialdı bildiredi.

Zaryadlar sistemasınıń energiyası potenciallıq energiya xarakterine iye. Bunnan áhmiyetli nátiye kelip shıǵadı. Sistemanıń ornıqlı halı ushın potenciallıq energiyanıń minimumınıń sáykes keletuǵınlıǵı belgili. Al zaryadlardıń sistemadaǵı qálegen óz-ara jaylasıwları ushın jazılǵan energiyanıń ańlatpası hesh waqıtta da

minimumğa jetpeydi. Haqiqatında da q_i hám q_k zaryadlarınıń hár bir jubı ushın energiya [(1)-formulağa qarańız] $\frac{1}{2} \frac{q_i q_k}{r_{ik}}$ túrindegi aǵzanıń járdeminde ańlatıladı (r_{ik} - bul zaryadlardıń arasındaǵı qashıqlıq). Birdey belgige iye zaryadlar ushın bul ańlatpa oń mániske iye hám zaryadlardıń arasındaǵı qashıqlıq r_{ik} diń ósiwi menen úziksiz túrde kemeyedi. Bul birdey belgige iye eki zaryadtıń sheksiz úlken qashıqlıqlarǵa shekem alıslarına shekem barlıq waqıtta bir birin iyteriw faktına sáykes keledi.

Hár qıylı belgige iye zaryadlar ushın $\frac{1}{2} \frac{q_i q_k}{r_{ik}}$ ańlatpası teris mániske iye hám usıǵan sáykes, eki zaryad bir birine jaqınlasqanda úziksiz kemeyedi: belgileri hár qıylı bolǵan eki zaryad qosılǵansha hám bir birin tolıq yamasa shalama-shekki neytrallaǵansha bir birine jaqınlasadı. Zaryadlardıń jubı payda etken konfiguraciyanıń ornıqlı emes ekenligi haqqındaǵı juwmaq qálegen baslanǵısh tarqalıwǵa iye bolǵan zaryadlardıń sisteması ushın da, kólemlik tıǵızlıq penen táriyiplenetuǵın zaryadlarǵa iye bolǵan elektrlik sistemalar ushın da durıs.

Elektr zaryadlarınıń ornıqlı statikalıq konfiguraciyasınıń júzege keliwi múmkin emes.

Bunnan quramalı elektrlik sistemalar bolıp tabılatuǵın atomlar menen molekullardıń statikalıq sistemalar bolıp tabılmaıtuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Ornıqlılıqqa bólekshelerdiń úziksiz qozǵalıswıń barısında jetisiwge bolatuǵınday bolıp kórinedi. Sebebi Quıyash sistemasınıń ornıqlılıǵı planetalardıń Quıyashtıń dógeregindegi qozǵalıswıń esabınan kelip shıǵadı. Biraq, elektrodinamikanıń kóz-qarası boyınsha bul jaǵdayda da sistema ornıqlı bola almaydı. Sebebi, tezleniw menen qozǵalatuǵın zaryadlanǵan bóleksheler nurlanıwdıń sebebinen óziniń energiyasın úziksiz túrde joǵaltadı. Klassikalıq kóz-qarası boyınsha ayırım zaryadlanǵan bólekshelerden turatuǵın atomlar menen molekullardıń ornıqlı modelin qurıwdıń múmkinshiligi joq. Atomlar menen molekullardıń ornıqlı halı tek kvantlıq mexanikada ǵana túsindiriledi.

Endi *ońashalanǵan zaryadlanǵan ótkizgishtiń* elektrostatalıq energiyasın esaplaymız. Dáslep zaryadlanbaǵan ótkizgish Q muǵdarındaǵı elektr zaryadı menen zaryadlandı hám usınıń nátiyjesinde ol V potencialına iye boldı dep boljaymız.

Ótkizgishti zaryadlaw ushın jumıs islenedi hám bul jumıs zaryadlanǵan ótkizgishtiń energiyasınıń ólshemi bolıp tabıladı; ótkizgishti zaryadsızlandırǵanda bul jumıstı qaytıp alıwǵa boladı. Zaryadlaw ushın isengen jumıstı esaplaymız.

Ótkizgishtiń zaryadı menen onıń potencialınıń arasında mınaday qatnas bar:

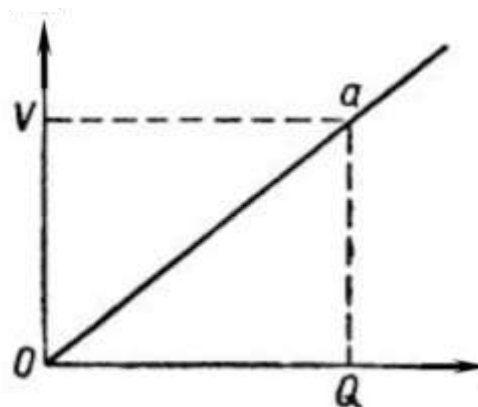
$$Q = CV. \quad (3)$$

Bul ańlatpada C arqalı ótkizgishtiń sıyımlılıǵı belgilengen.

Ótkizgishti zaryadlaǵanda onıń zaryadı Q ósedi hám onıń menen birge ótkizgishtiń potencialı da ósedi. Sonıń menen birge olar barlıq waqıtta (3)-ańlatpa menen baylanısqa. Potential V nıń zaryad Q dan ǵárezligi koordinata basınan ótetuǵın tuwrı menen súwretlenedi (51-súwret).

51-súwret.

Potencial V nıń zaryad Q dan ǵárezligi.



Ótkizgishte dáslep bazı bir Q zaryadı bar edi hám usı ótkizgishke sheksizlikten sheksiz kishi dQ zaryadın alıp kelgende islenetuǵın dA jumısın esaplayıq. dQ zaryad muǵdarı júdá kishi bolǵanlıqtan onı ótkizgishke qosqanda ótkizgishtiń potencialı sezilerliktey ózgeriske ushıramaydı dep esaplaymız. Sonlıqtan dA jumısınıń shaması dQ zaryadınıń ótkizgish penen sheksiz

alısılatılğan oblastlardıń potenciallarınıń ayırmasın kóbeytkenge teń. Sheksiz alısılatılğan oblasttaǵı potencialdı shártli túrde nolge teń dep esaplaymız. Solay etip, $dA = VdQ$ teńligi orınlı boladı. Potentialı 0 bolğan haldan potencialı V bolğan halǵa ótkeriw ushin ótkizgishti zaryadlaǵanda islengen tolıq jumıs barlıq dA elementar jumıslarınıń qosındısına, yaǵnıy 0 den V ǵa shekem alınğan integralǵa teń:

$$A = \int_0^V V dQ.$$

(3)-teńlikten $dQ = CdV$ teńligin alamız, bunnan

$$A = \int_0^V CVdV$$

teńliginiń orınlı ekenligi kelip shıǵadı. Deneniń sıyımlıǵı C turaqlı shama, sonlıqtan onı integral belgisiniń aldına shıǵarıwǵa boladı. Nátiyjede

$$A = C \int_0^V V dV = \frac{CV^2}{2}$$

ańlatpasın alamız. Bul jumıs zaryadlanǵan deneniń energiyası bolǵan W nı anıqlaydı. Solay etip, zaryadlanǵan ótkizgishtiń energiyası ushin

$$W = \frac{CV^2}{2} \quad (4)$$

formulasın alamız. Sıyımlıq C nı (3)-ańlatpa boyınsha zaryad Q hám potencial V arqalı ańlatıp, energiya ushin basqa ańlatpanı alamız:

$$W = \frac{1}{2} QV. \quad (4a)$$

Bunnan keyin eń aqırında potencialdı zaryad hám sıyımlıq arqalı ańlatıp, zaryadlanǵan ótkizgishti ushin úshinshi formulanı alamız:

$$W = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q^2}{C}. \quad (4b)$$

Energiya ushin alınğan formulalardı *zaryadlanǵan kondensator* ushin ańsat ulıwmalastırıwǵa boladı. Plastinkalardı zaryadlaw processin bılayınsha kóz aldıǵa keltiriwge boladı: dáslep neytral plastinkalar bir plastinkadan ekinshi plastinkaǵa sheksiz kishi bolǵan $+dQ$ zaryadın alıp beriw arqalı ástelik penen zaryadlanadı; bul alıp beriw bir plastinkanıń oń zaryadın dQ shamasına úlkeytedi, al ekinshi plastinkanıń oń zaryadın usınday shamaǵa kemeytedi yamasa onıń teris zaryadın tap sonday shamaǵa úlkeytedi. Solay etip, zaryadlaw processinde biz barlıq waqıtta eki plastinkada da absolyut shamaları boyınsha bir birine teń hám belgileri boyınsha qarama-qarsı zaryadlarǵa iye bolamız. Bir plastinkadan dQ muǵdarındaǵı elektr zaryadın ekinshi plastinkaǵa ótkeriw ushin jumıstıń isleniwın talap etedi. Eger bir plastinkanıń potencialı V_1 ge, al ekinshisiniki V_2 ge teń bolsa, onda bul jumıs mınaǵan teń:

$$dA = (V_1 - V_2)dQ.$$

Solay etip, biz bul jaǵdayda da elementar jumıs dA ushin ońashalanǵan ótkizgishti zaryadlanǵadaǵıday ańlatpanı aladı ekenbiz. Tek ǵana potencial V nıń ornında potenciallar ayırması $V_1 - V_2$ tur. Bunnan, eger (4a) formuladaǵı V nı $V_1 - V_2$ ge almastıratuǵın bolsaq, onda zaryadlanǵan kondensatordıń tolıq energiyası ushin

$$W = \frac{1}{2} Q(V_1 - V_2) \quad (5)$$

formulasına iye bolamız.

Zaryadtıń muǵdarı Q hám kondensatordıń sıyımlıǵı arasındǵı $Q = C(V_1 - V_2)$ qatnastı paydalanıp, bul formulaǵa jáne bir túrdi beremiz:

$$W = \frac{1}{2} C (V_1 - V_2)^2. \quad (5a)$$

Usınıń menen birge mınaday túrge de alıp keliwge boladı:

$$W = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q^2}{C}. \quad (5b)$$

Formulalardıń úshewi de úsh shamanıń funkciyası sıpatında zaryadlangan kondensatordıń energiyasın beredi: astarlardağı potenciallardıń ayırması $V_1 - V_2$, astarlardağı zaryadlardıń muǵdarı Q hám sıyımlıq C .

Sanlı mısıl keltiremiz. 3000 V potenciallar ayırmasına shekem zaryadlangan sıyımlıǵı 1 mkf bolǵan kondensatordıń energiyasın esaplaymız.

Mısaldı birliklerdiń eki sistemasın paydalanıp sheshemiz: a) CGSE-sistemasın hám b) praktikalıq sistemanı.

a) CGSE-sistemada sıyımlıq $C = 1 \text{ mkf} = 9 \cdot 10^5 \text{ sm}$, $V_1 - V_2 = 300 \text{ v} = \frac{3000}{300}$ potencialdıń CGSE-birligi, yaǵnıy $V_1 - V_2 = 10 \text{ CGSE}$. Bunnan (5a) formula boyınsha:

$$W = \frac{1}{2} C (V_1 - V_2)^2 = \frac{1}{2} \cdot 9 \cdot 10^5 \cdot 10^2 \text{ erg} = 4,5 \text{ Dj}.$$

b) Birliklerdiń praktikalıq sistemasında: $C = 1 \text{ mkf} = 10^{-6} \text{ f}$, $V_1 - V_2 = 3000 \text{ V}$, bunnan:

$$W = \frac{1}{2} \cdot 10^{-6} (3 \cdot 10^3)^2 \text{ Dj} = 4,5 \text{ Dj}.$$

Kernewligi E bolǵan bir tekli elektrostatikalıq maydandaǵı dipoldiń energiyasın esaplaymız (52-súwret). Dipoldiń kósheri l menen maydannıń $\mathbf{E}$ kernewliginiń arasındaqı múyesh α bolsın. Dipoldiń oń hám teris zaryadlarına tásir etetuǵın kúshler sáykes $+qE$ hám $-qE$ shamalarına teń. 135-paragrafta kórsetilgendey, olar momenti

$$M = qEl \sin \alpha = pE \sin \alpha$$

shamasına teń kúshlerdiń jubın payda etedi. Bul ańlatpada $p = ql$ - dipoldiń momenti.

Dipoldiń kósheri maydannıń kernewligine parallel bolǵanda $\alpha = 0$ hám kúshlerdiń momenti $M = 0$; dipoldiń kósheri maydannıń kernewligine perpendikulyar bolsa ($\alpha = \pi/2$), kúshler momentiniń shaması óziniń $M = pE$ maksimumıǵa mánisine jetedi. Bul sońǵı awhaldaǵı dipoldiń energiyasın nolge teń dep esaplaymız.

Dipoldi sheksiz kishi $d\alpha$ múyeshine burǵanda elektrlik kúshler

$$dA = M d\alpha = pE \sin \alpha \cdot d\alpha$$

jumısın isleydi. Tap usınday shamaǵa dipoldiń energiyası W kemeyedi. Dipoldiń kósheri menen $\mathbf{E}$ vektorınıń arasındaqı múyesh α ǵa teń bolǵanda dipoldaǵı energiyanıń zapası onı $\mathbf{E}$ vektorına perpendikulyar ($\alpha = \pi/2$) bolǵan awhaldan α nıń berilgen mánisine alıp kelgendegi islengen jumısqa teń:

$$W = \int_{\pi/2}^{\alpha} pE \sin \alpha \cdot d\alpha = pE \int_{\pi/2}^{\alpha} \sin \alpha d\alpha.$$

Integrallawdı orınlap,

$$\int_{\pi/2}^{\alpha} \sin \alpha d\alpha = -\cos \alpha$$

mınaday formulaǵa iye bolamız

$$W = -pE \cos \alpha.$$

Bul ańlatpa biz izlep atırǵan dipoldiń energiyasınıń ańlatpası bolıp tabıladı. Maydannıń kernewligi $\mathbf{E}$ ge perpendikulyar turǵan dipoldiń energiyasın nolge teń dep esaplaǵanımızǵa baylanıslı minus belgisi alındı. Bunday jaǵdayda, $\alpha < \frac{\pi}{2}$ múyeshlerinde onıń mánisi onnan da kishi, yaǵnıy teris boladı. $\alpha = 0$ awhalına elektr energiyasınıń minimumı sáykes keledi. Usınıń menen birge bul awhal teń salmaqlıq awhalı bolıp tabıladı (bunday jaǵdayda kúshlerdiń momenti $M = 0$).

Solay etip, teń salmaqlıq halı elektr energiyasınıń minimumına sáykes keledi eken. Mexanikada teń salmaqlıq halınıń potenciallıq energiyanıń minimumına sáykes keletuǵın bolǵanlıqtan, onda, usıǵan

sáykes, elektrostatikalıq maydanda jaylasqan zaryadlangan denelerdiń energiyası mexanikadaǵı potenciallıq energiyaǵa sáykes keledi eken.

§ 138. Elektrostatikalıq maydanniń energiyası. 136-paragrafta alınǵan formulalar tegis kondensatordıń energiyasını astarlardıń arasındaǵı elektrostatikalıq maydandı táriyipleytuǵın shamalar arqalı ańlatıwǵa múmkinshilik beredi. Onıń ushın tegis kondensatordıń plastinkalarınń zaryadı Q menen plastinkalardıń arasındaǵı kernewlik E den paydalanamız:

$$E = \frac{4\pi Q}{S}. \quad (1)$$

Bul ańlatpada S - plastinkanıń betiniń maydanı. Usınıń menen birge astarlardaǵı potenciallardıń ayırması maydanniń kernewligi E hám plastinkalardıń arasındaǵı qashıqlıq d menen

$$E = \frac{V_1 - V_2}{d}. \quad (2)$$

qatnası arqalı baylanısqan. (1)- hám (2)-formulalardaǵı Q menen $V_1 - V_2$ shamaların kondensatordıń energiyası ushın jazılǵan formulaǵa qoyıp [137-paragraftaǵı (5)-formula]

$$W = \frac{1}{8\pi} E^2 S d \quad (3)$$

formulasına iye bolamız. Bul formula kondensatordıń energiyasını maydanniń kernewligi E arqalı ańlatadı. Solay etip, kondensatordıń energiyasını eki jol menen ańǵartıwǵa boladı eken: plastinkalardıń zaryadı menen potencialları yamasa zaryadlar payda etken elektrostatikalıq maydanniń kernewligi arqalı. Sońǵı jaǵday elektrostatikalıq maydandı energiyaǵa iye boladı dep esaplawǵa múmkinshilik beredi hám usıǵan sáykes *elektrostatikalıq maydanniń energiyası* dep aytıwǵa boladı. Bul kóz-qarastıń durıs ekenligi (3)-formula boyınsha energiyanıń kondensatordıń astarlarınń arasındaǵı keńislik bolǵan Sd kóbeymesine proporcionallıǵı boyınsha da tastıyqlanadı. Plastinkalar payda etken elektr maydanı tek olardıń arasındaǵı keńislikte ǵana nolge teń bolmaǵanlıqtan Sd kóbeymesi elektr maydanı toplanǵan keńisliktiń kólemine de beredi. Solay etip elektr maydanınıń energiyası W usı maydan iyelegen keńisliktiń kólemine de proporcional bolıp shıǵadı.

Kondensatordıń elektrostatikalıq maydanınıń energiyasını qarawdıń barısında

$$\omega = \frac{W}{Sd} \quad (4)$$

shamasın qabıl etip, *energiyanıń kólemlik tıǵızlıǵı* túsiniǵın kirgiziwge boladı. Energiyanıń kólemlik tıǵızlıǵı elektr maydanı iyelep turǵan kólemniń bir birligine sáykes keletuǵın energiya bolıp tabıladı. (4)-ańlatpadaǵı W nıń ornına onıń (3)-ańlatpadaǵı mánisin qoyıp

$$\omega = \frac{1}{8\pi} E^2 \quad (5)$$

formulasına iye bolamız.

Energiyanıń tıǵızlıǵı haqqındaǵı túsiniq kondensatordıń bir tekli maydanı ushın kirgizildi. Onı qálegen elektrostatikalıq maydan ushın ańsat ulıwmalastırıwǵa boladı. Eger maydan bir tekli bolmasa, onda ΔV kólemine sáykes keletuǵın energiyanıń ortasha tıǵızlıǵı $\bar{\omega}$ dep ΔV kólemine sáykes keletuǵın ΔW energiyasını túsiniw kerek boladı:

$$\bar{\omega} = \frac{\Delta W}{\Delta V}.$$

Al, berilgen noqattaǵı energiyanıń tıǵızlıǵı dep ΔV kóleminiń shaması berilgen noqattıń átirapında sheksiz kishireygendegi

$$\omega = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta W}{\Delta V} \right)$$

shekti túsinemiz. Júdá kishi kólemde barlıq maydandı juwıq túrde bir tekli hám onı kernewlik vektorı $\mathbf{E}$ niń belgili mánisi menen táriyiplewge boladı dep esaplawǵa boladı. Demek, berilgen

noqattaǵı bir tekli emes maydanniń tıǵızlıǵı

$$\omega = \frac{1}{8\pi} E^2$$

formulasınıń járdeminde anıqlanadı. Bul formulada E arqalı energiyanıń tıǵızlıǵı esaplanatuǵın noqattaǵı maydanniń kernewligi. Bunnan energiyanıń tıǵızlıǵı bolǵan (5)-ańlatpanıń qálegen maydan ushın durıs ekenligi kórinip tur. Bir tekli emes maydanniń energiyasınıń tıǵızlıǵı bir noqattan ekinshi noqatqa ótkende ózgeredi.

Elektrostatikalıq maydanniń shekli V kólemine sáykes keletuǵın energiyanı esaplaw ushın bul kólemdi elementar ΔV kólemlerge bóliw hám olardıń hár qaysısına sáykes keletuǵın $\Delta W = \omega \cdot \Delta V$ energiyalardı esaplap, olardı kólemniń barlıǵı boyınsha summaw kerek:

$$W = \sum \omega \cdot \Delta V. \quad (6)$$

Bul ańlatpada ω arqalı hár bir ΔV elementar kólemge sáykes keletuǵın energiyanıń tıǵızlıǵınıń mánisi belgilengen.

Kólemlik tıǵızlıǵı ω bolǵan maydanniń energiyasınıń tarqalıwı haqqındaǵı kóz-qaraslardıń durıs ekenligi elektrlik hám magnitlik qubılıslar haqqındaǵı tálimattıń rawajlanıw barısında tastıyıqlandı. Bul tálimat energiyanıń "bos" keńislik arqalı elektromagnit tolqınlarınıń energiyası túrinde shekli $c = 3 \cdot 10^{10}$ sm/sek tezligi menen tarqalatuǵınlıǵın kórsetti. Bul juwmaq maydanniń tábiyatın túsiniw ushın úlken áhmiyetke iye. Energiya materiyanıń halınıń xarakteristikalarınıń biri bolıp tabıladı hám, usıǵan sáykes, energiya haqqındaǵı túsinikti materiya haqqındaǵı túsinikten ayırıp alıwǵa bolmaydı. Bul 124-paragraftaǵı elektromagnit maydanniń materiyanıń ayırıqsha túri haqqındaǵı juwmaqtıń durıs ekenligin tastıyıqlaydı (bul haqqında 152-paragrafta tolıǵıraq ayılǵan).

Bir tekli bolmaǵan maydanniń shekli kólemge sáykes keletuǵın energiyası ushın dálirek bolǵan ańlatpanı kólemniń sheksiz kishi dV elementin qaraw jolı menen alamız. Bunday jaǵdayda usınday sheksiz kishi kólemge sáykes keletuǵın energiya dW

$$dW = \frac{1}{8\pi} E^2 dV$$

formulasınıń járdeminde anıqlanadı.

Shekli V kóleminde toplanǵan maydanniń energiyası W maydanniń barlıq sheksiz kishi bolǵan uchastkalardaǵı energiyalardıń summasına teń, yaǵnıy

$$W = \frac{1}{8\pi} \int_V E^2 dV, \quad (6a)$$

integralınıń járdeminde anıqlanadı. Bul integral maydan iyelep turǵan barlıq V kólemi boyınsha alınadı.

(6a) ańlatpanı paydalanıp radiusı R bolǵan bir tekli zaryadlangan sferanıń elektrostatikalıq maydanınıń tolıq energiyasın esaplaymız. Meyli, sferanıń zaryadı Q ǵa teń hám sfera boslıqta jaylasqan bolsın.

Zaryadlangan sfera menen koncentrik bolǵan sheksiz juqa bolǵan shar qatlamına sáykes keletuǵın dW energiyasın esaplaymız; bul shar tárizli qatlamnıń radiusı pust r , al onıń qalınlıǵı dr bolsın. Qatlamnıń qalınlıǵı júdá kishi bolǵanlıqtan usı qatlamnıń ishindegi barlıq noqatlardaǵı maydanniń kernewligi E turaqlı hám

$$E = \frac{Q}{r^2}$$

shamasına teń dep esaplawǵa boladı. Qatlamnıń kólemi $dV = 4\pi r^2 dr$, bunnan usı qatlamnıń ishindegi maydanniń energiyası

$$dW = \frac{Q^2}{2r^2} dr$$

shamasına teń. Barlıq maydanniń energiyasın dW shamasın r boyınsha $r = R$ den (bul

zaryadlangan sferanıń betiniń qasındaǵı noqatlarǵa sáykes keledi) $r = \infty$ ge shekem integrallaw arqalı alamız:

$$W = \int_R^{\infty} \frac{Q^2}{2r^2} dr = \frac{Q^2}{2} \int_R^{\infty} \frac{dr}{r^2}.$$

Integrallawdı orınlap,

$$\int_R^{\infty} \frac{dr}{r^2} = \frac{1}{R}$$

ańlatpasın hám onnan

$$W = \frac{Q^2}{2R}$$

ańlatpasın tabamız. Ońashalangán sferanıń sıyımlıǵı onıń radiusına teń bolǵanlıqtan ($C = R$), sońǵı ańlatpanı

$$W = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q^2}{C}$$

túrinde jazıwǵa boladı. Bul ańlatpa bolsa 137-paragraftaǵı zaryadlangan deneniń energiyası ushın jazılǵan (46)-ańlatpaǵa sáykes keledi. Solay etip, elektr maydanınıń energiyasınıń tıǵızlıǵı ushın jazılǵan ańlatpadan biz zaryadlangan deneniń energiyasınıń zaryad hám sıyımlıq ushın jazılǵan eń dáslepki ańlatpaǵa qaytıp keldik.

XV BAP

DIELEKTRIKLERDEGR ELEKTROSTATIKALIQ QUBILISLAR

§ 139. Dielektrikler. Dielektriklik turaqlı. XIX ásirdeń ortalarında Faradey sferalıq kondensatorlar menen eksperimentler ótkeriwdeń barısında kondensatordıń astarlarınń arasındaǵı keńislikti kúirt penen toltırǵanda (hawanın ornına), onıń elektr sıymılıǵınıń bir neshe ese úlkeyetuǵınıń ańǵardı. Keyinirek bul qubılıstıń ulıwmalıq xarakterge iye ekenligi hám qálegen kondensatordıń sıymılıǵınıń astralardıń arasındaǵı keńislikti qanday ótkermeytuǵın zattıń (dielektrik) toltırıp turǵanlıǵınan ǵárezli ekenligi belgili boldı. Kondensatordıń astarlarınń arası bos bolǵan jaǵdayda onıń sıymılıǵın C_0 arqalı belgileymiz. Al, astarlardıń arasında dielektrik bolǵan jaǵdayda kondensatordıń sıymılıǵı mınaǵan teń boladı:

$$C = \varepsilon C_0. \quad (1)$$

ε shaması dielektriklik turaqlı dep ataladı hám ol astralarınń arası boslıq bolǵan kondensatordıń sıymılıǵınıń astarlardıń arasına dielektrik qoyǵanda neshe ese artatuǵınıń kórsetedi.

1-keste

Dielektriklik turaqlı ε

Zat	ε	Zat	ε	Zat	ε
Hawa (1 atm basımda)	1,0006	Parafin	2,1	Ebonit	2,5
Kúirt	4	Slyuda	6 - 7	Kerosin	2,0
Mum	7,8	SHıyshe	5,5 - 7	Suw	81
		Farfor	5,7 - 6,3		

Dielektriklik turaqlınıń mánisi dielektriktiń tábiyatınan hám ol jaylasqan sharayatlardan (temperatura, basım hám t. b.) ǵárezli. Tájiriyebeıler barlıq zatlar ushın $\varepsilon > 1$ ekenligin kórsetedi. (1)-formulaǵa sáykes dielektriklik turaqlı ε ólshem birlikke iye emes shama hám boslıq ushın ol 1 ge teń boladı⁶. 1-kestede bir qatar zatlar ushın dielektriklik turaqlınıń mánisleri keltirilgen (ádettegi temperaturalardaǵı). Kórinip turǵanıday, dielektriklik turaqlılardıń shamaları birden júdá kishi shamaǵa ayırılauǵın shamalardan (atmosferalıq basımdaǵı gazlerde) bir neshe onlaǵanǵa shekem ózgeredi. Ayrıqsha úlken dielektriklik turaqlıǵa suw iye ($\varepsilon = 81$).

Tegis kondensatordıń plastinkalarınń arasına bir tekli dielektrikti kirgizgende neniń bolatuǵınıń qarayıq.

Eń dáslep kondensatordıń astarları qorshaǵan ortalıq penen baylanısqa iye emes dep boljaymız. Sonlıqtan olardaǵı zaryadlar ózgerissiz qaladı:

$$Q = \sigma S.$$

Bunday sharayatlarda dielektrik penen toltırǵandaǵı kondensatordıń sıymılıǵınıń úlkeyiwi astarlardıń arasındaǵı potencıallar ayırmasınıń kishireyiwinıń nátiyjesinde júzege keledi. Haqıyqatında da,

$$C = \frac{Q}{V_1 - V_2} \quad (2)$$

qatnasınan astarlardıń arasındaǵı $V_1 - V_2$ potencıallar ayırmasınıń shaması ε ese kemeygende sıymılıqtıń ε ese úlkeyetuǵınıń kórinip tur. Al potencıallar ayırmasınıń kishireyiwi astarlardıń arasındaǵı elektrostatikalıq maydannıń kernewliginiń kishireyiwinıń saldarınan orın aladı. Sebebi 131-pagraftaǵı (2)-qatnasqa sáykes:

⁶ Tórende qanday jaǵdaylarda dielektriklik turaqlı ε ólshem birliğine iye hám onıń san mánisiniń boslıqta birden ózgeshe bolatuǵın elektrlik shamalar sistemasın kirgiziwge bolatuǵınıń kórsetiledi.

$$E = \frac{V_1 - V_2}{d}.$$

Bunnan astarlarınıń arası dielektrik penen toltırılğan kondensatordıń astarlarınıń ishindegi maydannıń kernewligi E astarlarınıń arası bos bolğan jaǵdaydaǵı maydannıń kernewligi E_0 den ε ese kishi bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı:

$$E = \frac{E_0}{\varepsilon}.$$

Maydannıń hálsirewiniń sebeplerin tallaymız. Kondensatordıń astarlarınıń arasındaǵı elektr maydanına kirgizilgen dielektriktiń ishinde dielektriktiń molekularındaǵı zaryadlardıń qaytadan tarqalıwı yamasa dipollik molekularardıń burılıwınıń sebebinen polarizaciya qubılısı júzege keledi (122-paragrafqa qarańız). Bir tekli dielektrik bolğan jaǵdayda bul polarizaciya dielektriktiń ishindegi kólemlik zaryadlardıń payda bolıwına alıp kelmeydi. Sebebi tutası menen alınğan molekular neytral hám qońsılás molekularardıń zaryadları bir birin kompensaciyalaydı (53-súwretke qarańız). Biraq, dielektriktiń shegarasında zaryadlardıń kompensaciyası orın almaydı. Bunday jaǵdayda teris zaryadlangan plastinkaǵa qarap turğan dielektriktiń betinde kompensaciyalanbaytuǵın oń zaryadlar, al, dielektriktiń oń zaryadlangan plastinkaǵa qarap turğan betinde teris zaryadlar payda boladı. Bul zaryadlar *baylanısqań zaryadlar* atamasına iye boldı hám olardı dielektriktiń betinde turaqlı $+\sigma'$ hám $-\sigma'$ betlik tıǵızlıqları menen tarqalğan dep esaplawǵa boladı (tolıǵıraq 141-paragrafta qarańız).

Nátıyjede dielektrikte onıń polarizaciyası menen baylanıslı bolğan qosımsha elektr maydanı payda boladı. Bul *qosımsha maydannıń baǵıtı kondensatordıń astarlarındaǵı zaryadlar payda etken maydannıń baǵıtına qarama-qarsı*.

Astarlardıń arasında dielektrik bolmağan jaǵdaydaǵı maydan E_0 kernewligine iye dep boljaymız. E_0 shaması astarlardaǵı zaryadlardıń (olardı *erkin zaryadlar* dep ataymız) tıǵızlıǵı σ menen

$$E_0 = 4\pi\sigma$$

qatnasınıń tiykarında baylanısqań. Dielektriktiń polarizaciyası menen baylanıslı bolğan maydannıń kernewligi E' baylanısqań zaryadlardıń tıǵızlıǵı σ' penen sáykes qatnastıń tiykarında baylanısqań:

$$E' = 4\pi\sigma'.$$

Dielektrik penen toltırılğan kondensatordıń astarlarınıń arasındaǵı tolıq E maydanı astarlardıń maydanınıń kernewligi menen polarizaciyalanğan dielektriktiń maydanınıń geometriyalıq qosındısına teń:

$$E = E_0 + E'.$$

E_0 hám E' vektorlarınıń baǵıtları qarama-qarsı ekenligin esapqa alıp qosındı kernewliktiń san mánisin tabamız:

$$E = E_0 - E' = 4\pi(\sigma - \sigma').$$

Solay etip, dielektriktiń polarizaciyası maydandı hálsiretedi eken.

Endi

$$E = \frac{E_0}{\varepsilon} = \frac{4\pi\sigma}{\varepsilon}$$

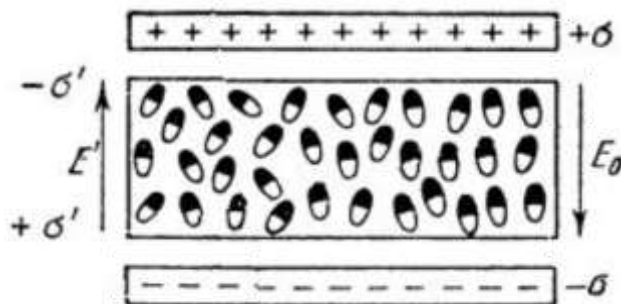
qatnasın paydalanıp, dielektriktegi baylanısqań zaryadlardıń tıǵızlıǵı menen maydannıń kernewliginiń arasındaǵı baylanıstı tabamız:

$$\sigma' = \frac{4\pi\sigma - E}{4\pi} = \frac{\varepsilon E - E}{4\pi} = \frac{\varepsilon - 1}{4\pi} E = \chi E. \quad (3)$$

$\chi = \frac{\varepsilon - 1}{4\pi}$ shaması polarizaciya koefficienti dep ataladı. Álbette, polarizaciya koefficienti dielektriktiń ózinen ǵárezli. Sońǵı (3)-teńlikten polarizaciyanıń saldarınan dielektriktiń shegarasında payda bolatuǵın zaryadlardıń tıǵızlıǵınıń dielektriktiń ishindegi tásir etetuǵın maydannıń kernewligine proporcional (tolıǵıraq 142-paragrafta ǵáp etiledi).

Bul jaǵdayda polyarizaciyalanǵan dielektriktiń tek óziniń ishinde ǵana hásiretetuǵın maydandı payda etetuǵının ańǵaramız. Sebebi $+\sigma$ hám $-\sigma$ baylanısqan zaryadları bir birine parallel bolǵan eki tegislikte tarqalǵan boladı; bizler bunday zaryadları bul tegislikler menen sheklengen oblasttıń sırtında nolge teń bolǵan kernewlikti payda etedi (128-paragrafqa qarańız). Demek, eger dielektrik hám plastinakalardıń arasında kuwıslıq qalǵan bolsa, onda usı quwıslıqtaǵı maydanniń kernewligi dielektrikti kirgizbesten burınǵı elektr maydanniń kernewligindey boladı.

53-súwret.
Kondensatordaǵı dielektrik.



Endi astarlarınıń arasına turaqlı potenciallar ayırması túsirilgen (astarlardı potenciallardıń turaqlı ayırması deregine tutastırıw arqalı) kondensatorǵa dielektrikti kirgiziwdiń tásinin qaraymız. Bunday jaǵdayda astarlardıń arasındaǵı maydanniń kernewligi dielektrik qatlamdı kirgizbesten burınǵıday bolıp qala beredi (kernewlik penen potencialdıń arasındaǵı tiykarǵı qatnas boyınsha). Dielektriktiń polyarizaciyası maydandı hásiretetuǵın bolǵanlıqtan, kernewliktiń ózgerissiz qalıwı kondensatordıń astarlarındaǵı erkin zaryadları derektiń esabınan kóbeytiwdiń nátiyjesinde ámelge asırıladı.

(2)-qatnastan sıyımlıqtıń ε ese úlkeyiwi usınday sharayatlarda astarlardaǵı erkin zaryadlardıń ε ese úlkeyiwiniń orın alatuǵınlıǵı kórinip tur.

§ 140. Dielektrik bolǵan jaǵdaydaǵı kondensatordıń energiyası. Dielektriktegi maydanniń energiyası. Kondensatordıń plastinkalarınıń arasına dielektrik kirgizgen jaǵdayda kondensatordıń energiyasınıń qanday ózgeriske ushıraytuǵınlıǵın qaraymız. 137-paragrafta biz kondensatordıń W energiyasınıń

$$W = \frac{1}{2} Q(V_1 - V_2) \quad (1)$$

qatnasınıń járdeminde anıqlanatuǵınlıǵın kórdik. Bul ańlatpada Q - kondensatordıń plastinkasınıń zaryadı. W ushın bul ańlatpa berilgen potenciallar ayırmasındaǵı plastinkalardıń arasındaǵı zaryadı alıp ótiwde islengen jumıstı esaplawdıń tiykarında alınǵanlıqtan, bul ańlatpa kondensatordıń plastinkalarınıń arasında dielektrik bar bolǵan jaǵdayda óziniń kúshin saqlaydı. (1)-formula bos kondensatordıń energiyası W menen dielektrik penen toltırılǵan tap sonday kondensatordıń energiyası W_ε menen salıstırıwǵa múmkinshilik beredi. Biraq, bul jerde salıstırıwdıń qanday sharayatlar ushın júrgiziletuǵınlıǵın bilip alıw kerek.

Eger ishi bos kondensatordıń astarlarındaǵı hám dielektrikegi bar kondensatordaǵı zaryadlar *birdey bolsa*, onda energiyadaǵı ayırma eki kondensatordıń astarlarındaǵı potenciallardıń hár qıylı bolatuǵınlıǵı menen baylanıslı. 139-paragrafta kórsetilip ótilgenindey, bunday jaǵdayda dielektrik penen toltırılǵan kondensatordıń astarlarınıń arasındaǵı potenciallar ayırmasınıń shaması bos kondensatordıń astarlarınıń arasındaǵı potenciallar ayırmasınan ε ese kishi. Sonlıqtan usınday sharayatlarda biz

$$\frac{W_\varepsilon}{W} = \frac{1}{\varepsilon}$$

teńligine iye bolamız, yaǵnıy kondensatordı dielektrik penen toltırǵanda onıń energiyası ε ese kemeyedi.

Kerisinshe, eger bos hám dielektrik penen toltırılğan kondensatordıń astarlarınıń arasında *birdey potenciallar ayırması* payda etiletuǵın bolsa, onda energiyalar astarlardaǵı erkin zaryadlar bolǵan Q ǵa proporcional boladı.

Joqarıda kórgenimizdey, dielektrik penen toltırılğan kondensatordıń astarlarındaǵı zaryadtır bos kondensatordıń astarlarındaǵı zaryadtan ε ese úlken boladı hám usıǵan baylanısı biz

$$\frac{W_\varepsilon}{W} = \varepsilon$$

teńligin alamız. YAǵnıy dielektrik penen toltırılǵanda kondensatordıń energiyası *úlkeyedi* eken. Energiyanıń úlkeyiwi astarlardıń arasındaǵı potenciallar ayırmasın turaqlı etip uslap turatuǵın derektiń esabınan boladı.

Kondensatordıń energiyası ushın jazılǵan

$$W = \frac{1}{2} C(V_1 - V_2)$$

ańlatpasınan dielektriktiń ishindegi elektrostatikalıq maydannıń energiyasınıń tıǵızlıǵın ańsat tabıwǵa boladı (138-paragrafta boslıqtaǵı elektrostatikalıq maydannıń energiyasınıń tıǵızlıǵı ushın ańlatpa alınǵan edi). Onıń ushın dielektrik penen toltırılǵan tegis kondensatordı qaraymız hám dielektriktiń ishindegi maydandı bir tekli dep esaplaymız. Energiya ushın jazılǵan (1)-formulaǵa maydannıń kernewligi arqalı ańlatılǵan

$$Q = \sigma S = \frac{\varepsilon SE}{4\pi} \text{ hám } V_1 - V_2 = Ed$$

Q zaryadı menen $V_1 - V_2$ potenciallar ayırmasın qoyıp

$$W = \frac{1}{8\pi} \varepsilon E^2 Sd$$

teńligin tabamız. Usı ańlatpanı kondensatordaǵı dielektriktiń kólemi Sd ǵa bólip, dielektriktiń ishindegi energiyanıń tıǵızlıǵı ushın

$$W = \frac{\varepsilon E^2}{8\pi} \quad (2)$$

ańlatpasın alamız. Bir tekli bolmaǵan dielektrik hám bir tekli emes maydan ushın ulıwmalastırıwdı dielektrikti júdá kishi bolǵan ΔV oblastlarına bólemiz hám usı oblastlardıń hár biriniń sheklerinde bir tekli emesliklerdi esapqa almaymız. Bunday jaǵdayda 138-paragraftaǵı tallawlardı qaytalap, bir tekli bolmaǵan jaǵdaydaǵı maydannıń energiyası ushın

$$W = \sum \frac{\varepsilon E^2}{8\pi} \Delta V \quad (2)$$

ańlatpasına iye bolamız.

§ 141. Dielektriklerdiń polarizaciya. Polarizaciya vektori. Dielektriklerdiń polarizaciya qubılısın tolıǵıraq qaraymız. Dielektrik molekulalardan turadı, al olardıń quramına teris zaryadlangan elektronlar menen oń zaryadlangan yadrolar kiredi. Hár bir molekulanıń ishindegi oń hám teris zaryadlar bir birin kompensaciyalaydı. Sonlıqtan tutası menen alınǵan molekula elektrlik jaqtan neytral bolıp tabıladı. Biraq, molekuladaǵı oń hám teris zaryadlardıń salmaq orayları bir birine salıstırılǵanda jılistırılǵan bolıwı múmkin. Bul molekuladaǵı dipollik moment $\mathbf{p}$ nıń payda bolıwına alıp keledi. Dáslep molekula sırtqı maydannıń tásirinde ózgermeytuǵın turaqlı $\mathbf{p}$ momentke iye bolatuǵın jaǵdaydı qaraymız. Bunday molekulanı *qattı dipollik molekula* dep ataymız.

Sırtqı maydan bolmaǵanda tártipsiz jıllılıq qozǵalıslarınıń bar bolıwınıń sebebinen molekulalardıń momentleri hár qıylı bolıp baǵıtlangan. Eger ishinde molekulalardıń jetkilikli sanı bolǵan dielektriktiń ΔV kólemin ayırıp alsaq, onda usı kólemdegi barlıq molekulalardıń momentleriniń vektorlıq qosındısı $\sum \mathbf{p}$ nolge teń boladı. Sırtqı elektr maydanı bar bolǵan jaǵdayda elektrlik dipoller maydannıń baǵıtında burılıs baslaydı hám momentlerdiń qosındısı $\sum \mathbf{p}$ nolge teń bolmaydı hám maydan qanshama kúshli bolsa, onıń shaması da úlken boladı. Qanday da bir dárejede baǵıtlangan (orientaciyalanǵan) dipollik momentleri bar dielektrikti *polarizaciyalanǵan*

dielektrik dep ataymız.

Polyarizaciyanıń ólshemi sıpatında bir birlik kólemdegi molekulalardıń qosındı momenti $\sum \mathbf{p}$ ǵa sáykes keletuǵın $\mathbf{P}$ vektorın qabıl etemiz:

$$\mathbf{P} = \frac{\sum \mathbf{p}}{\Delta V}. \quad (1)$$

SHeklerinde ayırım molekulalardıń momentleri $\sum \mathbf{p}$ alınatuǵın ΔV kóleminde jetkilikli sandaǵı molekulalardıń bolıwı, sonıń menen birge onıń ishindegi makroskopiyalıq shamalar bolǵan tıǵızlıqtıń, temperaturanıń, elektr maydanınıń kernewligi E niń hám t. b. turaqlı shamalar bolıp esaplanıwı ushın kólem jetkilikli dárejede kishi bolıwı kerek.

Molekulalardıń orientaciyasınıń dárejesin dielektriktiń sheklerinde maydannıń kernewligi E ge proporcional dep esaplaw tábiyiy. Bunday jaǵdayda polyarizaciya vektorı $\mathbf{P}$ maydannıń kernewligi E ge proporcional bolıp shıǵadı:

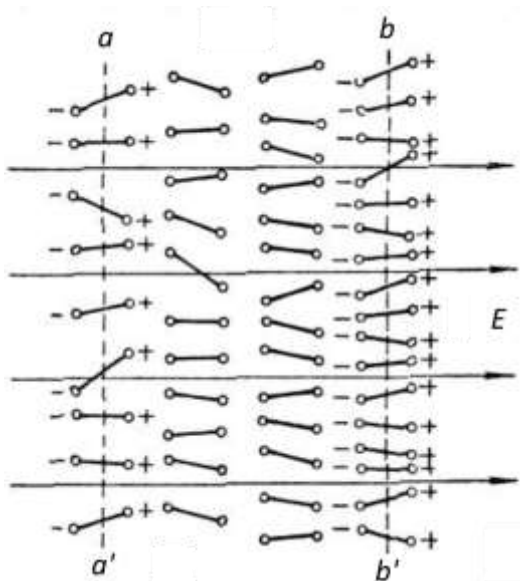
$$\mathbf{P} = \kappa \mathbf{E}. \quad (2)$$

Biz tómende κ koefficientiniń 139-paragrafta kirgizilgen polyarizaciya koefficientine sáykes keletuǵınlıǵın kóremiz.

Eger dáslep molekula dipollik momentke iye bolmaǵan bolsa (polyar emes molekula), onda sırtqı elektr maydanınıń tásirinde ondaǵı zaryadlar awısadı hám molekula $\mathbf{p}$ dipollik momentine iye boladı. Bunday jaǵdayda da momentlerdiń qosındısı maydannıń kernewligine proporcional dep esaplawǵa boladı. Qattı emes (bekkem emes) polyar molekula bolǵan jaǵdayda $\sum \mathbf{p}$ shaması eki sebepten baylanıslı ósedı: molekulalardıń momenti $\mathbf{p}$ nıń úlkeyiwine hám olardıń baǵıtlarınıń (orientaciylarınıń) ózgeriwine baylanıslı. Biraq, bul jaǵdayda da qosındı momenti $\sum \mathbf{p}$ maydannıń kernewligi E ge proporcional ósedı. Solay etip, (2)-qatnas qálegen tiptegi molekula ushın orınlı boladı.

Eger bir tekli dielektrik elektr maydanında turǵan bolsa, onda jetkilikli dárejede kóp sanlı molekulaǵa iye qálegen ΔV elementi neytral bolıp qala beredi. Joqarıda kórip ótkenimizdey, dielektriktiń betiniń juqa qabatında bunday jaǵday orın almaydı. Kernewlik sıızqları kiretuǵın shegaradaǵı molekulalardıń burılıwınıń saldarınan molekulalardıń teris zaryadlangan ushlarınń artıqmashlıǵı, al kernewlik sıızqları shıǵatuǵın shegaradaǵı molekulalardıń burılıwınıń saldarınan molekulalardıń oń zaryadlangan ushlarınń artıqmashlıǵı payda boladı (139-paragraf).

Nátiyjede polyarizaciyalanǵan dielektriktiń betinde bazı bir σ' tıǵızlıqqa iye bolǵan zaryadlar payda boladı.



54-súwret.

Bir tekli emes dielektrikti
polyarizaciyalanǵanda kólemlik zaryadlardıń
payda bolıwı.

Dielektrik bir tekli bolmaǵan jaǵdayda usı dielektriktiń ishinde kólemlik ρ' zaryadı da payda

boladı. Mısalı, elektr maydanında jaylasqan bir tekli emes dielektrikti qarayıq. Meyli, dielektriktiń bóleksheleriniń koncentracıyası shep tárepten oń tárepke qaray ósetuǵın bolsın (54-súwret) hám maydannıń kernewligi de usı tárepke qarap baǵıtlangan bolsın. Oyımızda usı dielektrikte aa' hám bb' betleri tárepinen sheklengen qatlamdı ayırıp alamız. Boljaw boyınsha qatlamnıń aa' betiniń bir birligindegi bólekshelerdiń sanı bb' betiniń bir birligindegi bólekshelerdiń sanınan kishi. Demek, aa' beti bb' betine salıstırǵanda kem sandaǵı molekulalardı kesedi. Hár bir molekula maydangá qaray burılǵan dipol bolıp tabılatuǵın bolǵanlıqtan, aa' betiniń shep bólimi arqalı qatlamnıń ishine kiretuǵın molekulalardıń oń zaryadlangan ushlarınń sanı bb' beti arqalı qatlamnan shıǵatuǵın molekulalardıń oń zaryadlangan ushlarınń sanınan kem boladı. Solay etip, $aa'bb'$ qatlamnıń ishinde oń zaryadlardıń kemligi orın aladı hám, sonlıqtan qatlam teris zaryadlangan boladı.

Sırtqı elektr maydannıń tásirinde molekulalardıń baǵıtlarınıń ózgeriwi menen dielektriktiń mexanikalıq qásiyetleri de ózgeredi. Dielektrik polarizacıyalanganda onda serpimli kernewler payda boladı hám onıń kólemi menen forması ózgeriske ushıraydı. Bul qubılıs *elektrostrikciya* dep ataladı. Usınıń menen birge dielektriklerdiń betlerinde qosımsha mexanikalıq keriw kúshleri de payda boladı.

Dielektriktiń polarizacıyasında payda bolatuǵın betlik hám kólemlik zaryadlar *baylanısqan zaryadlar* dep ataydı. Basqa barlıq zaryadlar (polarizaciya menen baylanıslı bolmaǵan) *erkin zaryadlar* dep ataladı.

Polarizaciya vektorı menen dielektriktiń shegarasında shıǵıp turatuǵın zaryadlardıń betlik tıǵızlıǵınıń arasında ápiwayı baylanıs bar. Biz onı ápiwayı hám dara jaǵday ushın tabamız. Bir tekli dielektrikten kesip alınǵan úlken tegis-parallel plastinkanı bir tekli elektr maydanına qoyamız. Bunday jaǵdayda dielektriktiń ishindegi $\mathbf{E}$ maydanı menen polarizaciya vektorı $\mathbf{P}$ da [(2)-formula] turaqlı boladı. Oyımızda bul plastinkadan cilindr tárizli ΔV kólemin onıń payda etiwshileri plastinkadaǵı maydannıń kernewligi $\mathbf{E}$ ge parallel etip ayırıp alamız (55-súwretke qarańız, bul súwrette plastinkanıń betine túsirilgen normal $\mathbf{n}$ arqalı belgilengen). Dielektrikti polarizacıyalaǵanda plastinkanıń betlerinde betlik tıǵızlıqları $+\sigma'$ hám $-\sigma'$ shamalarına teń zaryadlar payda boladı. Biz qarap atırǵan jaǵdayda (aldın-ala zaryadlanbaǵan bir tekli dielektrik) ΔV kóleminiń ishinde zaryadlar payda bolmaytuǵın bolǵanlıqtan, makroskopiyalıq kóz-qarastan ΔV kóleminiń magnit momenti cilindrdiń tek S ultanlarındaǵı betlik zaryadlardıń bar bolıwınıń sebebinen bar boladı. Bul zaryadlardıń muǵdarı sáykes $+\sigma'S$ hám $-\sigma'S$ shamalarına teń. Olardıń arasındaǵı qashıqlıq cilindrdiń uzunlıǵı L ge teń. Bunnan cilindrdiń elektr momenti $\sigma'SL$ shamasına teń. Biraq, ekinshi tárepten, barlıq cilindrdiń momenti cilindrdiń ishinde jaylasqan barlıq molekulalardıń momentleriniń vektorlarınń qosındısınıń san mánisine teń. Bunnan

$$|\sum \mathbf{p}| = \sigma'SL.$$

Cilindrdiń sheklerindegi polarizacıyanıń san mánisi $\mathbf{P}$ qosındı moment $|\sum \mathbf{p}|$ nıń kólem ΔV ǵa qatnasına teń:

$$P = \frac{|\sum \mathbf{p}|}{\Delta V} = \frac{\sigma'SL}{\Delta V}.$$

Cilindrdiń kólemi

$$\Delta V = SL \cos \alpha.$$

Bul ańlatpada α arqalı S cilindrdiń ultanı menen onıń jasawshısı L diń arasındaǵı múyesh belgilengen. ΔV nıń mánisin P ushın jazılǵan ańlatpaǵa qoyıp,

$$P = \frac{\sigma'}{\cos \alpha}$$

hám bunnan

$$\sigma' = P \cdot \cos \alpha.$$

ańlatpasına iye bolamız. Cilindr di jasawshısı L diń baǵıtı maydannıń kernewligi $\mathbf{E}$ niń baǵıtına sáykes

keletuǵınlıǵın kelisip aldıq, $\mathbf{E}$ menen polarizaciya vektorı $\mathbf{P}$ baǵıtlas bolǵanlıqtan

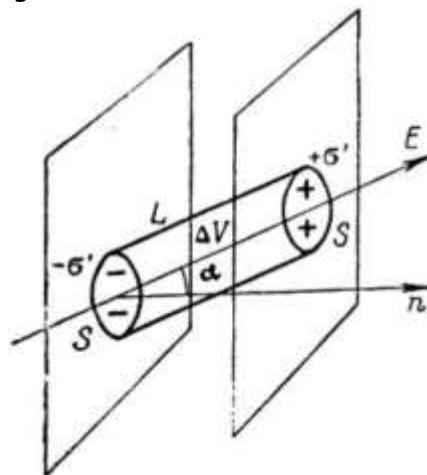
$$P \cos \alpha = P_n$$

teńligine iye bolamız. Bul teńlikte P_n arqalı zaryadlar shıǵıp turatuǵın betke túsirilgen normaldıń baǵıtına túsirilgen polarizaciya vektorınıń proekciyası belgilengen. Demek, bul proekciyanıń mánisi

$$\sigma' = P_n \quad (3)$$

shamasına, yaǵnıy *betlik baylanısqa zaryadlardıń tıǵızlıǵına teń*.

55-súwret.
Polarizaciya vektorı $\mathbf{P}$ nıń mánisin
anıqlawǵa.



Bul juwmaq bizge áhmiyetli bolǵan nátiyjege keliwge múmkinshilik beredi. (2)-formula boyınsha polarizaciya vektorı $\mathbf{P}$ maydannıń kernewligi $\mathbf{E}$ ge proporcional. Bunnan, (3)-ańlatpa boyınsha betlik zaryadlardıń tıǵızlıǵı σ' tıń maydannıń kernewliginiń normal qurawshısı E_n ge proporcional ekenligi kelip shıǵadı:

$$\sigma' = \kappa E_n. \quad (4)$$

Bul nátiyje 139-paragrafta dara jaǵday ushın alınǵan (3)-qatnasqa sáykes keledi. Solay etip, (2)-formuladaǵı κ koefficienti haqıyqatında da 139-paragrafta kirgizilgen polarizaciya koefficientine sáykes keledi eken.

Al kólemlik baylanısqa zaryadlarǵa keletuǵın bolsaq, onda, joqarıda aytııp ótilgenindey, olardıń dielektrikte bir tekli bolmaǵan orınlardıń bar bolıwınıń sebebinen payda bolatuǵınlıǵın, sonıń menen birge erkin zaryadlar bar orınlarda payda bolatuǵınlıǵın kóremiz. Baylanısqa zaryadlardıń kólemlik tıǵızlıǵı ρ' tıń keri belgi menen alınǵan polarizaciya vektorı $\mathbf{P}$ nıń divergenciyası menen anıqlanatuǵınlıǵın kórsetiwge boladı:

$$\rho' = -\text{div } \mathbf{P}. \quad (5)$$

(3)- hám (5)-formulalar dielektriktiń polarizaciyasınıń nátiyjesinde payda bolatuǵın betlik hám kólemlik zaryadlardı tabıwǵa múmkinshilik beredi.

§ 142. Dielektriktegi maydannıń kernewligi. Boslıqtaǵı elektrostatikalıq qubılıslardı qaraǵanıımızda zaryadlardı bizler barlıq waqıtta da jetkilikli dárejede kóp sanlı molekulalarǵa iye bolǵan deneniń hár bir elementar kólemindegi elektronlardıń jetkiliksizligi yamasa artıqmashlıǵınıń saldarınan payda boladı dep boljadıq.

Usınday áwlad zaryadlardı bizler *erkin* zaryadlar dep atadıq. Bunnan aldırǵı paragrafta bizler dielektriklerdiń polarizaciyasında molekulalardıń turaqlı dipollik momentleriniń burılıwınıń yamasa molekulalarda indukciyalanǵan momentlerdiń payda bolıwınıń sebebinen de basqa zaryadlardıń payda bolatuǵınlıǵın kórdik. Bul jaǵdayda hár bir molekula neytral bolıp qala beredi. Bunday zaryadlardı biz *baylanısqa zaryadlar* dep atadıq. Baylanısqa zaryadlar tek dielektrikte elektr maydanı bar bolǵan jaǵdayda payda boladı⁷. Solay etip, erkin zaryadlar maydannıń eń

⁷ Maydannıń tásiiri joǵalǵannan keyin de baylanısqa zaryadlardıń saqlanıwı haqqında tómende gáp

birinshi deregi bolıp qala beredi.

Biraq, *dielektriktiń bir bólegindegi erkin zaryadlar payda etken maydanniń ústine baylanısqan zaryadlar payda etken qosımsha maydan qosıladı*. Bul qosımsha maydan dielektriktiń ishinde de, ulıwma aytqanda onnan sırtta da nolge teń emes. Maydanniń qosındı kernewligi $\mathbf{E}$ ni tabıw ushın erkin zaryadlardıń maydanınıń kernewligi $\mathbf{E}_0$ menen baylanısqan zaryadlardıń payda etken maydanınıń kernewligi $\mathbf{E}'$ tı qosıw kerek:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}'. \quad (1)$$

(1)-teńlikke sáykes, payda bolatuǵın erkin zaryadlar ańsat tabılatuǵın dara jaǵday ushın maydanniń kernewligin anıqlaymız. Usınıń menen birge erkin zaryadlardı ózgerissiz qaladı dep esaplaymız.

1. Zaryadlangan ótkiziwshi shardı qorshap turǵan bir tekli dielektrik. Radiusı R ge teń bolǵan zaryadlangan ótkizgish shar sheksizlikke shekem ketetuǵın bir tekli dielektrikke túsirilgen dep boljaymız. Meyli, shardıń zaryadı Q ǵa teń bolsın. Joqarıda kórgenimizdey (128-paragraf, 3-punkt), ótkizgish zaryadlangan shar keńisliktiń sırtqı bóliminde Q zaryadı onıń orayında toplanǵan jaǵdaydaǵıday maydandı payda etedi.

Demek, shardıń orayınan r qashıqlıǵında turǵan A noqatındaǵı maydanniń kernewligi mınaǵan teń:

$$E_0 = \frac{Q}{r^2}.$$

Shardıń ishinde maydanniń kernewligi nolge teń. Maydanniń tásirinde dielektrik polarizaciyalanadı hám onıń shardıń betine tiyip turǵan betinde belgisi Q zaryadınıń belgisine qarama-qarsı bolǵan Q' baylanısqan zaryadları payda boladı:

$$-\sigma' = -\kappa E_R.$$

Bul teńlikte E_R - dielektriktiń ishindegi shardıń betiniń qasındaǵı maydan (56-súwret). Shardıń beti $4\pi R^2$ qa teń bolǵanlıqtan,

$$Q' = -\sigma' \cdot 4\pi R^2 = -4\pi R^2 \kappa E_R.$$

Bul zaryad zaryadlangan shar menen koncentrlık bolǵan sferanıń betinde jaylasqan. Sonlıqlan ol A noqatında mınaday qosımsha maydandı payda etedi:

$$E' = \frac{Q'}{r^2} = -\frac{4\pi R^2 \kappa E_R}{r^2}.$$

Bunnan, A noqatındaǵı maydanniń kernewligi mınaǵan teń boladı:

$$E = E_0 + E' = \frac{Q}{r^2} - \frac{4\pi R^2 \kappa E_R}{r^2}. \quad (2)$$

Zaryadlangan ótkizgish shardıń hám bir tekli dielektriktegi teń ólshewli zaryadlangan sharlıq bettiń maydanınıń kernewligi shardıń orayınan qashıqlıqtıń kvadratına kerı proporcional kemeyetuǵın bolǵanlıqtan

$$\frac{E_R}{E} = \frac{r^2}{R^2}$$

hám bunnan

$$E_R = \frac{r^2}{R^2} E$$

teńligine iye bolamız. E_R dıń mánisin (2) ge qoyıp

$$E = \frac{Q}{r^2} - 4\pi \kappa E$$

yamasa

$$E = \frac{Q}{(1 + 4\pi \kappa) r^2}$$

teńligine iye bolamız. Bunnan $1 + 4\pi \kappa = \varepsilon$ teńliginiń orınlı ekenligin esapqa alıp, shardıń radiusı

etiledi.

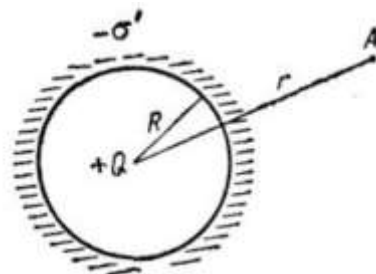
R den gárezsiz bolǵan

$$E = \frac{Q}{\varepsilon r^2} = \frac{E_0}{\varepsilon} \quad (3)$$

teńligine iye bolamız. Solay etip, bul jaǵdayda da, dielektriktegi maydannıń kernewligi E erkin zaryadlar payda etken maydannıń kernewligi E_0 den ε ese kishi boladı eken.

56-súwret.

Zaryadlangan shardıń maydanına dielektriktiń tási.



2. Joqarıda biz kondensatordıń astarlarınıń arasına tegis dielektrik qatlam qoyılǵan jaǵdayda qarastırǵan edik (137-paragrafqa qarańız). Sonda, sol jaǵdayda da dielektriktiń erkin zaryadlar ózgermegen jaǵdayda kernewligi ε ese kemeytetuǵınlıǵı kórsetilgen edi:

$$E = \frac{E_0}{\varepsilon}.$$

Qaralǵan eki jaǵdayda da bir tekli dielektrik maydan nolge teń bolmaǵan barlıq keńislikti toltırıp turadı. Bunday jaǵdayda maydannıń kernewligi ε ese kemeyedi. Bul nátiye ulıwmalıq xarakterge iye boladı eken: *bir tekli bolǵan dielektrik maydan nolge teń bolmaǵan barlıq keńislikti iyelep turatuǵın jaǵdayda biz qarap atırǵan erkin zaryadlardıń boslıqta payda etetuǵın maydanınıń kernewligi sol dielektriktiń ishindegi maydannıń kernewliginen ε ese úlken*. Bul jaǵdayda $E = \frac{1}{\varepsilon} E_0$ teńligi orınlanatuǵın bolǵanlıqtan (1)-formulaǵa kiretuǵın barlıq úsh $\mathbf{E}$, $\mathbf{E}_0$, $\mathbf{E}'$ vektor bir birine parallel, sonıń menen birge $\varepsilon = 1 + 4\pi\chi$ qatnasınıń hám 141-paragraftaǵı (2)-formulaǵa sáykes

$$\mathbf{E}' = \mathbf{E} - \mathbf{E}_0 = -4\pi\mathbf{P}. \quad (4)$$

Bunnan aldırǵı nátiyjeler bir tekli emes dielektrikler hám dielektrik (bir tekli bolsa da) maydan iyelep turǵan keńislikti tolıq emes toltırıp turǵan jaǵdaylar ushın durıs emes (mısalı, maydangá kirgizilgen bir tekli dielektriktiń ayırım bólekleri)⁸. Bunday jaǵdaylardaǵı maydannıń kernewligin anıqlaw ushın hár bir berilgen jaǵdaydaǵı baylanısqa zaryadlardıń payda bolıwın esapqa alıw, olardıń maydanlarınıń esaplaw hám olardı erkin zaryadlar payda etken maydangá qosıw kerek. Mısalı, qasında D dielektriginiń sozılǵan bólegi bar $+q$ noqatlıq zaryadın qaraymız (57-súwret). $+q$ zaryadınıń maydanınıń tásirinde dielektriktiń ushlarında baylanısqa q_1 hám q_2 zaryadları payda boladı. Dielektriktiń bóleginiń barlıǵı da belgili p momentine iye bolǵan dipolge aylanadı. Bizlerdiń joqarıda kórgenimizdey (125-paragraf), dipol maydandı payda etedi. Bul maydannıń kernewlik sızıqları onıń oń ushınan shıǵadı hám teris ushına kiredi. $+q$ zaryadı menen bir tuwrınıń boyında jaylasqa A_1 , A_2 hám A_3 noqatların qaraymız. Bunday jaǵdayda A_2 hám A_3 noqatları tárepinen payda etilgen maydannıń kernewligi E' tıń baǵıtı E_0 kernewliginiń baǵıtı menen baǵıtlas, al A_1 noqatında qarama-qarsı baǵıtqa iye. A_1 noqatındaǵı maydannıń $E = E_0 + E'$ qosındı kernewligi $+q$ zaryadınıń maydanınıń kernewliginen kishi, al A_2 hám A_3 noqatlarında

⁸ Simmetriyanıń joqarı dárejesiniń orın alıwına baylanıslı bul qaǵıydaǵa boysınbaytuǵın jaǵdaylar da bar. Mısalı, basqa bir tekli sheksiz dielektrikke túsirilgen teń ólshewli zaryadlangan bir dielektrik sharda zaryadlangan shardıń sırtında maydannıń kernewligi ε ese kemeyedi (onıń ishinde kernewlik ózgermeydi). Tap sol sıyaqlı, hár kıylı dielektriklerdiń parallel qatlamları toltırılǵan (sáykes koncentrik) tegis (yamasa sferalıq) kondensator bolǵan jaǵdayda hár bir qatlamdaǵı maydannıń kernewligi $E_k = \frac{1}{\varepsilon_k} E_0$ shamasına teń boladı.

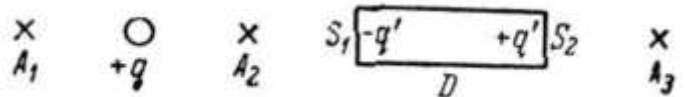
bosa - úlken. Joqarida esletilip ótilgen tuwrınıń boyındaǵı noqattı alatuǵın bolsaq, onda bul noqatta E_0 hám E' lar parallel emes.

Solay etip, bul misal ulıwma jaǵdayda erkin zaryadlardıń maydanınıń kernewligi E_0 menen baylanısqa zaryadlardıń maydanınıń kernewligi E' tıń arasında ápiwayı túrdegi qatnastıń joq ekenligin kórsetedi.

§ 143. Dielektrikler bolǵan jaǵdaydaǵı zaryadlangan denelerge tásir etetuǵın kúshler.

Dielektrikke kirgizilgen zaryadlangan denelerdiń arasındaǵı tásir etetuǵın kúshlerdi tek erkin hám baylanısqa zaryadlardıń arasındaǵı tásir etetuǵın kúshler arqalı túsindiriwge bolmaydı. Bul jaǵdaydı kórsetiw ushın bir tekli dielektrikke kirgizilgen (mısalı, qanday da bir dielektrik suyıqlıqqa túsirilgen) bir birine parallel hám hár qıylı belgige iye zaryad penen zaryadlangan plastinkanı qaraymız. Eger plastinkalar ózleriniń ólshemlerine salıstırǵanda kishi qashıqlıqlarda jaylasqa bolsa, onda olar tárepinen payda etilgen maydan tek plastinkalardıń arasındaǵı keńislikte boladı. Sonlıqtan, plastinkalardıń arasındaǵı dielektriktiń bólimi ǵana polarizaciyalanadı. Dielektriktiń usı bóliminiń polarizaciyasınıń nátiyjesinde plastinkaǵa tiyip turǵan dielektriktiń betinde betlik tıǵızlıǵı $\pm\sigma'$ shamalarına teń bolǵan baylanısqa betlik zaryadlar payda boladı. Bul zaryadlar bir birine parallel bolǵan eki zaryadlangan betke ekvivalent hám, usıǵan sáykes plastinkalardıń arasındaǵı dielektriktiń qatlamınıń ishindegi maydandı ǵana ózǵertedi hám plastinkaǵa hesh qanday tásir etpeydi. Solay etip, bul jaǵdayda dielektriktiń polarizaciyası plastinkalardıń arasındaǵı óz-ara tásir etisiw kúshin ózǵerte almaydı degen juwmaqqa kelemiz (eger plastinkalardaǵı zaryadlar ózgerissiz qalatuǵın bolsa); óz-ara tásirlesiw kúshleri boslıqtaǵıday bolıp qala beredi. Haqıyqatında bolsa is basqasha: tájiriybeler eger ózleriniń ólshemlerine salıstırǵanda kishi qashıqlıqta jaylasqa parallel zaryadlangan plastinkalardı dielektrik suyıqlıqqa batırsaq, onda zaryadlardıń muǵdarı ózgermey qalatuǵın jaǵdayda olar arasındaǵı tásirlesiw kúshiniń shaması ε ese kemeyetuǵınlıǵın kórsetedi (ε arqalı alınǵan suyıqlıqtıń dielektriklik turaqlısı belgilengen). Eger keńislikti qanday da bir dielektrik gaz benen toltırǵanda da tap usınday jaǵdayǵa iye bolamız. Qattı dielektrik penen bolsa, bunday tájiriybeni is júzinde ámelge asırıw dim qıyın.

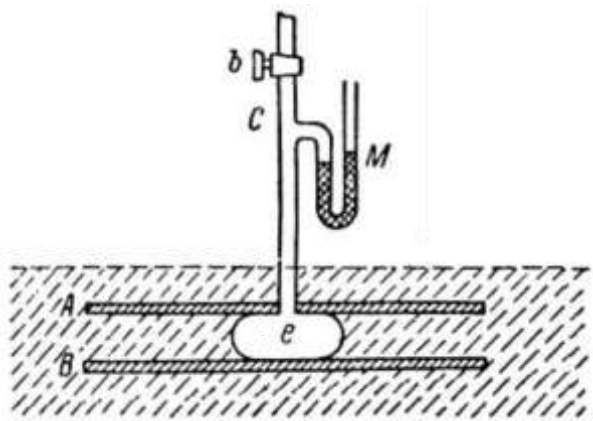
57-súwret.
 $+q$ zaryadınıń qasındaǵı
 D dielektriginiń bólegi.



Baylanısqa zaryadlardıń payda bolıwı menen túsindiriwdiń sáti túspeytuǵın plastinkalardıń arasındaǵı óz-ara tásirlesiw kúshleriniń kórsetilgendey ózgerisi polarizaciyalanǵan dielektrikte payda bolatuǵın mexanikalıq kernewlerdiń nátiyjesi bolıp tabıladı.

Eger plastinkalar qarama-qarsı belgige iye zaryadlar menen zaryadlangan bolsa (plastinkalardıń arasında tartısw kúshleri tásir etedi), onda suyıq yamasa gaz tárizli dielektrik plastinkalardıń arasına tartıladı hám plastinkalardı bir birinen sırtqa qaray ısıratuǵın qosımsha kúshlerdi payda etedi. Bunıń nátiyjesinde olardıń arasındaǵı tartılıs kúshleriniń bir bólimi kompensaciyalanadı hám, usıǵan sáykes, boslıqtaǵı salıstırǵanda kishi boladı. Plastinkalardıń arasındaǵı dielektriklik ortadaǵı qosımsha basımınıń bar bolıwın tuwrıdan-tuwrı ótkerilgen tájiriybede tekserip kóriwge boladı. Gorizont baǵıtındaǵı eki A hám B plastinkalar bir tekli suyıq dielektrikke túsiriledi (58-súwret, bul súwrette dielektrik penen iyelengen oblast shtrixlangan). Joqarǵı A plastinkasına M monometrine iye vertikal baǵıttaǵı C nayı jabıstırılǵan. C nayınıń joqarǵı ushı tárepinen A hám B plastinalarınıń arasında e kóbiginıń payda bolıwı ushın úrlenedi; bunnan keyin b kranı jabıladı. Eger, endi A hám B plastinaların hár qıylı belgige iye zaryadlar menen zaryadlasa, onda M monometriniń oń tárepindegi suyıqlıqtıń qáddi e hawa kóbigindegi basımınıń úlkeyiwiniń saldarınan kóteriledi. Bul dielektriklik suyıqlıqtıń plastinalardıń arasındaǵı keńislikke tartılıwınıń saldarınan júzege keledi. Eger A hám B plastinkaların birdey belgige iye zaryadlar

menen zaryadlasa, onda e kóbigindegi basım kemeyedi, sebebi bul jaǵdayda suyıqlıq plastinalardıń arasındaǵı keńislikten sırtqı iyterilip shıǵarıladı. Eger dielektrik suyıqlıqtıń dipollik molekulalardan turatuǵınlıǵın qabıl etsek, onda onıń aǵıwın ańsat túsindiriwge boladı. 135-paragrafta kórsetilgendey, bir tekli bolmaǵan maydanda dopoldı maydannıń kernewligi úlken bolǵan oblastqa qaray ısıratuǵın kúsh payda boladı.



58-súwret.
Qosımsha basımdı esaplawǵa.

Zaryadlangan plastinalardı dielektrikke batırǵanda olardıń arasındaǵı óz-ara tásirlesiw kúshiniń ε ese ózgeretuǵınlıǵın energiyalıq esaplawlarda da tastıyıqlawǵa boladı. 140-paragrafta biz dielektrik bar bolǵan jaǵdayda tegis kondensatordıń energiyasınıń

$$W = \frac{\varepsilon E^2}{8\pi} Sd$$

shamasına teń bolatuǵınlıǵın kórsettik (S - kondensatordıń plastinkasınıń betiniń maydanı, d - plastinalar arasındaǵı qashıqlıq, E - plastinalar arasındaǵı maydannıń kernewligi). Qatań túrde aytqanda bul formula juwıq hám dál emes, eger plastinalardıń arasındaǵı qashıqlıq olardıń sızıqlı ólshemlerinen kishi bolǵanda formula dál nátiyjelerdi beredi. Plastinalardıń betindegi Q zaryadı menen maydannıń kernewligi E arasında

$$Q = \frac{\varepsilon}{4\pi} ES$$

túrindegi qatnas orın alǵanlıqtan, energiya ushın ańlatpanı bılayınsha jazıwǵa boladı

$$W = \frac{2\pi Q^2}{\varepsilon S} d.$$

Meyli, óz-ara tartasıw kúshleriniń tásirinde oń plastina (59-súwret) shep táreptegi plastınaǵa qaray kishi Δd kesindisine jılıǵan bolsın. Oń táreptegi plastınaǵa tásir etetuǵın f kúshin turaqlı dep esaplap, usınday jılıwda

$$A = f\Delta d$$

jumısınıń islenetuǵınlıǵın tabamız. Bul jumıs kondensatordıń plastinalarınıń arasındaǵı qashıqlıqtıń Δd shamasına ózgeriwiniń saldarınan kondensatordıń energiyasınıń ózgeriwiniń esabınan islenedi:

$$\Delta W = \frac{2\pi Q^2}{\varepsilon S} d - \frac{2\pi Q^2}{\varepsilon S} (d - \Delta d) = \frac{2\pi Q^2}{\varepsilon S} \Delta d.$$

Jumıstı energiyanıń ózgerisine teńlestirip

$$f = \frac{2\pi Q^2}{\varepsilon S}. \quad (1)$$

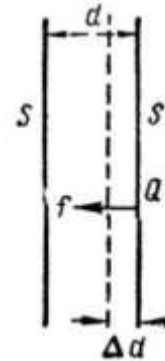
formulasına iye bolamız. Boslıqta oń táreptegi plastınaǵa tásir etetuǵın f_0 kúshi tek shep táreptegi plastina tárepiyen payda etilgen maydannıń kernewliginiń (onıń mánisi plastinkalardıń arasındaǵı tolıq kernewliktiń yarımına teń) oń táreptegi plastinanıń zaryadınıń kóbeymesine teń:

$$f_0 = \frac{E_0}{2} Q = \frac{2\pi Q^2}{2}.$$

Bul ańlatpanı (1)-ańlatpa menen salıstırıp, keńislikti bir tekli dielektrik penen toltırǵanda tájiriýbeniń nátiýjelerine sáykes, plastinalardıń arasındaǵı óz-ara tásirlesiw kúshiniń shaması ε ese kemeyetuǵınlıǵın kóremiz.

59-súwret.

Kondansatordıń plastinalarına tásir etetuǵın kúshlerdi esaplawǵa.



Energiyalıq esaplaw óz-ara tásirlesiwdiń barlıq túrlerin avtomat túrde esapqa aladı hám, sonlıqtan, durıs nátiýjelerdi beredi. Biraq, usınıń menen birge tek erkin hám baylanısqa zaryadlardıń arasındaǵı óz-ara tásirlesiwdi esapqa alıw dielektriktiń iyeleytuǵın ornın tolıq esapqa alǵan joq. Sebebi elektr maydanınıń tásirindegi onıń mexanikalıq qásiyetleriniń ózgeretuǵınlıǵı itibarǵa alınbadı (basım menen tıǵızlıq).

Biz alǵan nátiýjeni ulıwmalastırwǵa boladı. 140-paragraftaǵı maydanniń energiyasınıń tıǵızlıǵı (barlıq izotrop deneler ushın durıs bolǵan) ushın jazılǵan (2)-formuladan paydalanıp, tegis kondensator ushın házir ǵana ótkerilgen esaplawlardan mınaday jaǵday kelip shıǵadı: *maydan nolge teń bolmaǵan keńislikke tolıǵı menen toltırıp turǵan bir tekli dielektrikti batırǵanda denelerdiń arasındaǵı óz-ara tásirlesiw kúshleriniń shaması ε ese kemeyedi.*

Bunnan, bir birinen r qashıqlıǵında jaylasqa eki q_1 hám q_2 noqatlıq zaryadlar bir biri menen

$$f = \frac{q_1 q_2}{\varepsilon r^2} \quad (2)$$

shamasına teń kúsh penen tásir etisedi. Bul formula bir tekli dielektrikke batırılǵan zaryadlar ushın *Kulon nızamın* ańǵartadı: bir tekli sheksiz dielektrikke jaylastırılǵan noqatlıq zaryadlardıń arasındaǵı óz-ara tásirlesiw kúshiniń shaması boslıqta bir birinen tap sonday qashıqlıqta jaylastırılǵan zaryadlardıń arasındaǵı óz-ara tásirlesiw kúshiniń shamasınan ε ese kishi boladı. Eger dielektrik bir tekli bolmasa yamasa ólshepleri shekli bolsa, onda (2)-formula durıs nátiýjeni bermeydi. Eger bir tekli dielektriktiń shegarası oǵan batırılǵan zaryadlardan jetkilikli dárejede qashıqlatılǵan bolsa, onda bul formula juwıq túrde durıs boladı.

Bir tekli bolmaǵan hám ólshepleri shekli bolǵan dielektrikler bolǵan ulıwmalıq jaǵdayda olardıń zaryadlardıń arasındaǵı óz-ara tásirlesiw kúshlerine tiygizetuǵın tásirlerin ápiwayı qatnaslardıń járdeminde esapqa alıwǵa bolmaydı. Bul jaǵday 143-paragraftıń basındaǵı mısalda atap ótildi. Dielektriktiń bir tekli bolmawı kúshtiń táhiri anıqlanıp atırǵan zaryadlangan deneniń óziniń bir tekli hám sheksiz bolǵan dielektriktiń ishindegi quwıslıqta jaylastırılǵanlıǵı menen baylanıslı bolıwı múmkin. Quwıslıqtıń bar bolıwı kerilgen dielektrik tárepinen tásir etetuǵın kúshtiń táhiri esapqa alınbaydı hám tek baylanısqa zaryadlar ǵana áhmiyetke iye boladı. Bul jaǵdayda zaryadlangan denegge tásir etetuǵın kúshlerdiń shaması dene ornalastırılǵan quwıslıqtıń formasınan ǵárezli boladı (145-paragrafqqa qarańız).

(2)-formula menen boslıqta jaylasqa noqatlıq zaryadlar ushın jazılǵan Kulon nızamınıń arasında principiallıq ayırmanıń bar ekenligin ańǵarıw kerek. Eger noqatlıq zaryad degende zaryadtıń ózi ólshepleri sol noqatlardıń arasındaǵı qashıqlıqtan kishi bolǵan makroskopiyalıq denelerde toplanǵan jaǵdayda ǵana eki formula da bir birine uqsas mániske iye boladı. Biraq, boslıqtaǵı Kulon nızamın basqasha túsindiriwge boladı. Atap aytqanda bul nızam shekli bolǵan q_i hám q_k zaryadların oyımızda sheksiz kishi bolǵan dq_i

hám dq_k elementar zaryadlarına bólip, olardıń arasındaǵı df óz-ara tásir etisiw kúshin ańǵartadı dep esaplap differenciallıq túrde túsindiriw múmkin. Bunday jaǵdayda shekli bolǵan q_i hám q_k zaryadlarınıń arasındaǵı óz-ara tásirlesiw kúshleri barlıq dq_i hám dq_k zaryadlarınıń jupları arasındaǵı df tásir etisiw kúshlerine tarqaladı. Bunday differenciallıq túrde (2)-formulanı paydalanıwǵa bolmaydı: joqarıda kórǵenimizdey, dielektrikler bar bolǵan jaǵdayda berilgen dq_i hám dq_k jubına tásir etetuǵın kúshler bir qatar sebeplerge baylanıslı payda boladı.

Sońǵı paragraflardı juwmaqlap, biz mınalargá iye boldıq: maydanı nolge teń bolmaǵan keńislikti tolıǵı menen toltırıp turǵan bir tekli dielektrikte maydannıń kernewligi E usı kólemde dielektrik joq bolǵan waqıtta erkin zaryadlar payda etken E_0 kernewliginen ε ese kishi. Tap sol sıyaqlı maydan nolge teń bolmaǵan keńislikti bir tekli dielektrik penen toltırǵanda zaryadlangan denelerdiń arasındaǵı óz-ara tásirlesiw kúshleri de ε ese kemeyedi. Demek, boslıqtaǵı sıyaqlı, bul jaǵdayda da q zaryadına tásir etetuǵın f kúshi $f = qE$ teńliginiń járdeminde anıqlanadı.

Biraq, bul teńlik iqtıyarlı dielektrik bolǵan jaǵdayda durıs emes. Másele sonnan ibarat, dielektrikke batırılǵan q zaryadınıń ózi qanday da bir basqa denede jıynalǵan (mısalı, ótkizgishte) hám oǵan dielektriktiń ishindegi deneniń qasındaǵı maydannan ózgeshe bolǵan maydan tásir etedi. Biz bul jaǵdayda bir birine parallel bolǵan eki zaryadlangan plastinalardıń mısasında kórdik. Bunday jaǵdayda zaryadlar jaylasqan orındaǵı maydan plastinaniń betiniń qasındaǵı dielektriktegi maydan menen birdey emes. Usınıń menen birge, tap sol mısalda zaryadlar turǵan orındaǵı maydannıń kernewligin anıqlasaq, onda kúshtiń durıs mánisin ala almaymız. Bul biziń dielektrik tárepinen denegé tásir etetuǵın qosımsha mexanikalıq kúshlerdi esapqa almawımızdıń sebebinen kelip shıǵadı. Bunday kúshler dielektrikte maydan bir tekli bolmaytuǵın orınlarda hám, sonıń menen birge, dielektriktiń ózi bir tekli bolmaǵan orınlarda payda boladı (sonıń ishinde zaryadlangan dene menen dielektriktiń arasındaǵı shegarada).

Tek ǵana dielektriktegi maydannıń kernewligi hám zaryadqa tásir etetuǵın kúshtiń shaması dielektrik bolmaǵan jaǵdaydaǵı maydannıń kernewligi menen zaryadqa tásir etetuǵın kúshtiń shamasına salıstırǵanda birdey ese (ε ese) kishi bolǵan jaǵdayda (yaǵnıy maydan nolge teń bolmaǵan keńisliktiń barlıǵın tolıǵı menen toltırıp turatuǵın bir tekli dielektrik bolǵan jaǵdayda) $f = qE$ formulası durıs hám f kúshiniń mánisi boyınsha *dielektriktegi* E kernewligin anıqlawǵa boladı.

Joqarıda ayılǵan jaǵdaylardan *eger zaryad qanday da bir denede toplanǵan bolsa, onda usı zaryadqa tásir etetuǵın kúshten dielektriktegi maydannıń kernewligi E ni anıqlawdıń múmkin emes ekenligi kelip shıǵadı*. Kerisinshe: ulıwma aytqanda dielektriktegi maydannıń kernewligi E zaryadlangan denelerge tásir etetuǵın kúshti anıqlamaydı.

E vektorınıń fizikalıq mánisi haqqında tolıǵıraq 145-paragrafta ayıladı.

Elektrostatikanıń bir qatar máselelerinde tásir etetuǵın kúshlerdi esaplaw mınaday kóz-qaraslardıń tiykarında esaplawǵa boladı: Zaryadlangan denelerdiń izolyaciyalangan sistemasındaǵı elektrostatikalıq maydannıń energiyası sistemadaǵı denelerdiń jaylasıwın táriyipleytuǵın bir qatar parametrlerdiń funkciyası dep boljaymız. Bunday parametrlerdiń qatarına, mısalı, deneler sistemasınıń noqatlarınıń koordinataları yamasa denelerdiń arasındaǵı qashıqlıqlar, sterjenlerdiń, sabaqlardıń h.t.b. iyelegen ornın anıqlaytuǵın múyeshler kiredi.

Bunday parametrlerdi ulıwmalasqan koordinatalar dep ataymız hám olardı $x_1, x_2, \dots, x_n$ háripleri menen belgileybiz.

Solay etip, sistemanıń energiyası W ushın

$$W = W(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

ǵárezligine iye bolamız. Parametrlerdiń biri bolǵan x_i shaması Δx_i shamasına óskende elektrostatikalıq kúshler tárepinen Δx_i shamasına proporcional bolǵan jumıs islenedi hám onı

$$\Delta A_i = f_i \Delta x_i$$

túrinde jaza alamız. Bul ańlatpaǵa kiretuǵın f_i shamasın ulıwmalastırılǵan kúsh dep ataymız.

Jumıs x_i parametriniń ózgeriwine baylanıslı elektrostatikalıq maydannıń energiyasınıń kemeyiwiniń esabınan islenedi. Solay etip,

$$\Delta A_i = f_i \Delta x_i = -\Delta W$$

teńligine iye bolamız hám bunnan ulıwmalasqan kúsh ushın

$$f_i = -\frac{\Delta W}{\Delta x_i}$$

ańlatpasın alamız. Δx_i shaması nolge umılǵanda $\frac{\Delta W}{\Delta x_i}$ qatnası ulıwmalasırılǵan x_i koordinatası boyınsha alıńǵan dara tuwındını beredi (qalǵan parametrler turaqlı bolıp qaladı), yaǵnıy biz

$$f_i = -\frac{\partial W}{\partial x_i} \quad (3)$$

teńligine iye bolamız.

Sistemanıń energiyası tek ulıwmalasırılǵan koordinatalardıń funkciyası emes, al denelerdiń elektrlik xarakteristikalarınıń da (mısalı, denelerdegi zaryadlardıń yamasa denelerdiń potenciallarınıń) funkciyası bolıp tabıladı. Izolyaciyalanǵan sistemada ayırım denelerdegi zaryadlar ózgerissiz qaladı, al usınıń menen birge sistemaǵa kiretuǵın denelerdiń potencialları ózgeredi. Demek, (3)-ańlatpadaǵı *energiya denelerdiń zaryadlarınıń funkciyası* túrinde beriliwi kerek.

Eger mäseleniń shárti boyınsha denelerdiń potencialların turaqlı dep boljasaq, onda denelerdiń zaryadları turaqlı bola almaydı. Onda, denelerdiń sisteması izolyaciyalanǵan bola almaydı hám sistema usı sistemanıń quramına kirmeytuǵın sırtqı deneler menen kontaktta bolıwı kerek. Bul jaǵdayda ulıwmalasırılǵan kúshiti energiyanıń ulıwmalasırılǵan koordinata boyınsha alıńǵan tuwındısı túrinde kórsetiwge boladı. Biraq, bul jaǵdayda energiyanıń ulıwmalasırılǵan koordinatalardıń hám *denelerdiń potenciallarınıń funkciyası* túrinde ańǵartılıwı kerek. Al bul jaǵday ulıwmalasırılǵan kúshiti ańǵartatuǵın tuwındınıń plus belgisi menen alınıwınıń kerek ekenligin kórsetiwge boladı:

$$f_i = \frac{\partial W}{\partial x_i}.$$

Joqarıda keltirilgen pikirlerdi mısalda illyustraciyalaymız. Meyli, tegis kondensatordıń astarlarına tásir etetuǵın kúshiti esaplaw kerek bolsın. Bul jaǵdayda sistemanıń energiyası ushın

$$W = \frac{1}{8\pi} \varepsilon E^2 S d$$

ańlatpasın jazamız. Bul energiya astarlardıń zaryadlarınıń funkciyası yamasa astarlardıń arasındaǵı potenciallardıń ayırması túrinde ańǵartılıwı múmkin:

$$W = \frac{1}{8\pi} \varepsilon \left(\frac{4\pi\sigma}{\varepsilon} \right)^2 S d, \quad (4)$$

$$W = \frac{1}{8\pi} \varepsilon \left(\frac{V_1 - V_2}{d} \right)^2 S d. \quad (5)$$

Berilgen jaǵdayda ulıwmalasırılǵan koordinata xızmetin astarlardıń arasındaǵı qashıqlıq d atqaradı. Kórinip turǵanıday, ulıwmalasırılǵan kúshitiń xızmetin astarǵa tásir etetuǵın kúshitiń ózi atqaradı. Sebebi d qashıqlıǵınıń shaması Δd shamasına ózgergende astarlarǵa tásir etetuǵın kúshler $f \Delta d$ jumısın orınlaydı.

(4)- hám (5) ańlatpaları boyınsha kúshiti esaplaymız. (4)-ańlatpa ushın

$$f = -\frac{\partial W}{\partial d} = -\frac{2\pi\sigma^2}{\varepsilon} S$$

teńligine iye bolamız. Bul ańlatpadaǵı minus belgisi qashıqlıq úlkeygende teris jumıstır islenetuǵınlıǵına sáykes keledi. YAǵnıy astarǵa ekinshi astar tárepinen tartıw kúshi tásir etedi.

(5)-teńlik ushın mınaǵan iye bolamız:

$$f = -\frac{\partial W}{\partial d} = -\frac{1}{8\pi} \varepsilon \left(\frac{V_1 - V_2}{d^2} \right)^2 S = -\frac{2\pi\sigma^2}{\varepsilon} S,$$

yaǵnıy, biz aldırǵı ańlatpa menen birdey bolǵan ańlatpanı alamız [(1)-formula].

§ 144. Elektrostatikalıq indukciya vektori. Boslıqtaǵı elektrostatikalıq maydan menen is alıp barǵanıımızda biz qaraw ushın kernewlik sıızqların kirgizdik. Boslıqtaǵı kernewlik sıızqları sonday qásiyetlerge iye, olar bir zaryadtan ekinshisine úzliksiz sozıladı yamasa sheksizlikke ketedi. Eger tek erkin zaryadlardı esapqa alatuǵın bolsaq, onda dielektriklerdegi jaǵday basqasha boladı. Mısalı, dielektriklerdi ayırıp turǵan shegaralarda baylanısqa betlik zaryadlar payda boladı hám kernewlik sıızqlardıń bir bólegi olarda baslanadı yamasa tamam boladı. Solay etip, kernewlik sıızqları dielektriklerdi ayırıp turǵan shegara arqalı úzliksiz ótpeydi. Usı jaǵdayǵa sáykes, bir tekli bolmaǵan dielektrikler ushın 126-paragrafta berilgen mánistegi Ostrogradskiy-Gauss teoreması da óziniń mánisin joǵaltadı.

Biraq, dielektriktiń ishindegi maydandı táriyiplew ushın sıızqları dielektriklerdiń ishinde de (bir tekli bolǵan hám bir tekli bolmaǵan), olardı ajratıp turǵan shegara arqalı da úzliksiz ótetuǵın jańa **D** vektorın kirgiziwge boladı. Bul vektordı *elektrostatikalıq indukciya vektori* dep ataydı; ol kernewlik vektori **E** menen

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (1)$$

ańlatpası boyınsha baylanısqa. Bul ańlatpada ε arqalı **D** vektorınıń mánisi anıqlanıp atırǵan noqattaǵı dielektriklik turaqlınıń mánisi belgilengen.

D vektori ushın jazılǵan ańlatpanı basqa túrde de beriwge boladı. 139-paragrafta kórsetilgendey, $\varepsilon = 1 + 4\pi\kappa$, bunnan

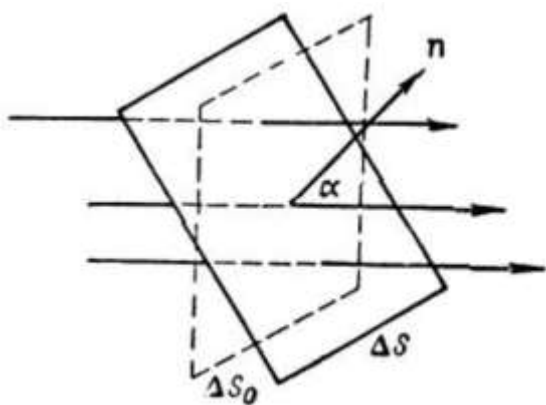
$$\mathbf{D} = (1 + 4\pi\kappa)\mathbf{E} = \mathbf{E} + 4\pi\kappa\mathbf{E}$$

teńligine iye bolamız. Biraq $\kappa\mathbf{E} = \mathbf{P}$ teńligi orınlı bolǵanlıqtan (**P** arqalı polyarizaciya vektori belgilengen)

$$\mathbf{D} = \mathbf{E} + 4\pi\mathbf{P} \quad (1a)$$

ańlatpasın alamız. Demek indukciya vektori maydanniń kernewligi **E** vektori menen 4π ge kóbeytilgen polyarizaciya vektori **P** nıń qosındısına teń eken.

(1)-qatnastan indukciya vektori **D** nıń hám bir noqatta kernewlik vektori **E** menen baǵıtlas ekenligin kórsetedi⁹, biraq san mánisi boyınsha ol kernewlikten ε ese úlken. Boslıqta **E** hám **D** vektorları bir birine sáykes keledi.



60-súwret.

D elektrostatikalıq indukciya sıızqlarına qıya jaylasqa ΔS beti.

Indukciya vektorınıń sıızqların boslıq ushın kernewlik sıızqların qurǵanday etip quradı. *Indukciya vektorınıń sıızǵı dep* hár bir noqatında túsirilgen urınba indukciya vektorınıń baǵıtı menen baǵıtlas bolatuǵın sıızıqqa aytamız. Sıızıqtıń óziniń baǵıtın hár bir noqatta usı noqattaǵı indukciya vektorınıń baǵıtı menen sáykes keledi dep esaplaymız. Ótkerilgen sıızqlardıń sanın

⁹ Kristallarda **D** vektorınıń baǵıtı **E** vektori menen baǵıtlas bolmawı múmkin.

indukciya sızıqlarına perpendikulyar qoyılğan ΔS_0 kishi betti kesip ótetuǵın sızıqlardıń sanı ΔN niń bettiń oblastındaǵı indukciya vektorına teń bolıw talabına baǵındıramız, yaǵnıy basqa sóz benen aytqanda ótkeriletuǵın indukciya sızıqlarınıń sanınıń usı sızıqlar ótetuǵın ΔS_0 betiniń maydanına qatnası indukciya vektorınıń san mánisine teń:

$$\frac{\Delta N}{\Delta S_0} = D. \quad (2)$$

Eger biz ıqtıyarlı túrde baǵıtlanǵan ΔS maydanın kirgizetuǵın bolsaq, onda (60-súwret)

$$\Delta N = D \Delta S_0 = D \Delta S \cos \alpha = D_n \Delta S \quad (3)$$

teńlikleri orınlı boladı. Bul teńliklerde D_n arqalı ΔS maydanına túsirilgen normalǵa túsirilgen indukciya vektorınıń proekciyası belgilengen. ΔN shamasın ΔS maydanı arqalı ótetuǵın indukciya vektorınıń aǵısı dep atawǵa boladı. Shekli ólshemlerge iye bet bolǵan jaǵdayda onı ΔS kishi elementlerine bóliwge hám hár bir element arqalı ótetuǵın aǵıstı hám bunnan keyin indukciya vektorınıń ulıwmalıq aǵısın usınday elementar aǵıslardıń summası túrinde kórsetiwge boladı:

$$N = \sum_s D_n \Delta S. \quad (4)$$

Indukciya vektorınıń sızıqlarınıń úzliksiz ekenligin dálillew ushın dielektriklik turaqlıları ε_1 hám ε_2 shamalarına teń bolǵan dielektriklerdiń eki bir tekli tegis qatlamanıń alamız (61-súwret). Meyli, erkin zaryadlardıń maydanınıń kernewligi E_0 dielektriklerdi bólip turǵan shegara menen bazı bir múyeshti jasaytuǵın bolsın. Ajratıp turatuǵın shegarada baylanısqa betlik zaryadlar payda boladı: birinshi dielektriktegi zaryadlardıń tıǵızlıqları $+\sigma'_1$ hám $-\sigma'_1$, al ekinshi dielektrikte σ'_2 hám $-\sigma'_2$. Birinshi dielektriktegi $+\sigma'_1$ hám $-\sigma'_1$ zaryadları dielektriktiń shegarasına normal baǵıtlanǵan E_{0n} normal qurawshıǵa qarama-qarsı baǵıtlanǵan kernewligi

$$E'_1 = -4\pi\sigma'_1$$

shamasına teń elektr maydanın payda etedi. Bul dielektriktiń sırtında $+\sigma'_1$ hám $-\sigma'_1$ zaryadları maydanniń kernewligin payda etpeydi.

σ'_2 hám $-\sigma'_2$ zaryadları bolsa ekinshi dielektrikte onıń shegarasına normal baǵıtlanǵan

$$E'_2 = -4\pi\sigma'_2$$

kernewligin payda etedi. Baylanısqa zaryadlar payda etken bul qosımsha E'_1 hám E'_2 kernewlikleri dáslepki E_0 kernewliginiń tek normal qurawshısın ǵana ózgeriske ushıratadı hám onıń ajratıp turatuǵın shegaraǵa urınba baǵıttaǵı qurawshısın ózgeretpeydi. Anıqlaması boyınsha, E_0 hám E' kernewlikleriniń qosındısı dielektriktegi maydanniń kernewligin beretuǵın bolǵanlıqtan (142-paragraf), birinshi dielektriktegi maydanniń kernewliginiń normal qurawshısı ushın

$$E_{1n} = E_{0n} - 4\pi\sigma'_1 \quad (5)$$

ańlatpasın, al tangenciallıq qurawshısı ushın

$$E_{1t} = E_{0t} \quad (6)$$

teńligin alamız. Sonıń menen birge ekinshi dielektriktegi maydanniń kernewliginiń qurawshısı ushın

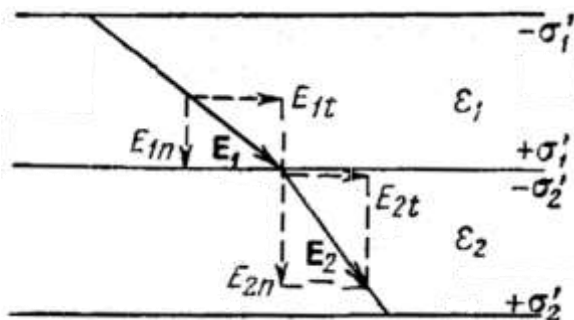
$$E_{2n} = E_{0n} - 4\pi\sigma'_2, \quad (5a)$$

$$E_{2t} = E_{0t} \quad (6a)$$

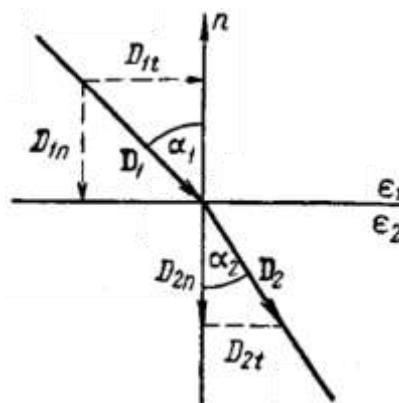
teńliklerin tabamız. (6)- hám (6a)-teńliklerden

$$E_{1t} = E_{2t}, \quad (7)$$

yaǵnıy, maydanniń kernewliginiń tangenciallıq qurawshısı dielektriklerdiń shegarası arqalı ótkende úzliksiz ózgeredi.



61-súwret. Kernewlik vektóri $\mathbf{E}$ ushin shegaralıq shártlerdi keltirip shıǵarıwǵa.



62-súwret. Eki dielektriktiń shegarasındaǵı indukciya sızıqlarınıń sınırı.

Baylanısqan $+\sigma'_1$ hám $-\sigma'_1$ zaryadlarınıń betlik tıǵızlıqları ushın $\sigma'_1 = \kappa_1 E_1 n$ hám $\sigma'_2 = \kappa_2 E_2 n$ teńliklerine iye bolamız. Bul teńliklerde κ_1 hám κ_2 ler arqalı birinshi hám ekinshi dielektriklerdiń polarizaciya koefficientleri belgilengen. Bunnan keyin (5)- hám (5a) teńlikleri

$$(1 + 4\pi\kappa_1)E_{1n} = E_{0n}, (1 + 4\pi\kappa_2)E_{2n} = E_{0n}.$$

túrine iye boladı. $1 + 4\pi\kappa_1 = \varepsilon_1$ hám $1 + 4\pi\kappa_2 = \varepsilon_2$ teńlikleriniń orınlı ekenligin ańǵarıp, eki teńlikten

$$\varepsilon_1 E_{1n} = \varepsilon_2 E_{2n}. \quad (8)$$

teńligin alamız. Solay etip, maydanniń kernewliginiń normal qurawshısı dielektriklerdi ajratıp turatuǵın shegarada úziliske túsedı eken.

(7)- hám (8)-teńlikler $\mathbf{E}$ vektóri ushın shegaralıq shártler bolıp tabıladı. Olardan $\mathbf{E} = \frac{\mathbf{D}}{\varepsilon}$ qatnası tiykarında *elektrostatikalıq indukciya vektóri $\mathbf{D}$ ushin shegaralıq shártlerdi* alamız:

$$\frac{D_{1t}}{\varepsilon_1} = \frac{D_{2t}}{\varepsilon_2}, \quad D_{1n} = D_{2n}. \quad (9)$$

Dielektriklerdi bólip turǵan shegara arqalı ótkende indukciya vektorınıń normal qurawshısı úziliske ushıramaydı, al tangenciallıq qurawshısı bolsa úziliske ushıraydı.

Meyli, birinshi dielektrikte indukciya vektóri $\mathbf{D}_1$ ajratıp turǵan shegaraǵa túsirilgen normal menen α_1 múyeshin, al ekinshi dielektrikte $\mathbf{D}_2$ vektóri α_2 múyeshin jasaytuǵın bolsın. $\mathbf{D}_1$ vektorın D_{1t} hám D_{1n} qurawshılarına, $\mathbf{D}_2$ vektorın D_{2t} hám D_{2n} qurawshılarına jiklep (62-súwret)

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{D_{1t}}{D_{1n}}, \operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{D_{2t}}{D_{2n}},$$

bunnan

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{D_{1t}}{D_{2t}} \cdot \frac{D_{2n}}{D_{1n}}$$

teńliklerine iye bolamız. Sońǵı teńlikten (9)-shegaralıq shártler tiykarında

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}. \quad (10)$$

qatnasın alamız. Bul qatnas *eki dielektriktiń shegarasındaǵı indukciya sızıqlarınıń sınırı nızamın* ańǵartadı.

Indukciya vektóri $\mathbf{D}$ ushın jazılǵan (9)-shegaralıq shártler eki dielektriktiń arasındaǵı shegaranı kesip ótetuǵın indukciya sızıqlarınıń úziksizligine saykes keledi. Meyli, indukciya vektorınıń sızıqları eki dielektriktiń arasındaǵı shegara arqalı sınıp ótetuǵın bolsın (63-súwret). Birinshi dielektriktegi ΔS betine kelip túsetuǵın sızıqlardıń sanı ΔN_1 anıqlama boyınsha mınaǵan teń:

$$\Delta N_1 = D_{1n} \Delta S.$$

Ekinshi dielektrikte sol ΔS betinen

$$\Delta N_2 = D_{2n} \Delta S.$$

indukciyanıń aǵısı shıǵadı. Biraq, (9)-shárt boyınsha $D_{1n} = D_{2n}$ teńligi orınlı bolǵanlıqtan

$$\Delta N_1 = \Delta N_2$$

teńligine iye bolamız. Solay etip, indukciya sıızqları bet arqalı úzliksiz ótedi eken.

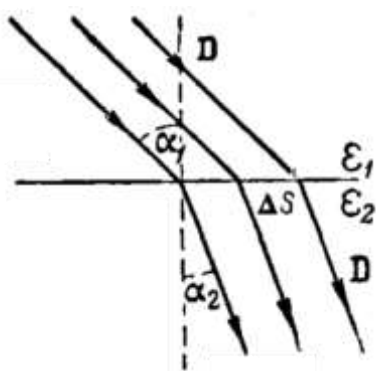
Bir tekli bolmaǵan dielektrik bolǵan jaǵdayda onı hár qaysısınıń ishinde dielektrikti bir tekli dep esaplawǵa bolatuǵınday etip juqa qatlamlarǵa bólemiz. Bunday jaǵdayda indukciya sıızqları bir qatlamnan ekinshi qatlamǵa úzliksiz ótedi, yaǵnıy dielektriktiń ishi arqalı úzliksiz ótedi.

Maydan nolge teń bolmaǵan keńislikti tutası menen toltırıp turatuǵın dielektrik ushın indukciya vektorı $\mathbf{D}$ erkin zaryadlardıń maydanınıń kernewligi $\mathbf{E}_0$ ge sáykes keledi. Bul usınday dielektrikte $\mathbf{E} = \frac{\mathbf{E}_0}{\epsilon}$ teńliginiń orınlanatuǵınlıǵınan (142-paragrafqa qarańız) kelip shıǵadı. Sonlıqtan $\mathbf{E}_0 = \epsilon \mathbf{E} = \mathbf{D}$ teńligi orınlı boladı.

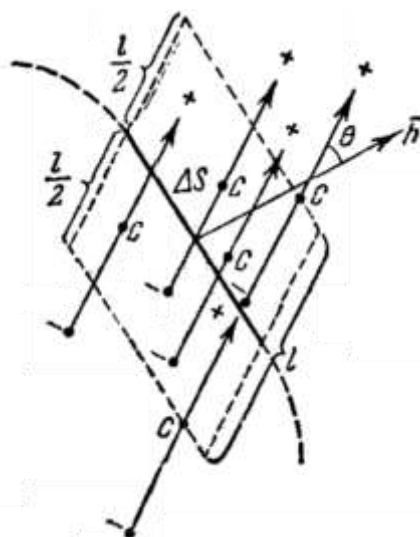
Dielektriktegi maydan ushın Ostrogradskiy-Gauss teoreması túri ózgergen formaǵa iye boladı. Polyarizaciyalanǵan dielektrikti alamız hám dielektriktiń ishinde ıqtıyarlı túrde alınǵan S beti arqalı ótetuǵın kernewliktiń aǵısın sanaymız. Bettiń ishindegi tolıq zaryad Q' eki bólimnen turadı: dielektrikke sırttan kirgizilgen Q_0 zaryadınan hám dielektriktiń polyarizaciyalanıwınıń saldarınan payda bolǵan Q' baylanısqa zaryadınan. Sonlıqtan

$$\sum E_n \Delta S = 4\pi Q = 4\pi(Q_0 + Q') \quad (11)$$

teńligine iye bolamız. Bul teńliklerde n arqalı S betiniń noqatlarındaqı sırtqı normaldı ańǵartadı.



63-súwret. Eki dielektriktiń shegarası arqalı ótkende indukciya sıızqlarınıń úzliksizligi.



64-súwret. Baylanısqa zaryadtıń muǵdarın esaplawǵa.

Q' zaryadın esaplaymız. Tolıǵı menen S betiniń ishinde jaylasqa molekular bul bettiń ishinde kompensaciyalanbaǵan zaryadtı payda etpeytuǵınlıǵı túsiniqli. Kompensaciyalanbaǵan zaryadtı S beti menen kesilisetuǵın molekular ǵana payda etedi. S betiniń sheklerinen oń zaryadı shıǵatuǵın molekular usı S betiniń ishinde teris zaryadtı beredi, al bettiń sheklerinen teris zaryadı shıǵatuǵın molekular S betiniń ishinde oń zaryadtı payda etedi. Bettiń ΔS elementin alamız hám usı elementti neshe molekulanıń kesetuǵınlıǵın esaplaymız. ΔS elementiniń qasında molekulalardıń momentleri shaması boyınsha da, baǵıtı boyınsha da birdey, al olardıń momenti $\mathbf{p} = q\mathbf{l}$ shamasına teń dep boljaymız (l arqalı molekulanıń oń hám teris zaryadlarınıń arasındaqı qashıqlıq belgilengen). Dipollardıń kósherleri ($\mathbf{l}$ baǵıtında baǵıtlanǵan) ΔS elementine túsirilgen sırtqı normal $\mathbf{n}$ menen α múyeshin jasaydı dep boljaymız. ΔS elementiniń orayı C usı ΔS elementinen $\mathbf{n}$ niń baǵıtında bettiń eki tárepinde $\frac{l}{2}$ shamasınan úlken bolmaǵan qashıqlıqlarda jaylasqa molekulalardı kesip ótetuǵınlıǵı óz-ózinen túsiniqli (64-súwretke qarańız, l - dipoldiń uzınlıǵı). Solay etip, ΔS elementi orayları ultanı ΔS , jasawshısınıń uzınlıǵı l bolǵan qıya cilindrdiń

ishinde joylasqan molekullardı kesip ótedi. Kólem birligindeki dipollardıń oraylarınıń sanı n_0 shamasına teń dep boljap, ΔS elementi tárepinen kesip ótilgen molekullardıń sanı ushın

$$n_0 \Delta S l \cos(\mathbf{n}, \mathbf{l})$$

ańlatpasına iye bolamız.

Eger $\mathbf{l}$ diń bağıtı $\mathbf{n}$ niń bağıtı menen súyir múyeshti payda etetuǵın bolsa, onda hár bir kesip ótilgen molekula S betiniń ishinde q teris zaryadın payda etedi ($\mathbf{l}$ oń zaryadtan teris zaryadqa qaray baǵıtlangan). Solay etip, ΔS elementi kesip ótken molekullar S betiniń ishinde muǵdarı

$$-qn_0 l \Delta S \cos(\mathbf{n}, \mathbf{l})$$

shamasına teń kompensaciyanbaǵan zaryadtı payda etedi (eger ΔS elementi $\mathbf{l}$ diń bağıtı menen doǵal múyesh jasaytuǵın sırtqı normaldı payda etse, onda joqarıda keltirilgen ańlatpa teris zaryadtı beredi). Usınıń menen birge $q\mathbf{l}n_0 = \mathbf{P}$ ortalıqtıń polyarizaciya vektorı bolıp tabıladı (kólemniń bir birliginiń momenti), demek ΔS elementiniń kesiwinen payda bolǵan artıqmash zaryadtıń muǵdarın

$$-P \cos(\mathbf{n}, \mathbf{P}) \Delta S = -P_n \Delta S$$

túrinde jazıwǵa boladı. Bul ańlatpadaǵı P_n shaması ΔS elementine túsirinden sırtqı normaldıń baǵıtındaǵı polyarizaciya vektorınıń proekciyası bolıp tabıladı.

Barlıq S betiniń ishindegi tolıq zaryadtı barlıq ΔS elementi boyınsha zaryadlardı qosıw jolı menen alamız:

$$Q' = - \sum P_n \Delta S.$$

Q' ushın jazılǵan bul ańlatpanı (11)-ańlatpaǵa qoyıp

$$\sum E_n \Delta S = 4\pi \left(Q - \sum P_n \Delta S \right)$$

yamasa

$$\sum (E_n + 4\pi P_n) \Delta S = 4\pi Q$$

ańlatpasına iye bolamız.

Usınıń menen birge $\mathbf{E} + 4\pi\mathbf{P}$ qosındısı $\mathbf{D}$ elektrostatikalıq indukciya vektorı bolıp tabıladı. Bunnan eń aqırında

$$\sum D_n \Delta S = 4\pi Q$$

ańlatpasın alamız.

Bul nátiyje dielektrik ushın Ostrogradskiy-Gauss teoremasın beredi: ıqtıyarlı tuyıq bet arqalı ótetuǵın elektrostatikalıq indukciya vektorınıń aǵısı usı bettiń ishindegi *erkin zaryadtıń* muǵdarın 4π ge kóbeytkenge teń.

130-paragrafta elektrostatikalıq maydanniń kernewligi $\mathbf{E}$ menen kólemlik zaryadlardıń tıǵızlıǵı ρ arasında

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = 4\pi\rho \quad (12)$$

yamasa

$$\text{div } \mathbf{E} = 4\pi\rho \quad (12a)$$

túrindegi baylanıstıń bar ekenligin kórsetilgen edi. Dielektrikler bolǵan jaǵdayda ρ arqalı kólemlik zaryadlardıń da, erkin zaryadlardıń da kólemlik tıǵızlıǵı bolıp tabıladı. Dielektrikler bar bolǵan jaǵdayda erkin zaryadlardıń kólemlik tıǵızlıǵı bolǵan ρ_0 shaması $\mathbf{D}$ vektorınıń divergenciyasın anıqlaydı. Haqıyqatında da (1a) formula boyınsha

$$\mathbf{D} = \mathbf{E} + 4\pi\mathbf{P}.$$

Bul teńliktegi $\mathbf{P}$ - polyarizaciya vektorı. Bunnan

$$\text{div } \mathbf{D} = \text{div } \mathbf{E} + 4\pi \text{div } \mathbf{P} \quad (13)$$

ańlatpasına iye bolamız.

141-paragrafta ayılǵanlar boyınsha, $\text{div } \mathbf{P} = -\rho'$, ρ' - baylanısqan zaryadlardıń kólemlik tıǵızlıǵı. (13)-ańlatpaǵa $\text{div } \mathbf{P}$ niń bul mánisin hám (12a) boyınsha $\text{div } \mathbf{E}$ niń mánisin qoyıp

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = 4\pi(\rho - \rho')$$

formulasına iye bolamız. Biraq, $\rho - \rho' = \rho_0$, bul teńlikte ρ_0 - erkin zaryadlardıń kólemlik tıǵızlıǵı. Bunnan

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = 4\pi\rho_0, \quad (14)$$

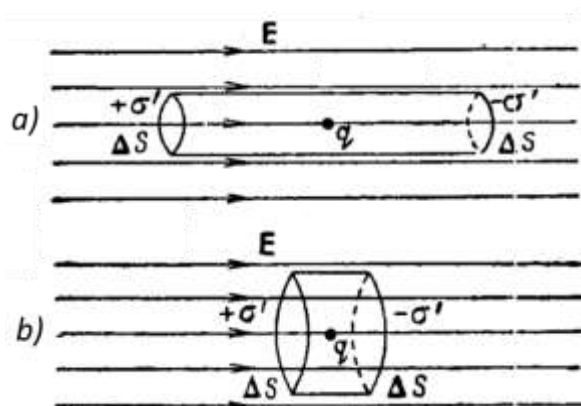
teńlemesin tabamız. Solay etip, $\mathbf{D}$ vektorınıń divergenciyası tek erkin zaryadlardıń tıǵızlıǵı boyınsha anıqlanadı eken.

$\mathbf{E}$ vektorı ushın (12a) ańlatpası Ostrogradskiy-Gauss teoremasınıń nátiyjesi sıpatında alınǵan edi. Kerisinshe, (12a) qatnasın qanaatlandıratuǵın vektordı Ostrogradskiy-Gauss teoremasın qanaatlandıratuǵının kórsetiwge boladı. (14)-teńlikten jáne qálegen dielektriktegi $\mathbf{D}$ vektorınıń Ostrogradskiy-Gauss teoremasın qanaatlandıratuǵını, tek ǵana erkin zaryadlardıń esapqa alınıwınıń kerek ekenligi kelip shıǵadı.

§ 145. $\mathbf{E}$ hám $\mathbf{D}$ vektorların zaryadqa tásir etetuǵın kúsh boyınsha anıqlaw. Boslıq ushın $\mathbf{E}$ ni bir birlik oń zaryadqa tásir etetuǵın kúsh sıpatında anıqladıq (124-paragraf). Eger maydanniń berilgen noqatında jaylastırılǵan q zaryadına $\mathbf{f}$ kúshi tásir etetuǵın bolsa, onda usı noqattaǵı maydanniń kernewligi $\mathbf{E}$

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{f}}{q}. \quad (1)$$

qatnasınıń járdeminde anıqlanadı. Bul jaǵdayda eki momentke itibar beriw kerek: 1) "sınap kóruletuǵın" q zaryadınıń noqatlıq bolıwı, yaǵnıy sheklerinde maydanniń kernewligi turaqlı bolatuǵınday kishi ólshemlerge iye denede toplanǵan bolıwı kerek; 2) q zaryadın alıp keliw maydandı payda etetuǵın zaryadlardıń shamasına hám óz-ara jaylasıwlarına hesh qanday tásir etpewi kerek. Bul eki shártti de is júzinde orınlawǵa boladı. Onıń ushın q zaryadın júdá kishi etip alıw hám onı ólshemleri maydandı payda etetuǵın qálegen zaryadqa shekemgi qashıqlıqtan kishi etip alıw kerek.



65-súwret.

Dielektriktegi quwıslıq: a) jıńışke cilindr tárizli, b) keń, qısqa cilindr tárizli.

142-paragrafta anıqlaǵanıımızday, dielektriktegi maydanniń kernewligi $\mathbf{E}$ ni erkin zaryadlar payda etken $\mathbf{E}_0$ kernewligi menen baylanısqaan zaryadlar payda etken $\mathbf{E}'$ kernewlikleriniń qosındısına teń:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}'.$$

Biziń 143-paragrafta kórsetkenimizdey, dielektriktiń ishinde jaylastırılǵan zaryadlangan denegge tásir etetuǵın kúshniń $\mathbf{f} = q\mathbf{E}$ formulasınıń járdeminde anıqlanbaydı (bul teńlikte q arqalı biz qarap atırǵan denede toplanǵan zaryad belgilengen). Bul dene menen dielektriktiń arasındǵı shegarada qosımsha betlik zaryadlardıń payda bolatuǵınlıǵı menen baylanıslı. Olardıń shaması q zaryadınıń shamasınan hám usı zaryad toplanǵan deneniń ólshemleri menen formasınan ǵárezli. Usınıń menen birge dielektriktiń ózinde hám onıń shegaralarında kúshlerdi payda etetuǵın mexanikalıq keriwler payda boladı. Qosımsha baylanısqaan zaryadlar denelerdiń ólshemleri kishi bolǵanda da joǵalmaydı hám, sonlıqtan, ulıwma aytqanda dielektriktegi maydanniń kernewligi $\mathbf{E}$ ni "sınap kóruletuǵın" q zaryadın paydalanıp (1)-teńliktiń tiykarında anıqlawǵa bolmaydı.

Dielektriktegi keriwlerdiń payda bolıwınıń sebebinen payda bolǵan mexanikalıq kúshlerden *dielektriktiń ishinde quwıslıqtı payda etip*, usı quwıslıqtıń ishine onıń diywallarına tiymeytuǵın "sınap kóriletuǵın" zaryadtı ornalastırıw arqalı qutılıwǵa boladı. Biraq, bul jaǵdayda "sınap kóriletuǵın" zaryadqa tásir etetuǵın kúsh quwıslıqtıń forması menen ólshemlerinen ǵárezli boladı hám usıǵan sáykes, ulıwma aytqanda tek dielektriktiń ishindegi maydanniń kernewli E arqalı anıqlanbaydı.

Sheksiz úlken bir tekli dielektrikti qaraymız. Onıń ishinde uzın hám jıńışke cilindr tárizli quwıslıqtı payda etemiz hám onıń jasawshıları kernewlik sıızqları E ge parallel bolsın (65-a súwret). Bul quwıslıqtıń orta bólimine júdá kishkene bolǵan denede toplanǵan "sınap kóriletuǵın" q zaryadın ornalastıramız. Bunday jaǵdayda usı q zaryadınıń tásirinde quwıslıqtıń betlerinde payda bolatuǵın baylanısqa zaryadları esapqa almawǵa bolatuǵınday jáne q zaryadına tek E maydanı tárepinen tásir etetuǵın kúshti hám usı maydanniń tásirinde quwıslıqtıń shegarasında payda bolatuǵın $\pm\sigma'$ baylanısqa zaryadların esapqa alamız. Bunday jaǵdayda q sınap kóriletuǵın zaryadına tásir etetuǵın kúsh mınaǵan teń:

$$\mathbf{f} = q\mathbf{E} + \mathbf{f}'.$$

Bul teńlikte $\mathbf{f}'$ - baylanısqa $\pm\sigma'$ zaryadları payda etken kúsh. Cilindr di jasawshılar E vektorına parallel bolǵanlıqtan, baylanısqa zaryadlar tek cilindr diń ΔS ultanlarında ǵana payda boladı; bul zaryadlarıń shaması $Q_i = \pm\sigma' \Delta S$. Eger cilindr jıńışke jáne uzın bolsa, onda Q_i zaryadları kishi (ΔS betleri kishi) hám olar "sınap kóriletuǵın" q zaryadınan alısta jaylasadı. Sonlıqtan, $\mathbf{f}'$ kúshi $q\mathbf{E}$ kúshine salıstırǵanda kishi hám onı esapqa almawǵa boladı; bunday jaǵdayda (2)-teńlik minanı beredi:

$$\mathbf{f} = q\mathbf{E}.$$

Demek, *jasawshısı kernewlik sıızqlarına parallel bolǵan jıńışke hám uzın cilindr túrindegi quwıslıqtıń ortasına jaylastırılǵan kishi sınap kóriletuǵın zaryadqa tásir etetuǵın kúsh dielektriktegi maydanniń kernewligi E boyınsha anıqlanadı.*

Endi baska formaǵa iye bolǵan quwıslıqtı qaraymız: ultanı ΔS kernewlik sıızqları E ge perpendikulyar bolǵan qısqa hám keń cilindr (65-b súwret). Endi $Q_i = \pm\sigma' \Delta S$ baylanısqa zaryadlarınıń tásirin esapqa almawǵa bolmaydı.

Cilindr diń ultanların bir birine parallel bolǵan sheksiz úlken tegislikler dep esaplap, baylanısqa zaryadlarıń onıń arasında kernewliginiń san shaması

$$E' = 4\pi\sigma' = 4\pi\kappa E$$

teńligi menen anıqlanatuǵın maydandı payda etedi. Bul kernewlik

$$\mathbf{f}' = q \cdot 4\pi\kappa \mathbf{E}$$

shamasına teń kúshti payda etedi. Bunnan keyin (2)-teńlik

$$\mathbf{f} = q(\mathbf{E} + 4\pi\kappa \mathbf{E})$$

yamasa

$$\mathbf{f} = q(\mathbf{E} + 4\pi\mathbf{P})$$

teńligin beredi. Bul teńlikte $\mathbf{P}$ – polyarizaciya vektorı. Biraq, 144-paragraftaǵı (1a) teńligi boyınsha

$$\mathbf{E} + 4\pi\mathbf{P} = \mathbf{D}$$

teńligine iye bolamız. Bul teńlikte $\mathbf{D}$ – elektrostatalıq indukciya vektorı. Solay etip,

$$\mathbf{f} = q\mathbf{D} \quad (3)$$

teńligine iye bolamız, yaǵnıy *ultanları kernewlik sıızqlarına perpendikulyar bolǵan qısqa, keń cilindr túrindegi quwıslıqtıń ortasına jaylastırılǵan sınap kóriletuǵın zaryadqa tásir etetuǵın kúsh dielektriktegi elektrostatalıq indukciya vektorı $\mathbf{D}$ niń mánisi boyınsha anıqlanadı.*

Joqarıda ayılǵanlardan jáne bir ret quwıslıqtıń ishine jaylastırılǵan "sınap kóriletuǵın" zaryadqa tásir etetuǵın kúshtiń sol quwıslıqtıń forması menen ólshemlerinen ǵárezli ekenligi kórinip tur. Dara jaǵdayda, quwıslıqtıń ishine kirgizilgen "sınap kóriletuǵın" zaryadqa tásir etetuǵın kúshtiń shaması tek maydanniń kernewligi E boyınsha yamasa tek indukciyası $\mathbf{D}$ boyınsha anıqlanadı.

Usınıń menen birge $\mathbf{E}$ vektorınıń fizikalıq mánisin basqa usıl menen de anıqlawǵa boladı. Onıń ushın "sınıp kóritetuǵın" zaryad sıpatında makroskopiyalıq (dım kishi bolsa da) denede toplanǵan zaryadtı emes, al qanday da bir elementar zaryadlangan bóleksheni (mısalı, elektrondı) alamız. Ayırım elektron, eger ol qattı zattıń molekularınıń arasında turǵan bolsa da, barlıq waqıtta boslıqta turǵan boladı. Usı elektrongá tásir etetuǵın $\mathbf{f}$ kúshtiń onıń e zaryadına qatnası elektron turǵan noqattaǵı maydannıń kernewligin anıqlaydı. Kernewliktiń bul mánisin $\mathbf{E}_{\text{mikro}}$ arqalı belgileymiz. Bul belgidegi "mikro" indeksi maydannıń kernewliginiń mikroskopiyalıq bóleksheniń járdeminde anıqlanǵanlıǵın ańǵartadı. Maydannıń kernewligi $\mathbf{E}_{\text{mikro}}$ niń mánisi ushın hár qıylı shamalar alınadı (elektronnıń molekulanıń quramına kiretuǵın anaw yamasa mınaw zaryadtıń qasında jaylasqanlıǵına baylanıslı). Eger bir elektrondı fizikalıq kishi bolǵan kólemniń iqtıyarlı túrde alıńǵan hár qıylı noqatlarına jaylastırsaq, onda kernewliktiń ortasha mánisi $\bar{\mathbf{E}}_{\text{mikro}}$ tabıladı hám onıń shaması erkin hám baylanısqa barlıq zaryadlardıń jıynaǵı boyınsha anıqlanadı (bul jaǵday dielektriktegi berilgen kólemniń sheklerindegi maydannıń kernewligi $\mathbf{E}$ ni beredi).

$\mathbf{E}_{\text{mikro}}$ shamasın anıqlawda biz elektrondı dielektriktiń molekularına salıstırǵanda iqtıyarlı túrde saylap alıńǵan noqatlarǵa jaylastırǵanımaızdı atap aytıw áhmiyetli. Eger dielektriktiń ishinde belgili bolǵan molekulardı ayırıp alsaq, onda bir molekula jaylasqan kólemniń sheklerindegi ortasha kernewlik $\mathbf{E}_1$ diń shaması $\mathbf{E}_{\text{mikro}}$ dan ózgeshe hám, usıǵan sáykes, maydannıń kernewligi $\mathbf{E}$ den ózgeshe boladı. Bul mınaday jaǵday menen baylanıslı: *ǵáp molekulardıń orayları turǵan noqatlardaǵı maydannıń kernewliginiń mánisi haqqında aytılp atır hám kernewlik anıqlanǵan waqıtta molekula ózi iyelep turǵan orınnan sırtqa alıp ketilgen degen* boljaw qabıl etilgen. Solay etip, endi ortasha mánis alınatuǵın noqatlar iqtıyarlı túrde saylap alıńǵan emes, bul noqatqa salıstırǵanda polyarizaciyanıń dielektriktiń molekuları tártipsiz jaylasqan emes hám olar ózleriniń qosımsha maydanların beredi.

Sáykes esaplawlar izotrop dielektriktiń ishinde jaylasqan molekulaǵa tásir etetuǵın ortasha maydannıń kernewligi $\mathbf{E}_1$

$$\mathbf{E}_1 = \mathbf{E} + \frac{4\pi}{3} \mathbf{P} \quad (4)$$

shamasına teń, bul ańlatpada $\mathbf{P}$ - dielektriktiń polyarizaciya vektori.

§ 146. Dipollik dielektrikler. Molekulalardıń dipollik momentlerin anıqlaw. Usı waqıtlarǵa shekem biz, dáslep molekularınıń dipollik momenti bar ma edi yamasa olar sırtqı maydannıń tásirinde payda boldı ma degen sorawdan ǵárezsiz dielektriktiń polyarizaciyanıń nátiyjesi birdey bolıp alınadı dep esapladıq. Biraq, dipollik hám dipollik emes molekularlardan turatuǵın dielektriklerdiń arasındaǵı ayırmanı anıqlawǵa hám polyar molekularardıń dipollik momentlerin esaplawǵa múmkinshilik beretuǵın qubılıslar bar.

Usı waqıtqa shekem biz polyarizaciya vektori $\mathbf{P}$ niń mánisi

$$\mathbf{P} = \kappa \mathbf{E},$$

teńliginiń járdeminde anıqlanadı dep esapladıq. Bul teńlikte $\mathbf{E}$ - dielektriktegi maydannıń kernewligi hám κ - dielektriktiń polyarizaciya koefficienti. $\mathbf{P}$ nı bilayınsha kórsetiwge boladı dep boljayıq:

$$\mathbf{P} = \alpha n_0 \mathbf{E}_1. \quad (1)$$

Bul teńlikte n_0 - kólemniń bir birligindegi molekularardıń sanı, $\mathbf{E}_1$ - molekulaǵa tásir etetuǵın kernewliktiń ortasha mánisi hám α - molekulanıń polyarizaciyanıw koefficienti.

(1)-teńlikke $\mathbf{E}_1$ niń ornına onıń 145-paragraftaǵı (4)-formula boyınsha mánisin qoyıp

$$\mathbf{P} = \alpha n_0 \left(\mathbf{E} + \frac{4\pi}{3} \mathbf{P} \right)$$

formulasın hám bunnan

$$\mathbf{P} \left(1 - \frac{4\pi}{3} \alpha n_0 \right) = \alpha n_0 \mathbf{E} \quad (2)$$

teńligine kelemiz. Biraq, $\mathbf{P} = \kappa \mathbf{E}$ qatnasın paydalanıp hám $1 + 4\pi\kappa = \varepsilon$ ekenligin ańǵarıp (ε -

dielektriklik turaqlı), biz ekinshi tárepten mınaday ańlatpanı jaza alamız:

$$\mathbf{P} = \frac{\varepsilon - 1}{4\pi} \mathbf{E}.$$

$\mathbf{P}$ ushın jazılǵan bul formulanı (2)-formulaǵa qoyıp, mınanı alamız:

$$\frac{\varepsilon - 1}{4\pi} \mathbf{E} \left(1 - \frac{4\pi}{3} \alpha n_0 \right) = \alpha n_0 \mathbf{E}.$$

Bunnan ápiwayı algebraıq túrlendiriwlerden keyin

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \cdot \frac{1}{n_0} = \frac{4\pi}{3} \alpha$$

qatnasına iye bolamız. Kólem birligindegi molekulalardıń sanı n_0 mınaǵan teń $N \frac{\delta}{\mu'}$, bul ańlatpada μ - dielektrik zattıń molekulalıq salmaǵı, δ – onıń tıǵızlıǵı hám N – Avagadro sanı; bunnan mınanı alamız:

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \cdot \frac{\mu}{\delta} = \frac{4\pi}{3} \alpha N. \quad (3)$$

Molekulalardıń polarizaciya koefficienti α molekulalardıń hár bir sortı ushın turaqlı bolǵanlıqtan, hár bir berilgen dielektrik ushın $\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \cdot \frac{\mu}{\delta}$ shaması da onıń, qanday bir sırtqı tásirlerdiń, mısalı, basımınıń yamasa temperaturanıń h.t.b. sebebinen tıǵızlıǵınıń ózgerisinen ǵárezsiz turaqlı bolıp qala beredi. $\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \cdot \frac{\mu}{\delta}$ shaması *molekulalıq (yamasa mollik) polarizaciya* dep ataladı. Molekulalıq polarizaciyanıń γ tıǵızlıǵınan ǵárezsizligi tıǵızlıǵı sırtqı basımınıń tásirinde ańsat ózgeretuǵın gazlerde eksperimentallıq jaqtan tekserip kóрилиіw múmkin.

Molekulalıq polarizaciya ushın jazılǵan (3)-ańlatpa dipollik emes dielektrikler ushın durıs. Dipollik dielektriklerde molekulalardıń menshikli $\mathbf{p}_0$ momentke iye ekenligin atap óttik. Sırtqı elektr maydanınıń tásirinde olar óziniń dipolları menen maydannıń baǵıtında jaylasadı. Biraq, bul baǵıtlawshı tásirge tártipsiz jıllılıq qozǵalısları kesent beredi. Temperatura T qansha joqarı bolsa molekulalardıń jıllılıq qozǵalıslarınıń ortasha mánisi de joqarı boladı hám sırtqı elektr maydanınıń baǵıtlawshı tási hásireydi. Bul dielektriktiń polarizaciya vektorı $\mathbf{P}$ nıń temperaturadan ǵárezli bolıwına alıp keledi. Sáykes esaplawlar P ushın

$$P = n_0 \frac{p_0^2 E_1}{3kT}$$

formulasınıń orınlı ekenligin kórsetedi. Bul formulada k arqalı Bolcman turaqlısı belgilengen.

Eger joqarıda ayılǵanlar menen birge molekulalardıń dipolleri E maydanınıń tásirinde úlkeyetuǵın bolsa (yaǵnıy molekulalardıń polarizaciya koefficienti α nolge teń emes), onda dielektriktiń polarizaciya vektorı $\mathbf{P}$ nıń san mánisi

$$P = \alpha n_0 E_1 + n_0 \frac{p_0^2 E_1}{3kT}$$

shamasına teń boladı hám bunnan molekulalıq polarizaciya ushın (3) tiń ornına

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \cdot \frac{\mu}{\delta} = \left(\frac{4\pi}{3} \alpha + \frac{4\pi}{9} \frac{p_0^2}{kT} \right) N \quad (4)$$

ańlatpası alınadı. Solay etip, dipollik dielektrikler ushın molekulalıq polarizaciya dielektriktiń absolyut temperaturası T dan ǵárezli bolǵan aǵzaǵa iye boladı eken. Bul ǵárezlik gazlerde ayqın kórinedi. Molekulalıq polarizaciyanıń T ǵa baylanıslı ózgeriwiniń júrisin eksperimentte anıqlap hár qıylı polyar molekulalar ushın p_0 dipollik momentti anıqlawǵa boladı. Polyar molekulalardıń dipollik momentleriniń shamaları $1 \cdot 10^{-18}$ CGSE-birlikleri menen $6 \cdot 10^{-18}$ CGSE-birlikleriniń arasındıǵı mánislerge iye boladı. Bunday momentler zaryadları elektronınıń zaryadına teń hám bir birinen 10^{-8} sm qashıqlıqta jaylasqan eki noqatlıq zaryadtıń dipollik momentine teń.

Inert gazlerdiń atomları menen bazı bir eki atomlı molekulalardıń (mısalı, H_2 , N_2) dipollik momentleri nolge teń. Molekulalardıń dipollik momentlerin anıqlaw olardıń qurılısın úyreniwde áhmiyetli orındı iyeleydi (ayırıqsha organikalıq ximiyada). Zatlardıń belgili klassları ximiyalıq

birikpelerdiń usınday áwladları ushın tán bolǵan κ ǵa iye. Bazı bir zatlardıń dipollik momentleriniń mánisleri II kestede berilgen.

Suyıq hám qattı dielektriklerde molekullardıń arasındaǵı óz-ara tásirlesiwdi esapqa alıw kerek. Bul sırtqı elektr maydanınıń tásirindegi molekullardı burıwdıń bazı bir kishi, biraq sezilerliktey waqıttı talap etetuǵına alıp keledi.

II keste.

Elektrlik dipollik momentler

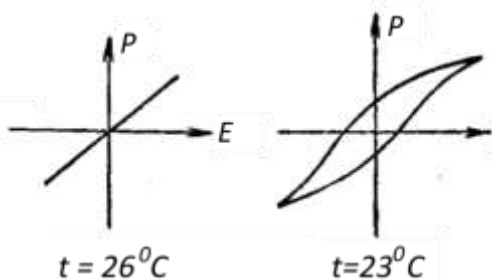
Zat	$p_0, 10^{18} \text{ CGSE}$
Xlorlı vodorod HCl	1,03
Suw H_2O	1,85
Ammiak NH_3	1,5
Spirtler	1,7
Ápiwayı efirler	1,2
Organikalıq kislotalar	1,4

Eger shaması boyınsha tez ózgeretuǵın ózgermeli elektr maydanına dielektrikti alıp kelsek, onda molekullar maydan menen birge burılıp úlgermeydi hám (4)-formuladaǵı ekinshi aǵzanıń tutqan ornı kemeyedi.

Eń aqırında, biz mınaday jaǵdaydı atap ótemiz: barlıq tallanǵan jaǵdaylardaǵı kernewlikten ǵárezli bolmaǵan ε dielektriklik turaqlıńıń bolıwı $\mathbf{P}$ polarizaciya vektorınıń maydannıń kernewligi $\mathbf{E}$ den proporcionallıǵınıń saldarı bolıp tabıladı.

Biraq, "dielektriklik turaqlı" ε si turaqlı bolmaǵan, al maydannıń kernewligi $\mathbf{E}$ den ǵárezli bolatuǵın deneler de bar. Usınday áwladqa kiretuǵın dielektrikler olardı ferromagnit denelerdiń magnitlik qásiyetleri menen jaqınlastıratuǵın ózine tán qásiyetlerge iye boladı.

Bunday qásiyetler birinshi ret segnet duzında (vino kislotasınıń qos netriy-kaliylik duzı) sovet fizikleri B.V.Kurchatov penen P.P.Kobeko tárepinen tabıldı hám duzdıń ataması boyınsha segnetoelektriklik qásiyetler dep ataladı¹⁰. Segnet duzınıń qásiyeti shaması 25°C bolǵan temperaturanıń bazı bir Θ mánisinen joqarı yamasa tómén bolıwına baylanıslı pútkilley hár qıylı boladı (ferromagnetik ushın "Kyuri noqatınıń analogı; 203-paragraf). $T > \Theta$ temperaturalarda maydannıń kernewligi menen polarizaciya vektorınıń arasındaǵı proporcionallıq saqlanadı: $\mathbf{P} = \kappa \mathbf{E}$; usınıń menen birge κ koefficienti temperaturadan $\kappa(T - \Theta) = \text{const}$ nızamı boyınsha ǵárezli. $T < \Theta$ temperaturalarda polarizaciya vektorı $\mathbf{P}$ menen maydannıń kernewligi $\mathbf{E}$ arasındaǵı proporcionallıq buzıladı. $\mathbf{E}$ ózgergende $\mathbf{P}$ vektorı "keshigedi", yaǵnıy $\mathbf{E}$ niń erterektegi mánisine sáykes keletuǵın mániske iye boladı. Bul qubılıs gisterezis atamasına iye (ferromagnitlik denelerdegi magnitlik gisterezislik qubılıslarǵa uqsas; 203-paragraf). Maydannıń kernewligi $\mathbf{E}$ shaması hám baǵıtı boyınsha dáwirli ózgergende $T < \Theta$ temperaturalardaǵı $\mathbf{P}$ nıń $\mathbf{E}$ den ǵárezligi qurıq tárizli formaǵa iye boladı (66-súwret). Usınday qubılıslardı B.M.Vul titannıń bazı bir duzlarında taptı, sonıń menen birge olar ushın ε niń mánisi bir neshe mırǵa jetedi.



66-súwret.

Segnet duzınıń polarizaciyasınıń waqıtqa baylanıslı ózgeretuǵın maydannıń kernewliginen ǵárezligi.

¹⁰ Xalıq aralıq ilimiy ádebiyatlarda "segnetoelektrik" atamasınıń ornında "ferroelektrik" ataması qollanıladı (Awdarıwshılar).

§ 147 Kristallardıń dielektriklik qásiyetleri. Pezoelektrlik. Usı waqıtlarǵa shekem biz zaryadları sırtqı elektr maydanınıń tásirinde awısa alatuǵın yamasa burılatuǵın ayırım molekulalardan turatuǵın dielektriklerdi qaradıq. Bunday kóz qaras gaz tárizli, sıyıq hám amorf qattı deneler ushın orınlı boladı. Ionlıq kristallardıń polyarizaciyasınıń xarakterı pútkilliy basqa. I tomda kórsetilip ótilgendey, ionlıq kristallar hár qıylı belgige iye ionlar durıs túrde gezeklesip jaylasatuǵın keńikliklik pánjerelerdi payda etedi. Mısalı, tas duzınıń kristalları natriydiń oń zaryadlangan ionları menen xlordıń teris zaryadlangan ionlarınıń gezeklesip jaylasıwınan ibarat. Bunday kristalda ayırım molekulanı ayırıp alıwǵa bolmaydı. Usıǵan sáykes, kristaldıń polyarizaciyası barlıq oń zaryadlangan ionlardıń maydannıń baǵıtında, al teris zaryadlangan ionlardıń oǵan qarama-qarsı baǵıttaǵı awısıwlarına alıp kelinesi.

Kristallardıń polyarizacıyalanıwshılıǵı elektrostatikalıq kernewlik vektorı **E** menen kristallografiyalıq kósherlerdiń baǵıtları arasındaǵı múyeshke baylanıslı hár qıylı bolıwı múmkin. Bul jaǵdayda polyarizaciya vektorı **P** menen **E** vektorı baǵıtlas bolmaydı hám, usıǵan sáykes, **P** menen **E** vektorlarınıń arasındaǵı baylanıstı 141-paragraftaǵı ápiwayı bolǵan (2)-qatnastırń járdeminde ańǵartıwǵa bolmaydı. Ulıwma jaǵdayda bir dana κ shamasınıń ornına toǵız dana κ_{ik} shamaların kirgiziwge tuwrı keledi. Usı shamalardıń járdeminde **P** menen **E** shamalarınń koordinatalar kósherleriniń baǵıtındaǵı qurawshılarınıń arasındaǵı sızıqlıq baylanıs ańǵartıladı:

$$P_x = \kappa_{xx}E_x + \kappa_{xy}E_y + \kappa_{xz}E_z,$$

$$P_y = \kappa_{yx}E_x + \kappa_{yy}E_y + \kappa_{yz}E_z,$$

$$P_z = \kappa_{zx}E_x + \kappa_{zy}E_y + \kappa_{zz}E_z.$$

Usıǵan sáykes **D** elektrostatikalıq indukciya vektorı **E** vektorına parallel emes hám dielektriklik turaqlı ϵ niń ornına ulıwma jaǵdayda toǵız ϵ_{ik} shamaların kirgiziw kerek boladı.

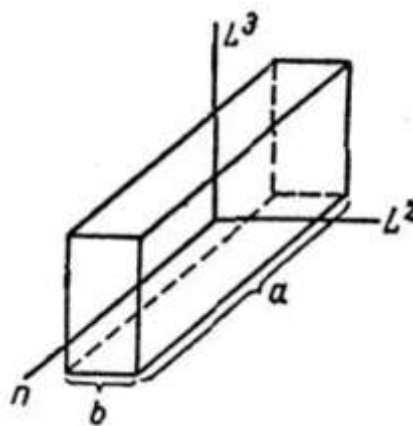
Kristallıq pánjeredegi bólekshelerdiń keńisliktegi durıs jaylasıwı ayırıqsha effekt bolǵan *pezoelektrlik effekt* dep atalatuǵın effektinń júzege keliwine alıp keledi; bul effektinń mánisi minadan ibarat: ayırım kristallardıń qaptal betlerinde mexanikalıq deformacıyanıń saldarınan (mısalı, qısqanda yamasa sozǵanda) elektr zaryadları payda boladı.

Pezoelektrlik effekt kvarcta, turmalinde, segnet duzında, qantta, cink sulfidinde hám jáne bir qatar kristallarda baqlanadı. Qısıwshı kúshtiń shaması 1 kG bolǵanda, kvarctıń qarama-qarsı qaptallarında voltinń júzden birindey shamadaǵı potenciallar ayırması payda boladı. Segnet duzı kristallında effekt kúshlirek.

Joqarıda táriyiplengen tuwrı pezoelektrlik effekt penen bir qatarda keri pezoelektrlik effekt te bar. Keri pezelektrlik effektte elektr maydanı túsirilgende kristaldıń uzayıwı yamasa qısqarıwı orın aladı (*elektrostrikciya*). Elektrostrikciyadaǵı kristaldıń ólshemleriniń ózgerisi júdá kishi: júzlegen volt shamasındaǵı potenciallar ayırması túskende kristallıq deneniń sızıqlıq ólshemi shama menen 10^{-7} santimetrge ózgeredi.

Házirgi waqıttaǵı texnikada tuwrı hám keri pezoelektrlik effektler keń túrde paydalanılmaqta. I tomda biz pezokvarclardı paydalanıw jolı menen ultraseslerdi payda etiw hám baqlawdı kórsetken edik. Radiotexinkada pezokvarclar elektrlik terbelislerdi stabilizacıyalaw ushın qollanıladı. Pezokvarclar hár qıylı ólshew ásbaplarında da hám waqıtın etalonların soǵıw ushın paydalanıladı.

67-súwret.
Kvarctan soǵılǵan paralelepiped.



Pezoelektrlik effektı alıw ushın kvarc kristallınan tuwrı múyeshli paralelepiped kesip alınadı (67-súwret). Bunday paralelepipedtegi qabırǵanlardıń bir sisteması L^3 optikalıq kósheri dep atalatuǵın kósherge, ekinshi sisteması L^2 qos kósheri dep atalatuǵın (elektrlik kósherler) kósherlerdiń birine parallel. Usınday etip kesip alınǵan pezokvarcqqa L^2 kósherine prarallel baǵıtta qısıwshı f kúshin túsirgende L^2 kósherine normal bolǵan qaptallarda bir birine teń, belgileri qarama-qarsı bolǵan $+q$ hám $-q$ zaryadları payda boladı. Elektrdiń muǵdarı q qısıwshı kúsh f ke proporcional hám kvarc plastinkasınıń ólshemlerinen ǵárezsiz:

$$q_{\parallel} = kf;$$

Bul effektı *boyliq pezoelektrlik effekt* dep ataydı. k shamasın kvarctıń pezoelektrlik turaqlısı dep ataydı; eger q dıń mánisi CGSE-birliklerinde, al f dinalarda ólshengen bolsa, onda onıń mánisi shama menen $6,5 \cdot 10^{-8}$ ke teń.

Eger tásir etetuǵın kúsh f optikalıq L^3 kósherine parallel bolsa, onda zaryadlardıń payda bolıwı baqlanbaydı.

Eger f kúshi L^2 hám L^3 kósherleri jatatuǵın tegislikke perpendikulyar bolǵan $\mathbf{n}$ baǵıtında túsetuǵın bolsa, onda *kóldeneń pezoelektrlik effekt* dep atalatuǵın pezoeffekt payda boladı. Zaryadlar L^2 kósherine normal baǵıtlanǵan qaptallarda payda boladı, biraq olardıń belgisi boyliq pezoeffekttege salıstırǵanda qarama-qarsı. Bunday jaǵdayda hár bir qaptal bette payda bolatuǵın elektr zaryadlarınıń muǵdarı $q_{\perp}$ mınaǵan teń:

$$q_{\perp} = k \frac{a}{b} f.$$

Bul teńlikte k burıńǵı mánisine teń, al a arqalı tásir etetuǵın f kúshiniń baǵıtındaǵı plastinkanıń qalıńlıǵı, b arqalı L^2 kósheriniń baǵıtındaǵı qalıńlıǵı belgilengen.

Kúshtiń belgisi ózgergende q zaryadınıń belgisi de ózgeredi, eger bir qaptalda qısqanda oń zaryad payda bolsa, sozǵanda teris zaryad payda boladı (hám kerisinshe).

Keri pezoelektrlik effektı baqlaw ushın pezokvarctıń qaptallarına metall astarlar jabıstırıladı hám olarǵa elektr zaryadları beriledi; bunday jaǵdayda maydanniń baǵıtına baylanıslı kristallıq plastinka qısıladı yamasa keńeyedi.

§ 148 Kondensatorlar. 136-paragrafta biz astarlarınıń arası bos bolǵan tegis kondensatordı qaradıq hám onıń sıyımlıǵı C ushın

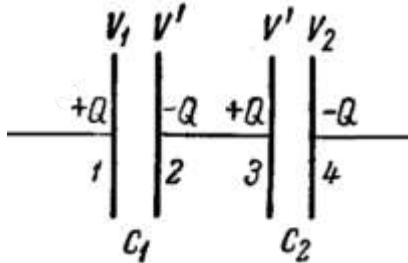
$$C = \frac{Q}{V_1 - V_2} = \frac{S}{4\pi d} \quad (1)$$

ańlatpasın aldıq. Bul ańlatpada S - kondensatordıń plastinalarınıń biriniń betiniń maydanı, al d - plastinalardıń arasındǵı qashıqlıq. Plastinalardıń arasında dielektriklik turaqlısı ε bolǵan dielektrik bolǵan jaǵdayda, 139-paragrafta ayılǵanday, onıń sıyımlıǵı bolǵan C shaması ε ese úlkeyedi hám

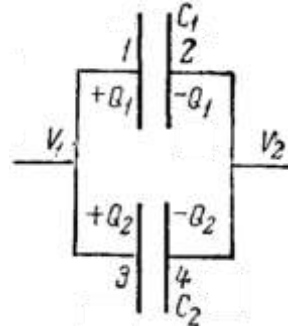
$$C = \frac{\varepsilon S}{4\pi d} \quad (2)$$

shamasına teń boladı. Solay etip, kondensatordıń sıyımlıǵı C plastinanıń betiniń maydanı S ke, dielektriklik turaqlı ε ge tuwrı proporcional hám plastinalardıń arasındaǵı qashıqlıq d ǵa keri proporcional eken.

Endi kondensatorlardı bir biri menen tutastırıwdı qaraymız. Olardı izbe-iz hám parallel tutastırıwǵa boladı.



68-súwret. Kondensatorlardı izbe-iz tutastırıw.



69-súwret. Kondensatorlardı parallel tutastırıw.

Sıyımlıqları C_1 hám C_2 bolǵan eki kondensatordı izbe-iz tutastırıw 68-súwrette keltirilgen.

1 plastinasın $+Q$ zaryadı menen zaryadlaǵanda bir ótkizgish bolıp tabılatuǵın 2 hám 3 plastinkasında indukciyanıń saldarınan sáykes $-Q$ hám $+Q$ zaryadları, al 4 plastinkasında $-Q$ zaryad payda boladı.

1 plastinkasınıń potencialın V_1 , al 4 al plastinkasınıń potencialın V_2 arqalı, 2 hám 3 plastinkalarınıń ulıwmalıq potencialın V' arqalı belgileymiz. Plastinkalardıń hár bir jubı ushın mınaday qatnaslardı jaza alamız:

$$V_1 - V' = \frac{1}{C_1} Q, \quad V' - V_2 = \frac{1}{C_2} Q.$$

Bul teńliklerde C_1 hám C_2 arqalı tutastırılǵan kondensatorlardıń sıyımlıqları belgilengen. Bul teńliklerdi aǵzama-aǵza qosıp,

$$V_1 - V_2 = \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) Q$$

teńligine iye bolamız. Ekinshi tárepten, mınanı jazıw múmkin:

$$V_1 - V_2 = \frac{1}{C} Q,$$

Bul teńlikte C arqalı eki kondensatordı izbe-iz jalǵawdıń saldarınan payda bolǵan quramalı kondensatordıń sıyımlıǵı belgilengen. Sońǵı eki formulanı bir biri menen salıstırıp

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (3)$$

yamasa

$$S = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}. \quad (3a)$$

teńliklerine iye boladı ekenbiz.

Demek, kondensatorlardı izbe-iz tutastırıwdıń nátiyjesinde alıńǵan kondensatordıń sıyımlıǵınıń keri shaması bir biri menen tutastırılǵan kondensatorlardıń sıyımlıqlarınıń keri shamalarınıń qosındısına teń boladı eken.

Sıyımlıqları C_1 hám C_2 bolǵan *kondensatorlardı parallel tutastırǵanda* (69-súwret) tutastırılǵan plastinalardıń potencialları birdey boladı. Biraq hár qıylı kondensatorlardıń astarlarındaǵı zaryadlardıń muǵdarları hár qıylı; olardı Q_1 hám Q_2 arqalı belgileyik. Hár bir

kondensator ushın astarlardaǵı zaryadtı, potenciallar ayırmasın hám sıymılıqtı baylanıstıratuǵın formulanı qollanamız:

$$Q_1 = C_1(V_1 - V_2), \quad Q_2 = C_2(V_1 - V_2).$$

Bul teńliklerdi aǵzama-aǵza qosıp

$$Q_1 + Q_2 = (C_1 + C_2)(V_1 - V_2).$$

teńligine iye bolamız. Ekinshi tárepten, mınaday teńliklerdi jazıwǵa boladı:

$$Q = Q_1 + Q_2 = C(V_1 - V_2).$$

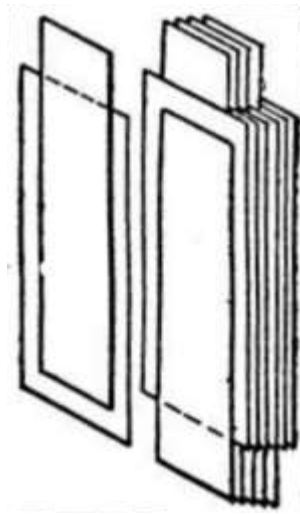
Bul teńliklerde C arqalı eki kondensatordan turatuǵın sistemanıń sıymılıǵı belgilengen. Soǵı eki teńlikti salıstırıp,

$$C = C_1 + C_2 \quad (4)$$

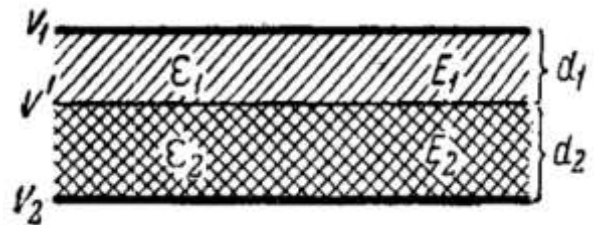
teńligine iye bolamız. Demek bir biri menen parallel tutastırılǵan kondensatorlardıń sıymılıǵı olardıń sıymılıqlarınıń qosındısına teń boladı eken.

Álbette, alıńǵan nátiyjelerdi birgelikte tutastırılǵan kondensatorlardıń qálegen sanı ushın alıwǵa boladı.

Kondensatorlardı sistemaǵa tutastırıw keń túrde qullanıladı. Parafinlengen qaǵaz yamasa slyuda menen qaplangan folgadan soǵılǵan tegis kondensatorlar jiıy qullanıladı. Folgalardıń hár ekinshisi bir biri menen tutastırıladı (70-súwret). Sonlıqtan bir biri menen tutastırılǵan qatar sanları taq bolǵan folgalar kondensatordıń bir astarın, al qatar sanları jup bolǵan folgalar kondensatordıń ekinshi astarın payda etedi. Bunday kondensatorlar júzlegen hám onnan da úlken mikrofaradalarǵa teń sıymılıqqa iye boladı hám úlken bolmaǵan ólshemlerge iye bolǵan jaǵdayda da bir neshe júz volt kernewge shıdam bere aladı.



70-súwret. Aralarına parafinlengen qaǵaz salıńǵan folgalardan soǵılǵan tegis kondensator.



71-súwret. Hár qıylı dielektriklerdiń qatlamları bar tegis kondensator.

Sanlı mısál keltiremiz. Dielektrik sıpatında qalırlıǵı 0,05 mm bolǵan dielektriklik turaqlısı $\epsilon = 1,8$ ge teń parafinlengen qaǵazdı paydalanıp, sıymılıǵı 1 mkf bolǵan tegis kondensatordı soǵıw talap etiletuǵın bolsın. Onıń ólshemlerin tabamız.

(2)-formuladan tegis kondensatordıń sıymılıǵınıń

$$C = \frac{\epsilon S}{4\pi d}$$

shamasına teń bolatuǵınlıǵına kóz jetkermiz. Bunnan, onıń plastinasınıń maydanı S tiń

$$S = \frac{4\pi d C}{\epsilon}$$

shamasına teń bolatuǵınlıǵın kóremiz. Bul teńlikke $C = 1 \cdot 10^{-6} \text{ f} = 9 \cdot 10^5 \text{ sm}$, $d = 0,005 \text{ sm}$, $\epsilon = 1,8$ shamaların qoyıp $S \cong 31000 \text{ sm}^2$ shamasın alamız. Folganıń hár bir japıraǵı (shetkilerinen basqa) eki

tárepten zaryadlanatuǵın bolǵanlıqtan, japıraqtıń betiniń ulıwmalıq maydanı shama menen 31000 sm^2 bolıwı kerek. Eger ayırım japıraqtı $10 \times 10 \text{ sm}^2$ ólshemine iye etip kesip alǵanda, onda japıraqlardıń ulıwmalıq sanı 310 boladı; folganıń qalıńlıǵı $0,001 \text{ sm}$ bolǵan jaǵdayda, kondensatordıń kólemi shama menen $2 \times 10 \times 10 \text{ sm}^3$ shamasına teń bolıp, kondensator tutası menen úlken bolmaǵan tegis qutıda jaylasadı.

§ 149. Kondensatorlardıń hár qıylı tipleri. 1. Hár qıylı dielektriklerdiń qatlamları bar tegis kondensator. Tegis kondensatordıń astarlarınń arasındaǵı keńislik dielektriklik turaqlılıarı ϵ_1 hám ϵ_2 bolǵan dielektriktiń eki qatlamı menen toltırılǵan dep boljayıq. Olardıń qalıńlıqları sáykes d_1 hám d_2 bolsın (71-súwret).

Bunday jaǵdayda sıyımlıq C aldırǵı jaǵdaydaǵıday

$$C = \frac{Q}{V_1 - V_2} \quad (1)$$

qatnasınıń járdeminde anıqlanadı. Biraq, bul jaǵdayda biz eki dielektriktiń shegarasına iye bolamız hám bul shegara arqalı ótkende maydannıń kernewligi ózgeriske ushıraydı. Astarlardıń arası bos bolǵan jaǵdayda olardıń arasındaǵı maydannıń kernewligin E_0 arqalı belgileymiz hám usınday kernewlikti payda etiw ushın kerek bolatuǵın zaryadlardıń betlik tıǵızlıǵı σ boladı:

$$E_0 = 4\pi\sigma.$$

Dielektriklerdegi E_1 hám E_2 kernewlikleri mına jaǵdayda boladı (142-paragrafqa qarańız):

$$E_1 = \frac{4\pi\sigma}{\epsilon_1} = \frac{E_0}{\epsilon_1}, E_2 = \frac{4\pi\sigma}{\epsilon_2} = \frac{E_0}{\epsilon_2}.$$

Astarlardıń birindegi zaryad:

$$Q = \sigma S = \frac{E_0}{4\pi} S. \quad (2)$$

Astarlardaǵı potenciallar ayırmasın maydannıń kernewligi arqalı esaplawǵa boladı. Eki dielektriktiń shegarasındaǵı potencialdı V' arqalı belgileymiz, bunday jaǵdayda

$$\frac{V_1 - V'}{d_1} = E_1, \frac{V' - V_2}{d_2} = E_2.$$

Bunnan

$$V_1 - V_2 = E_1 d_1 + E_2 d_2 = E_0 \left(\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2} \right) \quad (3)$$

teńligine iye bolamız. (2)- hám (3)-ańlatpalardı (1)-ańlatpaǵa qoyıp, kondensatordıń sıyımlıǵı ushın

$$C = \frac{Q}{V_1 - V_2} = \frac{E_0 S}{4\pi E_0} \left(\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2} \right)$$

ańlatpasın alamız. Bunnan

$$C = - \frac{S}{4\pi \left(\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2} \right)}. \quad (4)$$

formulasına iye bolamız.

Sıyımlıqtıń qatlamlardıń jaylasıw tártibinen ǵárezsiz ekenligin ańsat ańǵarıwǵa boladı. Eger $d_0 = 0$ teńligin alatuǵın bolsaq, onda bul formula bir dielektrigi bar kondensatordıń formulasına aylanadı.

Kondensatordıń jáne de bir neshe tipin qaraymız.

2. Sferalıq kondensator. Sferalıq kondensator bir birine koncentrli bolǵan eki sferalıq astardan turadı. Olardıń radiusların R_1 hám R_2 arqalı belgileymiz. Astarlardıń arasındaǵı keńislik dielektriklik turaqlısı ϵ ge teń bolǵan dielektrik penen toltırılǵan; astarlardıń zaryadları olardıń betlerinde teń ólshewli tarqalǵan hám olardı $+Q$ hám $-Q$, al astarlardıń potencialların sáykes V_1 hám V_2 arqalı belgileymiz.

Joqarıda dálillengende (127-paragraf), bir tekli zaryadlanǵan sferalıq bettiń maydanınıń kernewligi onıń ishinde nolge teń, al onıń sırtında sferanıń orayında jaylasqan muǵdarı sferada toplanǵan zaryadtıń muǵdarınday noqatlıq zaryadtıń payda etken maydannıń kernewligindey. Bunnan, kondensatordıń *astarlarınń arasındaǵı* maydannıń kernewligi tek ishki astardıń zaryadları tárepinen payda etiledi hám

$$E = \frac{Q}{\epsilon r^2}$$

shamasına teń. Bul qatnasta r - sferalıq bettiń orayına shekemgi qashıqlıq.

r diń baǵıtı potencialdıń qáddi betine túsirilgen $\mathbf{n}$ normal menen baǵıtlas; bunnan 131-paragraftaǵı (2-a) formula boyınsha

$$E = -\frac{dV}{dr},$$

al bunnan

$$dV = -\frac{Q}{\varepsilon r^2} dr$$

qatnasların alamız.

Bir astardan ekinshisine ótkendegi potencialdıń tolıq ózgerisin bul ańlatpanı R_1 den R_2 ge shekem integrallaw jolı menen alamız:

$$V_2 - V_1 = - \int_{R_1}^{R_2} \frac{Q}{\varepsilon r^2} dr = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{Q}{R_2} - \frac{Q}{R_1} \right).$$

Bunnan biz izlep atırǵan sferalıq kondensatordıń sıyımlıǵı ushın

$$C = \frac{Q}{V_1 - V_2} = \frac{Q\varepsilon}{\frac{Q}{R_1} - \frac{Q}{R_2}}$$

yamasa

$$C = \frac{\varepsilon R_1 R_2}{R_2 - R_1}. \quad (5)$$

formulasına iye bolamız.

Bul formulanı paydalanıp, mısıl retinde radiusları $R_1 = 2 \text{ m}$ hám $R_2 - R_1 = 1 \text{ mm}$ bolǵan aralıǵına dielektriklik turaqlısı $\varepsilon = 2,5$ bolǵan ortalıq penen toltırılǵan koncentrlı sferalar túrindegi sferalıq kondensatordıń sıyımlıǵın ańsat esaplawǵa boladı. Bunday kondensatordıń sıyımlıǵı shama menen 1 mkf boladı. Bul nátiyjeni 136-paragrafta keltirilgen maǵlıwmatlar menen salıstırıw qızıqlı. Sol paragrafta radiusı 9 km bolǵan ońashalanǵan shardıń sıyımlıǵı 1 mkf shamasına teń bolatuǵınlıǵı kórsetilgen edi.

3. Cilindrlik kondensator. Cilindrlik kondensator ulıwmalıq uzınlıǵı l , al radiusları R_1 hám R_2 bolǵan eki koaksiallıq quwıs cilindrden turadı (72-súwret). Cilindrlerdiń arasındaǵı keńislik dielektriklik turaqlısı ε shamasına teń ortalıq penen toltırılǵan. Meyli, astarlarda $+Q$ hám $-Q$ zaryadları hám olar sáykes V_1 hám V_2 potenciallarına iye bolsın.

Astardıń arasındaǵı maydannıń kernewligin tek ishki cilindrdegi zaryad tárepinen payda etiledi hám cilindrdiń kósherinen r qashıqlıǵındaǵı kernewlik

$$E = \frac{2\eta}{\varepsilon r}$$

shamasına teń. Bul qatnasta η - cilindrdiń uzınlıǵınıń bir birligine sáykes keletuǵın zaryad. dr uchastkasındaǵı potencialdıń ózgerisi kernewlik penen bılayınsha baylanısqa:

$$-\frac{dV}{dr} = E.$$

Bunnan

$$dV = -E dr = -\frac{2\eta}{\varepsilon r} dr$$

ańlatpasına iye bolamız. Astarlardıń arasındaǵı potenciallar ayırması $V_2 - V_1$ shamasın joqarıdaǵı ańlatpanı R_1 den R_2 ge shekem integrallaw jolı menen alamız:

$$V_2 - V_1 = - \int_{R_1}^{R_2} \frac{2\eta}{\varepsilon r} dr = -\frac{2\eta}{\varepsilon} \ln \frac{R_2}{R_1}.$$

Demek, cilindrlik kondensatordıń sıyımlıǵı mınaǵan teń:

$$C = \frac{Q}{V_1 - V_2} = \frac{\varepsilon l}{2 \ln \frac{R_2}{R_1}}. \quad (6)$$

Solay etip, cilindr tárizli kondensatordıń sıyımlıǵı kondensatordıń uzınlıǵına, kondensatordı toltırıp turǵan ortalıqtıń dielektriklik turaqlısına tuwrı proporcional boladı eken. Sonıń menen birge ol cilindrlerdiń radiuslarınıń qatnasına baylanıslı bolıp, usı qatnas kishireygende sıyımlıqtıń mánisi úlkeyedi.

4. Ózgermeli sıyımlıqqa iye kondensator. Radiotexnikada ózgermeli sıyımlıqqa iye bolǵan kondensator júdá jiyi paydalanıladı. Onıń dúzilisi 73-súwrette keltirilgen. YArim saǵıyna túrindegi plastinalar (74-a súwret) hár ekinshisi arqalı bir biri menen tutastırılǵan. Plastinalardıń yarımı

qozğalmaytuğın etip bekitilgen, al yarımı vertikalıq kósherdıń dógeresinde tutqanıń járdeminde burılı aladı. Burılıwdıń nátiyjesinde qozğalatúğın plastinalar qozğalmaytuğın plastinalardıń arasına kiredi hám usınday jollar menen bir biri menen parallel tutastırılğan bir qatar kondensatorlardı payda etedi.

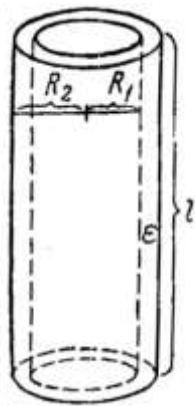
Plastinalardan quralğan kondensatorlardı juwıq túrde tegis dep esaplawğa hám, sonlıqtan usınday ayırım kondensatordıń sıyımlıǵı C nı

$$C' = \frac{\varepsilon S}{4\pi d}$$

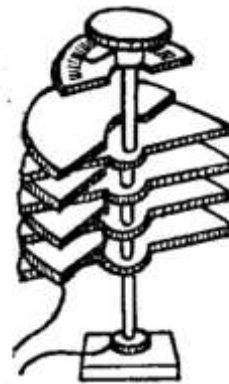
shamasına teń dep esaplawğa boladı. Bul ańlatpada ε arqalı plastinalardıń arasındagı ortalıqtıń dielektriklik turaqlısı, d arqalı plastinalardıń arasındagı qashıqlıq, al S arqalı plastinalardıń bir biriniń ústinde jaylasqan bóleginiń betiniń maydanı. Eger plastinalar bir birine salıstırǵanda α múyeshine burılğan bolsa, onda S shaması 74-b súwrettegi shtrixlangan oblasttıń maydanı bolıp tabıladı. Plastinalardıń sırtqı radiusın r_1 , al ishki radiusın r_2 arqalı belgilep

$$S = \pi(r_1^2 - r_2^2) \cdot \frac{\alpha}{2\pi} = \frac{(r_1^2 - r_2^2)\alpha}{2}$$

ańlatpasına iye bolamız. Bul ańlatpada α múyeshi radianlarda ańlatılğan.



72-súwret. Cilindr tárizli kondensator.



73-súwret. Ózgermeli sıyımlıqqa iye kondensator.

Bunnan bir kondensatordıń sıyımlıǵı mınağan teń boladı:

$$C' = \frac{\varepsilon(r_1^2 - r_2^2)\alpha}{8\pi d}$$

Eger, plastinalardıń arasında n dana aralıq bolsa, onda bunday kondensator hár qaysısınıń sıyımlıǵı C' bolğan n dana bir biri menen parallel tutastırılğan kondensatordı payda etedi.

Demek, barlıq kondensatordıń sıyımlıǵı C mınağan teń:

$$C = nC' = \frac{\varepsilon n(r_1^2 - r_2^2)\alpha}{8\pi d} \quad (7)$$

Bul formulada da α radianlarda ańlatıladı. Formulanı kishi α lar ushin paydalanıwǵa bolmaydı.

Eger α múyeshin graduslarda ańǵartsaq, onda

$$\alpha(\text{radian}) = \frac{2\pi}{360} \alpha(\text{gradus})$$

qatnasınıń járdeminde (7)-ańlatpanı

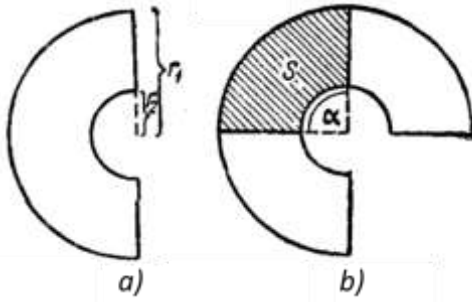
$$C = \frac{\varepsilon n(r_1^2 - r_2^2)\alpha}{1440 \cdot d}, \quad (8)$$

túrine alıp keliwge boladı. Ádette usınday kondensatordıń plastinalarınıń arasında hawa boladı. Bunday jaǵdayda ε niń mánisi is júzinde birge teń boladı.

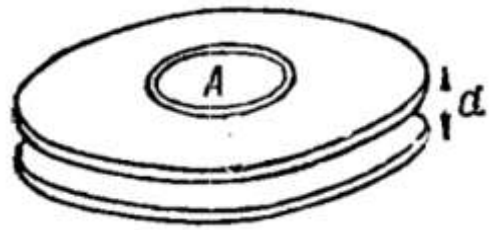
Sanlı mısál keltiremez. Mınaday parametrlerge iye bolğan kondensator beretuğın maksimallıq sıyımlıqtı anıqlaw kerek: plastinanıń ishki radiusı $r_2 = 1$ sm, sırtqı radiusı $r_1 = 3$ sm, plastinalardıń arasındagı qashıqlıq $d = 1$ mm, plastinalardıń sanı $n = 40$. Plastinalardıń arasında hawa bar.

Sheshimi. Maksimallıq sıyımlıq $\alpha = 180^\circ$ bolǵanda alınadı. Sonlıqtan (8)-formula boyınsha mınağan iye bolamız:

$$C = \frac{1 \cdot 40 \cdot (3^2 - 1^2) \cdot 180}{1440 \cdot 0,1} \text{ sm} = 400 \text{ sm} \cong 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ mkf.}$$



74-súwret. Ózgermeli sıyımlıqqa iye bolğan kondensatordıń plastinaları.



75-súwret. Qorǵalǵan saqıynaǵa iye kondensator.

§ 150. Potenciallar ayırmasın ólshew. 121-paragrafta elektroskoptıń qurılısın keltirgende onıń japıraqlarınıń ushlarınń bir birinen uzaqlasıw dárejesiniń usı japıraqlardaǵı zaryadtıń ólsheimi bolatuǵınlıǵın kórsetken edik. Biraq, elektroskop sonıń menen birge japıraqlar menen elektroskoptıń korpusınıń arasındaǵı potenciallar ayırmasın da ólsheydi. Japıraqlardı zaryadlaǵanda korpusta indukciyalanǵan zaryadlar payda boladı; eger bunday jaǵdayda korpus Jer menen tutastırılǵan bolsa, onda korpusta belgisi japıraқтаǵı zaryadlardıń belgisine qarama-qarsı bolǵan zaryadlar qaladı. Elektroskoptıń japıraqları menen onıń korpusı kondensatordıń eki astarınıń xızmetin atqaradı; japıraqlarda toplanǵan zaryadtıń muǵdarı Q qanshama kóp bolsa, usı astarlardıń arasındaǵı potenciallar ayırmasınıń shaması da úlken boladı. Solay etip, elektroskoptıń japıraqlarınıń bir birinen uzaqlasıw dárejesi japıraqlar menen korpustıń arasındaǵı potenciallar ayırmasın ólsheydi. Eger elektroskop voltlerde graduırovkalanǵan shkala menen támiyinlengen bolsa, onda onı *elektrostatikalıq volmetr* dep ataydı.

Elektrostatikalıq volmetrdi graduırovkalanıwı *absolyut elektrometr*diń járdeminde orınlawǵa boladı. Principinde, absolyut elektrometrdiń járdeminde ólshelew tegis kondensatordıń eki tegis plastinalarınıń arasındaǵı potenciallar ayırması arqalı ańlatılǵan tartılıs kúshiniń shamasın ólshewge alıp kelinedi. Plastinaları sheksiz úlken bolǵan tegis kondensator ushın keltirip shıǵarılǵan formulalardı paydalanıwıń múmkinshiligine iye bolıw ushın *qorǵalǵan saqıynaǵa* iye bolǵan kondensator qullanıladı. Bir birine parallel hám gorizont baǵıtında jaylasqan eki diskten turatuǵın kondensatordı kóz-aldımızǵa elesleteyik; joqarǵı diskte úlken bolmaǵan A bólimi qalǵan bólimnen juqa sańlaq penen ayırılǵan. Sonlıqtan maydanniń bir tekli bolmawı tek plastinalardıń shetlerinde ǵana orın aladı (75-súwret).

Sonlıqtan, orta bólimdegi sıyımlıq tegis kondensatordıń sıyımlıǵı ushın jazılǵan formula boyınsha ańǵartıladı:

$$C = \frac{\varepsilon S}{4\pi d}.$$

Bul ańlatpada S arqalı A plastinasınıń betiniń maydanı, al d arqalı plastinalardıń arasındaǵı qashıqlıq belgilengen. A plastinasına tásir etetuǵın kúsh tómengi plastina tárepinen payda etilgen maydanniń kernewliginiń usı A plastinasınıń zaryadı Q ǵa kóbeytkenge teń. Kondansatordıń ishindegi tómendegi plastina usı kondensatordıń ishindegi tolıq kernewlik E den eki ese kem bolǵan maydanniń kernewligin payda etedi; demek, A plastinasına tásir etetuǵın kúsh

$$f = \frac{E}{2} \cdot Q \quad (1)$$

ańlatpasınıń járdeminde esaplanadı. $E = \frac{V_1 - V_2}{d}$ hám $Q = C(V_1 - V_2)$ teńlikleriniń orın alatuǵınlıǵın názerde tutıp ($V_1 - V_2$ arqalı plastinalardıń arasındaǵı potenciallar ayırması)

$$f = \frac{C(V_1 - V_2)^2}{2d}$$

formulasına iye bolamız. Bul formulaǵa (1)-formula boyınsha sıyımlıq C tiń mánisin qoyıp

$$f = \frac{\varepsilon S}{8\pi d^2} (V_1 - V_2)^2 \quad (2)$$

añlatpasına iye bolamız, yaǵnıy óz-ara tásirlesiw kúshi f potenciallar ayırması $V_1 - V_2$ arqalı añlatıladı eken.

Eger plastinalardıń arasında hawa bolsa, onda $\varepsilon = 1$ hám (2)-teńlikten

$$V_1 - V_2 = d \sqrt{\frac{8\pi f}{S}}$$

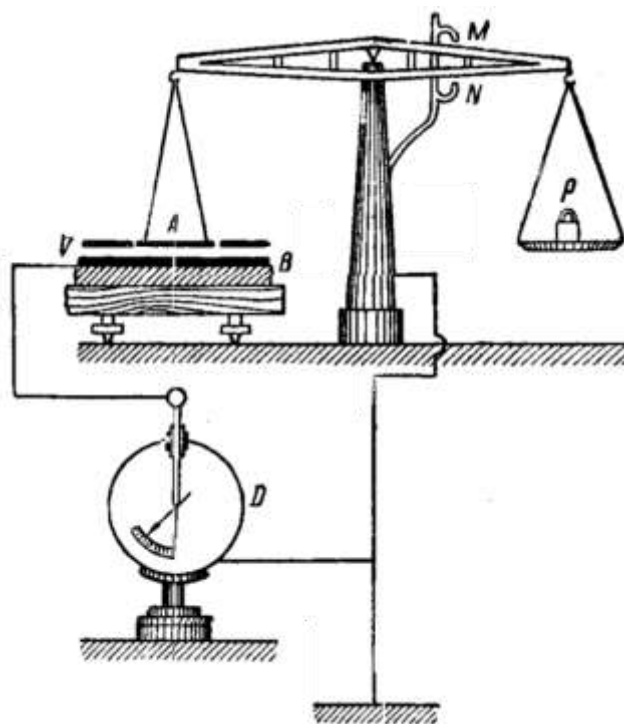
formulasına iye bolamız. Solay etip, plastinalardıń arasındaǵı qashıqlıq d hám plastinalardıń betiniń maydanı S ti anıqlap jáne f ti ólshep, $V_1 - V_2$ potenciallar ayırmasın absolyut ólshemde anıqlaymız.

Eger táreziniń pálleleriniń birin basqa zaryadlangan plastınaǵa tartılatuǵın plastına menen almastırsaq f kúshin "salmaqtı" ólshew jolı menen anıqlawǵa boladı. "Salmaǵın ólshew" usılı menen elektrlik shamalardı ólshew usılı ingliz fizigi Tomson tárepinen islep shıǵıldı. 76-súwrette sol principke tiykarlangan elektrostatikalıq D voltmetrin graduırovkalanadıń sxeması kórsetilgen. Ádettegi táreziniń pállesiniń biri alıp taslangan hám A kondensatorınıń ortańǵı bólimi menen almastırılǵan. Eger bul kondensatordıń joqarǵı plastinkasın qorgawshı saqıyna hám táreziniń barlıq korpusı menen Jerge tutastırsaq hám kondensatordıń Jerden izolyaciylanǵan tómengi plastinkanı bazı bir V potencialǵa shekem zaryadlasa, onda joqarǵı plastinkanıń orta bólimi tómengi plastınaǵa tartılardı; táreziniń teń salmaqlıq halın saqlaw ushın ekinshi pállege P júgin salıw kerek. Usı P júgi f kúshin ólsheydi. Bunnan keltirip shıǵarılǵan formulanıń járdeminde V potencialın anıqlaymız (Jerdiń potencialı $V_2 = 0$). Graduırovkalanatuǵın D voltmetriniń japıraqları B plastinkası menen tutastırılǵan, al onıń qasnaǵı Jerge tutastırılǵan; usınday jollar menen V potencialı graduırovkalanatuǵın voltmetrdiń japıraqlarınıń potencialın ólsheydi.

Bir tárepten kishkene girler menen, al ekinshi tárepten plastinkalardıń arasındaǵı tartılıs kúshi menen teńlestirilgen tárezi ornıqlı teń salmaqlıqta turmaydı hám bul jaǵday bazı bir qıyınshılıqtı payda etedi. Júktiń júdá kishi shamaǵa úlken bolıwı plastinkalardıń arasındaǵı qashıqlıq d nıń ózgeriwine, al bul jaǵday tartılıs kúshiniń kishireyiwine alıp keledi. Nátiyjede táreziniń teń salmaqlıǵı onnan beter buzılardı. Kerisinshe, eger girlerdiń salmaǵı kishirek bolsa, onda kondensatordıń plastinkaları bir birine jaqınlasadı, al olardıń arasındaǵı tartılıs kúshi úlkeyedi. Bunday qolaysızlıqtan qutılıw ushın táreziniń oǵına M hám N irkiwshilerin ornalastırardı. Tartılıs kúshiniń shaması táreziniń oǵın irkiwshilerdiń birinen alıp ketetuǵın júktiń shaması boyınsha anıqlanadı.

Joqarıda táriyiplengen japıraqları bar elektrometrler kishi sezgirlikke iye. Japıraqlardıń ekewine de birdey shamadaǵı hám belgidegi Q zaryadı beriledi; iyteriw kúshiniń shaması bolsa japıraqlardıń zaryadlarınıń kóbeymesine, yaǵnıy zaryadtıń kvadratı Q^2 qa propoprncional. Q zaryadı kishi bolǵanda Q^2 shaması, usıǵan sáykes iyterisiw kúshi kishi. Biraq, eger sol Q zaryadın E elektr maydanına jaylastırsa, onda zaryadqa tásir etetuǵın kúsh QE ge proporcional boladı hám, usınıń saldarınan maydannıń kernewligi E jetkilikli dárejede úlken bolǵanda kishi Q bolǵan jaǵdayda da úlken kúshti payda etiwge boladı.

76-súwret.
Elektrostatikalıq voltmetrdi absolyut
elektrometrдің járdeminde
graduırovkalawdıń sxeması.

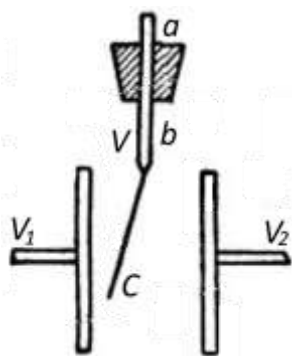


Eń ápiwayı túrde bul princip 77-súwrette keltirilgen elektroskopta paydalanılǵan. Jeńil metall bc japıraq $V_1 - V_2$ potenciallar ayırması túsirilgen eki plastinkalardıń arasında ildirilgen. bc japıraǵın zaryadlaǵanda ol awısadı. Joqarı sezgirlikten basqa bul elektroskop ádettegi elektroskopqa salıstırǵanda jáne bir artıqmashlıqqa iye boladı. Ol awısıwdıń baǵıtı boyınsha bc jarıpaǵına berilgen zaryadtıń belgisin anıqlay aladı.

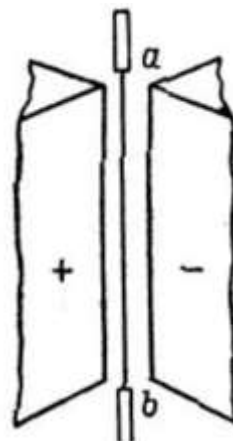
Usı princip tarlı elektrometr dep atalatuǵın házirgi zaman laboratoriyalıq elektrometrinde paydalanılǵan.

Júdá jıńışke platina sımı (juwanlıǵı shama menen 2-3 mkm) vertikal baǵıtta metall prizmalardıń (pıshaqlardıń) ortasında kerilgen (78-súwret). Prizmalar bir birinen izolyaciyalanǵan hám olar arasındaǵı potenciallar ayırması $V_1 - V_2$ shamasına jetkenshe zaryadlanǵan. Platina sim izertlenetuǵın elektr deregi menen tutastırıladı. Zaryadlaǵanda, zaryadtıń belgisine ǵárezli sim anaw yamasa mınaw prizmaǵa qaray tartıladı. Bul mayısıwdı mikroskoptıń járdeminde baqlaw yamasa foto súwretin túsiriw jolı menen ólsheuge boladı. Tarlı elektrometrlerdiń sezgirligi 0,01 v ke shekem jetedi hám kishi massaǵa iye bolǵanlıqtan, sabaq tez arada teń salmaqlıq halına keledi. Bul tarlı elektrometrdiń áhmiyetli qásiyeti bolıp tabıladı hám bul jaǵday waqıtqa baylanıslı tez ózgeretuǵın zaryadlardı registraciyalawǵa hám ólsheuge múmkinshilik beredi.

Eń aqırında kvadrant elektrometr dep atalatuǵın potenciallardıń júdá kishi bolǵan ayırmasın ólsheuge ushın soǵılǵan bir elektrometrdi qaraymız. Cilindr formasına iye bolǵan metall qutı (79-súwrette bul qutınıń ishki bólimi planda hám kesimde berilgen) radiusları boyınsha bir birinen izolyaciyalanǵan tórt kvadrantqa bólingen. Bul qutınıń ishinde jıńışke sabaqqa 8 tárizli strelka asıp qoyılǵan. Eger strelkanıń kósherin kvadrantlardı bólip turatuǵın kesimlerdiń biriniń baǵıtında jaylastırsaq hám onı baǵı bir V_0 potencialına shekem zaryadlasa hám barlıq kvadrantlardı Jer menen tutastırsaq, onda simmetriyaǵa baylanıslı strelka teń salmaqlıqta qaladı. Kvadrantlardaǵı dál simmetriyaǵa jetisiw qıyın bolǵanlıqtan, olardıń birin qozǵalatuǵın etip soǵadı hám strelkanı zaryadlap, kvadranttı teń salmaqlıq júzege kelgenshe jılastıradı. Bunnan keyin eki qarama-qarsı kvadrantqa V_1 , al qalǵan ekewine V_2 potenciali beriledi. Ásbaptıń teoriyası strelkanıń keń sheklerdegi burılıwınıń $V_1 - V_2$ potenciallar ayırmasına proporcional ekenligin kórsetedi. Solay etip, strelkanıń burılıwı boyınsha potenciallar ayırması ólshenedi. Strelkanıń burılıwı optikalıq jollar menen strelka ildirilgen sabaqqa bekitilgen S aynasınıń járdeminde ólshenedi.



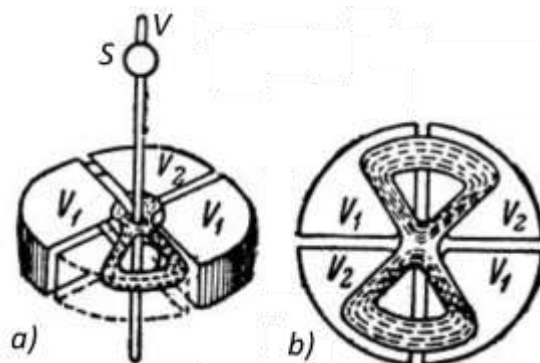
77-súwret. Zaryadlangan plastinkaları bar elektroskop.



78-súwret. Tarlı elektrometr.

Kvadrant elektrometr joqarı sezgirlikke iye: onıń járdeminde 1 v bolǵan potenciallar ayırmasın 0,001 v dállikte ólshewge boladı. Strelkanıń terbelisiniń úlken dáwirge iye bolıwı kvadrant elektrometrdiń kemshiligi bolıp tabıladı.

79-súwret.
Kvadrant elektrometr.



§ 151. Júdá kishi zaryadları ólshew. Elektronnıń zaryadı. Mikroskopiyalıq tamshılardı toplanǵan júdá kishi bolǵan zaryadları ólshewdiń ápiwayı usılı bar. Bul usıldıń ideyasınıń mánisi tómendegilerden ibarat. Meyli, oń $+q$ zaryadına iye bolǵan mikroskopiyalıq tamshı tegis kondensatordıń gorizont baǵıtındaǵı parallel plastinkalardıń arasında turǵan bolsın (80-súwret).

Eger joqarǵı plastinka teris, al tómengi plastinka oń zaryadqa iye bolsa, onda tamshıǵa *joqarı qaray baǵıtlanǵan*

$$f = Eq$$

shamasındaǵı elektr kúshi tásir etedi. Bul teńlikte E - kondensatordıń plastinalarınıń arasındaǵı maydanniń kernewligi. Bul kúsh tamshınıń salmaq kúshi p ǵa qarama-qarsı baǵıtta tásir etedi.

Bul kúshlerdiń absolyut shamaları bir birine teń bolǵanda

$$Eq = p \quad (1)$$

teńligi orınlı boladı hám bul jaǵdayda tamshı kondensatordıń plastinalarınıń arasında qozǵalmay ildirilip turadı.

Maydanniń kernewligi E ni potenciallar ayırması $V_1 - V_2$ hám plastinalardıń arasındaǵı qashıqlıq d arqalı ańlatıp, mına teńlikti alamız:

$$E = \frac{V_1 - V_2}{d}.$$

Bunnan, (1)-ańlatpa boyınsha, tamshıdaǵı zaryad q dıń shaması mınaǵan teń boladı:

$$q = p \frac{d}{V_1 - V_2}. \quad (2)$$

Tamshınıń salmaǵı bolǵan p nı, plastinalardıń arasındaǵı qashıqlıq d nı hám tamshınıń plastinkalardıń arasında qozǵalmay ildirilip turıwı ushın zárúrli bolǵan $V_1 - V_2$ potenciallar ayırmasın bilip, (2)-formula boyınsha q zaryadınıń shamasın anıqlaymız.

Hawadaǵı tamshınıń salmaǵı p nı usı tamshı payda bolǵan zattıń tıǵızlıǵı ρ nı hám onıń radiusı r di biliw jolı menen anıqlawǵa boladı:

$$p = \frac{4}{3} \pi (\rho - \rho') r^3 g. \quad (3)$$

Bul teńlikte g - salmaq kúshiniń tezleniwi hám ρ' - tamshı jaylasqan ortalıqtıń (hawanıń) tıǵızlıǵı.

Tamshınıń radiusı r di elektr maydanı bolmaǵan jaǵdaydaǵı salmaq kúshiniń tásirindegi onıń tómenge qaray túsiw tezligi boyınsha anıqlanadı. I tomnıń 42-paragrafındaǵı bayanlanganday, bunday túsiwdiń tezligi v nıń mánisi Stoks formulasınıń járdeminde anıqlanadı:

$$v = \frac{2}{9} \frac{\rho - \rho'}{\eta} \cdot g r^2, \quad (4)$$

Bul teńlikte ρ' - tamshı tómenge karay túsetuǵın ortalıqtıń tıǵızlıǵı, η - sol ortalıqtıń jabısqaqlıǵı (bul jaǵdayda hawanıń). ρ , ρ' jáne η shamaların bilip hám tamshınıń túsiw tezligi v nı ólshep, (4)-formula boyınsha onıń radiusı r di tabamız.

Bul usıl júdá kishi bolǵan zaryadlardı ólshewge múmkinshilik beredi. Haqıyqatında da, mikroskoptıyalıq tamshınıń radiusı $r = 10^{-4} \text{ sm}$ hám onıń tıǵızlıǵı $\rho = 1 \text{ g/sm}^3$ (hawanıń tıǵızlıǵı ρ' tı esapqa almaymız) bolǵan jaǵdayda onıń massası $m = \frac{4}{3} \pi \rho r^3 \cong 4 \cdot 10^{-12} \text{ g}$ shamasında boladı. Plastinalardıń arasınıdaǵı qashıqlıq $d = 2,5 \text{ sm}$ hám potenciallar ayırmasın $V_1 - V_2 = 3000 \text{ v}$ dep boljayıq (bul potencialdıń 10 CGSE-birligine teń). Bunday jaǵdayda (2)-formula boyınsha:

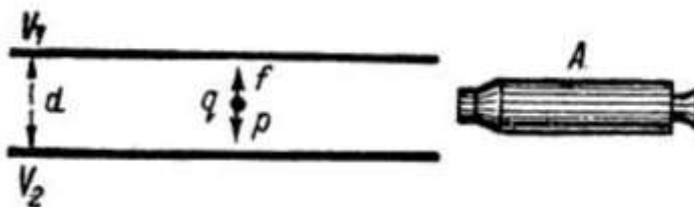
$$q = 4 \cdot 10^{-12} \cdot 981 \cdot \frac{2,5}{10} \text{ CGSE}.$$

Bunnan

$$q \cong 10^{-9} \text{ CGSE}$$

shamasına iye bolamız. Solay etip, shama menen 10^{-9} CGSE muǵdarındaǵı zaryadtı ólshewge boladı eken.

Milliken bul usıldı elektronnıń zaryadın dál ólshew ushın paydalandı. Kondensatordıń plastinalarınıń arasına mikroskoptıyalıq may tamshıları úrlendi. Olar hawa menen súykelistiń saldarınan zaryadlanadı. Tamshılar qaptal tárepten jaqtılıqtıń dereginiń járdeminde jaqtılandırılǵan hám A mikroskoptınıń járdeminde baqlanǵan (80-súwret). Plastinalardıń arasındaǵı $V_1 - V_2$ potenciallar ayırmasın saylap alıw jolı menen bazı bir tamshılardıń qozǵalmay ildirilip turıwına jetisiwge boladı.



80-súwret.

Kondensatordıń plastinkalarınıń arasında ildirilip turǵan tamshı usılı boyınsha zaryadtı anıqlaw.

Bunnan keyin kondensatordıń arasındaǵı hawa rentgen nurları menen jaqtılandırılǵan. Rentgen nurları hawanı ionlastıradı, yaǵnıy hawada zaryadlangan molekulalardı hám erkin elektronlardı payda etedi. Bunday jaǵdayda ayırım tamshı iondı yamasa elektrondı tutıp alıp, óziniń zaryadın tosattan ózgerterdi; zaryadtıń ózgerisi tamshınıń teń salmaqılıǵına tásir etedi. Solay

etip, tek tamshınıń dáslepki zaryadınıń muǵdarın ǵana emes, al tájiriybeni ótkeriw waqtında tamshınıń zaryadınıń qansha shamaǵa ózgergenligin de anıqlawdıń múmkinshiligi boldı.

Millikenniń ólshewleri tamshılardıń zaryadı q dıń barlıq waqıtta da eń kishi bolǵan e zaryadınan pútin san eselengen muǵdarda bolatuǵınlıǵın kórsetti:

$$q = ne.$$

Bul teńlikte n - pútin san. Bul ólshewler elektr zaryadlarınıń úzlikli ekenligin tikkeley dálilledi hám elementar zaryad e niń shamasın ólshew múmkinshiligin berdi. Bul elektr zaryadı bar bolǵan bóleksheniń - elektronniń elementar elektr zaryadı bolıp tabıladı.

Sońǵı waqıtları Milliken usılı jáne basqa da usıllar menen ótkerilgen tájiriybeler elektronniń zaryadınıń

$$e = 4,802 \cdot 10^{-10} \text{ CGSE} = 1,601 \cdot 10^{-19} \text{ k}$$

shamasına, al erkin elektronlardıń ústinen ótkerilgen tájiriybeler olardıń zaryadınıń teris belgige iye ekenligin hám massasınıń

$$m_0 = 9,107 \cdot 10^{-28} \text{ g}$$

shamasına teń ekenligin kórsetti¹¹.

Denelerdi elektrlew boyınsha ótkerilgen ádettegi tájiriybelerde denelerdiń zaryadlarınıń úziksiz ózgeretuǵınday bolıp kórinedi, sebebi ayırım elektronniń zaryadı dım kishkene. Milliken tájiriybelerinde baqlanatuǵın shań bóleksheleri (tamshılar) júdá kishkene hám olardaǵı zaryadlardıń muǵdarı bir neshe elektronniń zaryadınday. Bunday jaǵdayda zaryadlardıń sekirmeli, úzlikli ózgerisleri tikkeley baqlanadı.

Elektrlik kúshlerdiń salıstırmalı úlken ekenligin atap ótiw kerek: mikroskopiyaǵı tamshı júdá úlken sandaǵı atomlardan turadı, biraq, soǵan qaramastan elektrlik kúshitiń tamshınıń salmaǵına teń bolıwı ushın bir neshe artıq elektronlardıń bolıwı jetkilikli.

Elektronniń zaryadı menen massasın ayqın túrde kóz aldıda keltiriw ushın, tómendegidey esaplawdı orınlaymız: radiusı $r = 1 \text{ sm}$ bolǵan tutas mıs sharık 3000 v potencialǵa shekem teris zaryadlanadı; onıń ushın kerek bolatuǵın elektronlardıń sanın esaplaymız.

Shariktiń zaryadı

$$Q = C \cdot V = 1 \cdot \frac{3000}{300} = 10 \text{ SGSE}.$$

Bir elektronniń zaryadı $e = 4,803 \cdot 10^{-10} \text{ CGSE}$ shamasına teń bolǵanlıqtan, elektronlardıń izlenip atırǵan sanı n mınaǵan teń:

$$n = \frac{10}{4,8 \cdot 10^{-10}} \cong 2,1 \cdot 10^{10};$$

Solay etip, sharikke $2,1 \cdot 10^{10}$ artıq elektrondı beriw kerek. Bul sannıń ózi úlken san bolsa da, shariktiń quramına kiretuǵın atomlardıń sanına salıstırǵanda dım kishi. Haqıyqatında da, shariktiń massası

$$m = \frac{4}{3} \pi \rho r^3 = \frac{4}{3} \cdot 3,14 \cdot 8,9 \cdot 1^3 \text{ g} \cong 37 \text{ g},$$

yaǵnıy mistiń atomlarınıń shama menen $\frac{1}{2}$ molın quraydı. Demek, shariktegi mıs atomlarınıń sanı $\frac{6,02 \cdot 10^{23}}{2} \cong 3 \cdot 10^{23}$ shamasına teń. Bunnan, qosılǵan elektronlardıń sanınıń atomlardıń sanınıń $\frac{1}{1,5 \cdot 10^{13}}$ úlesin quraytuǵınlıǵı kelip shıǵadı.

Eń aqırında sharikke berilgen elektronlardıń massasınıń júdá kishi ekenligin atap ótiw júdá qızıqlı: bul massa ushın $m_1 = nm_0 = 2,1 \cdot 10^{10} \cdot 9,1 \cdot 10^{-28} \text{ g} \cong 1,9 \cdot 10^{-17} \text{ g}$ shamasın alamız. Bul massa mikroskopiyaǵı shań bólekshesiniń massasınan júzlegen mırnı ese kishi. Bunnan elektronlar massaǵa iye bolsa da, ámelde isleniwi múmkin bolǵan denelerdi elektrlew qubılısı

¹¹ Házirgi waqıtları (2022-jıldıń bası) elementar zaryad ushın xalıq aralıq sistemada $1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19} \text{ K}$, al SGSE sistemasında $4,803\,204\,712\,570\,263 \cdot 10^{-10}$, al SGSM-sistemasında $1,602\,176\,634 \cdot 10^{-20}$ mánisleri qabıl etilgen. Al elektronniń massası $9,109\,383\,7015 \cdot 10^{-28} \text{ gramm}$ (Awdarıwshılar).

denelerdiń massasınıń ózgeriwi menen pútkilley baylanıslı emes.

Elektronlar teris zaryadqa iye. Bizlerdiń kórsetip ótkenimizdey, házirgi waqıtları *pozitronlar* dep atalatuǵın oń zaryadlangan elektronlar da ashılǵan. Kórinip turǵanıday, olardıń zaryadları absolyut mánisi boyınsha elektronnıń zaryadına dál teń keledi. Tap sol sıyaqlı olardıń massası da elektronlardıń massasıday. Biraq, pozitronlar atomlıq yadrolardıń yamasa fotonlardıń aylanıslarında payda boladı hám erkin halda júdá kısqa waqıt jasaydı (III tomǵa qarańız). Sonlıqtan, denelerdiń elektrlik qásiyetlerine, elektr toǵınıń payda bolıwına h.t.b. máselelerge baylanıslı bolǵan barlıq tallawlarda tek elektronlar haqqında gáp etiwge tuwrı keledi.

Kondensatordıń plastinkalarınıń arasındaǵı ilinip turǵan tamshı menen ótkerilgen tájiriybelerde qE elektrlik kúshi menen p salmaq kúshiniń tolıq teń salmaqlıǵına erisiw qıyın. Biraq, tolıq teń salmaqlıqtıń ornawı talap etilmeydi.

Meyli, elektrlik kúshler bolmaǵan jaǵdayda tek salmaq kúshiniń tásirinde tamshı hawada turaqlı v_0 tezligi menen túsetuǵın bolsın. Stoks nızamı boyınsha bul tezliktiń shaması p salmaq kúshine proporcional. Tamshını joqarı qarap tartatuǵın elektr maydanı bar bolǵanda tamshıǵa salmaq kúshi menen elektr maydanı tárepinen tásir etetuǵın kúshtiń ayırması bolǵan $p - qE$ shamasına teń kúsh tásir etedi. Bul kúshtiń tásirinde tamshı v_1 tezligi menen teń ólshewli qozǵaladı; bul tezlik $p - qE$ kúshine proporcional bolǵanlıqtan

$$\frac{v_0}{v_1} = \frac{p}{p - qE}$$

teńligin alamız. Bunnan tamshınıń zaryadı ushın

$$q = \frac{p}{Ev_0} (v_0 - v_1) \quad (5)$$

formulasına iye bolamız. Bul ańlatpaǵa (3)-formula boyınsha anıqlanǵan tamshınıń salmaǵı p nı qoysaq, onda tamshınıń zaryadı ushın

$$q = \frac{4}{3}\pi \frac{(\rho - \rho')r^3 g}{Ev_0} (v_0 - v_1)$$

formulasın alamız. Tamshınıń radiusın Stoks formulası (4) ten tabamız:

$$r = \sqrt{\frac{9\eta v_0}{2(\rho - \rho')g}}.$$

r ushın jazılǵan bul ańlatpanı q ushın jazılǵan ańlatpaǵa qoyıp,

$$q = \frac{4}{3}\pi \left(\frac{9}{2}\eta\right)^{3/2} \cdot \left[\frac{1}{g(\rho - \rho')}\right]^{1/2} \cdot \frac{(v_0 - v_1)v_0^{1/2}}{E} \quad (6)$$

formulasına iye bolamız.

Tamshınıń túsiw tezlikleri bolǵan v_1 hám v_0 shamaları shkala menen támiyinlengen mikroskoptıń hám sekundomerdiń járdeminde ólshenedi. (6)-formulaǵa kiretuǵın barlıq basqa shamalardı da tikkeley ólshewge boladı. Sonday jollar menen q anıqlanadı.

III keste.

Tamshınıń baqlanǵan zaryadları $\times 10^{10}$	Pútın san eselengen 4,917 shamaları
19,66	$4,917 \times 4 = 19,66$
24,60	$4,917 \times 5 = 24,59$
29,62	$4,917 \times 6 = 29,50$
34,47	$4,917 \times 7 = 34,42$
39,38	$4,917 \times 8 = 39,34$
44,42	$4,917 \times 9 = 44,25$

Joqarıda aytılip ótilgenindey, ólshewler tamshınıń zaryadınıń elementar zaryad e ge proporcional ekenligin kórsetti. Millikenniń jumısınan alınǵan kesteni keltiremiz (III keste); bul kestedegi birinshi baǵanada tamshılardıń baqlawlarda alınǵan zaryadları, al ekinshi baǵanada zaryadtıń CGSE-birligindegi

4,917 muǵdarına pútin san eselengen shamalar keltirilgen

Keste tamshılardıń bazı bir elementar zaryadtan pútin san eselengen zaryadqa iye bolatuǵınlıǵın kórsetedi. Bul kestededi keltirilgen maǵlıwmatlar boyınsha, usınday elementar zaryadtıń shamasınıń $4,917 \cdot 10^{-10} \text{CGSE}$ shamasına teń etip qabıl etiliwi kerek. Biraq, keyinirek Milliken ózi paydalangan kishi tamshılar ushın Stoks nızamına dúzetiwdi kirgiziwdiń kerek ekenligin kórsetti. Nátiyjede, uzaq waqıtlar dawamında ótkerilgen ólshewlerdiń nátiyjesinde ol 1916-jılı elektronnıń zaryadı ushın $e = -4,774 \times 10^{-10} \text{CGSE}$ shamasın aldı.

Bunnan keyin Milliken paydalangan hawanıń jabısqaqlıǵı η ushın dúzetiwler kirgizildi; onnan keyin elektronnıń zaryadı ushın tekste keltirilgen $e = -4,803 \times 10^{-10} \text{CGSE}$ shaması alındı.

§ 152. Elektrostatikalıq maydannıń tábiyatı. Joqarıdaǵı paragraflardıń mazmunı zaryadlangan deneni qorshap turatuǵın keńislikte qanday da bir ózgerislerdiń bolatuǵınlıǵın kórsetti. Bul ózgerislerdiń bolǵanlıǵın usı keńislikke qálegen basqa zaryadlangan deneni ornalastırǵanda oǵan kúshtiń tásir etetuǵınlıǵınan belgili. Biz kúshlerdiń zaryadlarǵa tásir etiwinen ibarat bolǵan bul qásiyetti kernewlik vektorı $\mathbf{E}$ niń járdeminde táriyipleidik, al zaryadlarǵa tásir etiw orın alatuǵın barlıq oblasttı *elektrostatikalıq maydan* dep atadıq. Maydannıń hár bir noqatı $\mathbf{E}$ vektorınıń belgili bolǵan mánisi menen táriyiplenedi. $\mathbf{E}$ niń mánisleriniń jıynaǵın qolaylı túrde grafikalıq súwretlew ushın biz kernewlik sıızqları túsiniǵın kirgizdik. Eń aqırında, zaryadlardı elektrostatikalıq maydanda qozǵaǵanda islengen jumıstıń xarakteristikası ushın maydannıń hár bir noqatında belgili bolǵan mániske iye bolatuǵın, yaǵnıy noqattan noqatqa ótkende ózgeretuǵın potencial V túsiniǵı kirgizildi.

123-paragrafta kórsetkenimizdey, elektrostatikalıq maydannıń qásiyetlerin táriyiplew dáslep formallıq xarakterge iye boldı hám tartısıw maydanınıń matematikalıq teoriyasına sáykes dúzildi. Usınıń menen birge elektr kúshleri de, pútkil dúnyalıq tartılıs kúshleri de bir zamatta alıp beriledi (jetip baradı), olar aralıqlıq keńisliktiń hesh qanday áhmiyeti bolmaǵan "úlken aralıqlardan tásir etisiw" dep boljandı.

Usınday kóz-qaraslar idealistlik xarakterge iye hám onıń durıs emes ekenligi XVII ásirde bir qatar alımlar, olardıń ishinde elektrlik kúshler barlıq keńislikti toltırıp turǵan ortalıq bolǵan efirdiń bóleksheleriniń aylanıwı menen baylanıslı dep esaplaǵan M.V.Lomonosov tárepinen kórsetildi.

XIX ásirdiń birinshi yarımında elektr maydanı ideyası M.Faradey (1791-1867) tárepinen ayırıqsha keń túrde paydalanıldı. Elektrlik qubılıslar haqqındaǵı tálimattıń bunnan bılay rawajlanıwı elektr maydanınıń bar ekenligi haqqındaǵı ideyanıń durıs ekenligin tastıyıqladı hám "úlken aralıqlardan tásir etisiw" gipotezasınan bas tartıwǵa májbúrledi. Bir biri menen tásirlesetuǵın zaryadlardıń arasında elektr maydanı bar boladı, onıń obektivlik qásiyetleri maydannıń kernewligi $\mathbf{E}$ hám potencialı V sıyaqlı shamalardıń járdeminde anıqlanadı.

Biraq, elektr maydanı teoriyasın rawajlandırǵan fiziklerdiń sol waqıtları bárshe tárepinen qabıl etilgen mexanikalıq kóz-qaraslardan kelip shıqqanlıǵın atap ótiw kerek: olar elektrostatikalıq qubılıslardı olardıń mexanikalıq modelin qurıw jolı menen túsindiriwge tırıstı. Kernewlik sıızqlarına olardı bazı bir serpimli ortalıqtaǵı mexanikalıq kernew sıpatında qarap, mexanikalıq mánis berildi. Kernewlik sıızqların bir zaryadtan ekinshisine tartılǵan kerilgen serpimli sabaqlar túrinde jiyi qaradı. Sabaqlardıń keriliwin hár qıylı belgige iye zaryadlardıń arasındaǵı óz-ara tartısıwǵa sáykes keledi dep túsindirildi, al sabaqlarǵa normal baǵıtlangan basım bolsa sabaqlardıń bir birinen iyteriliwin támiyinleydi dep birdey belgige iye zaryadlar menen zaryadlangan denelerdiń bir birinen iyteriliwin túsindiriwge tırısқан. Bul teoriya bizge belgili bolǵan barlıq zatlardıń ishine kiretuǵın hám barlıq bos keńislikti toltırıp turatuǵın universallıq serpimli ortalıqtıń - *dúnyalıq efirdiń* bar bolıwın talap etti. Sol efirdegi tolqınlıq processtıń tarqalıwı jaqtılıq qubılısların túsindiriwı kerek boldı.

Biraq, XIX ásirdiń aqırındaǵı jańa ilimiy ashılıwlardıń aldında mexanikalıq efir gipotezası durıs bolıp shıqpadı. Kóp sanlı faktler taza mexanikalıq qubılıslarǵa alıp kelinbeytuǵın elektrlik

processlerdiń ayrıqsha tábiyatın anıqladı. Elektrik processlerdi mexanikalıq kóz-qaraslar tiykarında túsindiriwden bas tartıw materialistlik túsindiriwden bas tartıw degendi ańǵartpaydı.

...

Elektrostatikalıq maydanniń reallıǵın tastıyıqlaytuǵın faktlardıń qatarına tómendegiler kiredi. Biz joqarıda (138-paragraf) elektrostatikalıq maydanniń energiyasınıń bazı bir kólemlik tıǵızlıq penen tarqalǵan mánisi menen táriyiplenetuǵınlıǵın kórgen edik. Keyinirek maydanniń shekli tezlik penen tarqalatuǵınlıǵı ashıldı. Elektromagnit indukciyası ústinen islengen Faradeydiń tájiriybeleri elektrlik hám magnitlik qubılıslardıń arasında tıǵız baylanıstıń bar ekenligin kórsetti. XIX ásirdeń 60-jıllarında Maksvell elektromagnit qubılıslarınıń ulıwmalıq teoriyasın rawajlandırıdı hám elektrostatikalıq maydanniń óziniń tábiyatı boyınsha ulıwma bolǵan *elektromagnit maydanınıń* dara jaǵdayı ekenligin kórsetti. Bul teoriya óziniń ishine kóp sanlı elektrlik hám magnitlik qubılıslardı qamtıdı; teoriya elektromagnit tolqınlardıń ashılıwına alıp keldi hám jaqtılıqtıń elektromagnitlik tábiyatın túsindirdi. Solay etip, elektromagnit maydan haqqındaǵı kóz-qarasqa tiykarlanǵan elektrlik, magnitlik hám optikalıq qubılıslardıń birden-bir teoriyası payda boldı.

Maksvell teoriyası dúnyalıq efir teoriyasın tastıyıqlaǵanday bolıp kórinde. Keyinirek Lorenc tárepinen rawajlandırılǵan Maksvell teoriyası boyınsha qattı, suyıq hám gaz tárizli deneler turatuǵın atomlar efirge batırılǵan (efirde jaylasqan). Hár bir atom quramalı elektrlik sistema bolıp tabıladı: ol oń zaryadlanǵan yadrodan hám elektronlardan turadı. Solay etip, tek efir hám oń elektr zaryadları (atomlardıń yadroları) hám teris elektr zaryadları (elektronlar) bar dep esaplandı. "Bos" keńislik tek efir menen toltırılǵan qanday da bir dene jaylasqan keńisliktiń bóliminde bul deneniń quramına kiretuǵın atomlardıń zaryadları efirge jabıstırılǵan. Bul zaryadlar efirdegi ózgerislerdi boldıradı, al bul ózgerislerdi biz elektromagnit tolqın tūrinde qabıl etemiz.

Lorenc teoriyasında efirdi qásiyetleri belgili bolǵan mexanikalıq serpilmi denelerdiń qásiyetlerinen ózgeshe bolǵan qozǵalmaytuǵın materiallıq ortalıq dep esaplandı. Efirdiń qásiyetleri elektromagnitlik qubılıslar oblastına tiyisli bolǵan kóp sanlı tájiriybelerde alınǵan maǵlımatlardı ulıwmalastırıwdıń nátiyjesinde kelip shıǵatuǵın Maksvell tárepinen berilgen teńlemelerdiń járdeminde ańlatıladı. Maksvell-Lorenc teoriyası óziniń ishine mexanikaǵa salıstırǵanda qanday da bir jańa "bir nárseni" aladı, ol elektromagnit maydanniń tábiyatın mexanikalıq jaqtan túsindirgen joq. Eski teoriyalardıń mexanikalıq efir óziniń ornın elektromagnit efirge bosatıp berdi.

Biraq, *efirdi tutas ortalıq hám, sonlıqtan, onı qálegen mexanikalıq tutas ortalıq sıyaqlı esaplaw sisteması sıpatında xızmet ete aladı* dep qaraldı (I tomnıń 4-paragrafında ayılǵanlarǵa qarańız). *Efirge salıstırǵanda denelerdiń qozǵalıstı, mısalı Jer sharınıń qozǵalıstı haqqında aytıwǵa boldı.* Jerdiń efirge salıstırǵandaǵı tezligin anıqlaw ushın ótkerilgen Maykelsonnıń tájiriybeleri (III tomǵa qarańız), sonıń menen birge Truton menen Nobldiń tájiriybesi hám basqa da bir qatar tájiriybeler (216-paragraf) unamı nátiyjelerge alıp keldi. Salıstırmalıq teoriyası bul tájiriybelerdiń nátiyjelerin ulıwmalastırdı hám efirge salıstırǵandaǵı absolyut qozǵalıstıń bolmaytuǵınlıǵın kórsetti. Bul efir menen tutas mexanikalıq ortalıqlardıń arasındaǵı eń sońǵı analogıyanı buzdı. Biz qálegen qozǵalıstıń salıstırmalı ekenligin hám onı izertlegende esaplaw sistemasınıń zárúr bolatuǵınlıǵın bilemiz. Usıǵan baylanıslı, tariyxıy jaqtan qozǵalıstı anıqlawda paydalanıw ushın qalıplesken "ortalıq - efir" túsigin házirgi zaman teoriyalıq fizikası paydalanǵandı pútkilley qoydı. Biz endi materiyanıń ayrıqsha túri bolǵan elektromagnit maydanı haqqında gáp etemiz. Elektromagnit maydanı bizge belgili bolǵan mexanikalıq ortalıqlardıń qásiyetlerinen ózgeshe bolǵan qásiyetlerge iye bolıp ǵana qoymay, ol esaplaw sisteması xızmetin de atqara almaydı.

BESINSHI BÓLIM

TURAQLI TOQ

XVI BAP

TURAQLI TOQTÍŇ TIYKARǴI NIZAMLARI

§ 153. Turaqlı toq. Om nızamı. Zaryadlangan bólekshelerdiń orın almasıwı elektr toǵın payda etedi. Bunday jaǵdayda zaryadları alıp júriwshilerdiń hár qıylı bolıwı múmkin. Bazı bir jaǵdaylarda, misalı, elektrolitlik ótkizgishlikte yamasa siyrekletilgen gazlerde payda bolatuǵın oń nurlarda atomlar menen molekulalardıń (ionlar) ózleri zaryad tasıwshılar bolıwı múmkin. Basqa jaǵdaylarda toq elektronnıń qozǵalıwın saldarınan payda boladı (metallardaǵı yamasa katod nurlarındaǵı toq). Biraq, barlıq jaǵdaylarda toqtıń bar bolıwı bazı bir ulıwmalıq qubılıslardıń júzege keliwı, misalı magnit maydanınıń payda bolıwı menen júredi.

Elektr toǵı qubılısı tek zaryadlangan bólekshelerdiń ápiwayı mexanikalıq qozǵalıwı menen ǵana túsindiriledi dep oylawǵa bolmaydı. Birinshiden, qozǵalıwshı zaryadlar menen baylanıslı bolǵan elektr hám magnit maydanları, 152-paragrafta kórsetilgendey, ayrıqsha mexanikalıq emes tábiyatqa iye boladı. Ekinshiden, elementar bólekshelerdiń qozǵalıslarınıń ózi makroskopiyalıq deneler baǵınatuǵın mexanikalıq nızamlarǵa baǵınbaydı (163-paragraf). Biraq, toq penen baylanıslı bolǵan bir qatar máselelerde zaryadlardıń mexanikalıq orın almasıwı kóz-qarasınan paydalanıwǵa boladı hám usınday kóz-qaraslardıń tiykarında ótkerilgen esaplawlar bir qansha jaǵdaylarda tájiriýbelerdıń nátiýjeleri menen jaqsı sáykes keletuǵın nátiýjelerdi beredi. Baska jaǵdaylarda bunday (klassikalıq) kóz-qaraslar jaramsız bolıp qaladı hám qubılıslardı quramalıraq bolǵan (kvantlıq-mexanikalıq) kóz-qaraslardıń tiykarında tallawǵa tuwrı keledi.

Elektr toǵı *toq kúshi* dep atalatuǵın shama menen táriyiplenedi. *Berilgen bet arqalı ótetuǵın toqtıń kúshi I usı bet arqalı waqıt birliginde alıp ótiletuǵın elektr zaryadlarınń muǵdarı menen ólshenetuǵın fizikalıq shama bolıp tabıladi.* Eger Δt waqıtı ishinde maydan arqalı ΔQ muǵdarında elektr zaryadı alıp ótiletuǵın bolsa, onda toqtıń kúshi I mınaǵan teń:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}. \quad (1)$$

Berilgen bettiń maydanı ushın I waqıttıń ótiwi menen ózgermeytuǵın bolsa, onda biz *turaqlı toq* haqqında gáp etemiz.

CGSE-sistemada toqtıń kúshiniń birliǵı sıpatında berilgen maydan arqalı 1 sekund waqıt ishinde elektr zaryadınıń bir CGSE-birliǵı ótiwge sáykes keletuǵın toqtıń shaması qabıl etilgen. Bul birlik júdá kishkene bolǵanlıqtan, *xalıq aralıq birlikler sistemasında toqtıń birliǵı sıpatında berilgen maydan arqalı 1 sek waqıttıń ishinde 1 kulon elektr zaryadı ótetuǵın toq qabıl etilgen; toq kúshiniń bul birliǵın amper dep ataydı.*

Xalıq aralıq birlikler sistemasınıń tórt tiykarǵı birlikleriniń biri sıpatındaǵı anıqlaması 196-paragrafta berilgen.

Amper menen toq kúshiniń elektrostatikalıq birliǵı arasındǵı baylanıs mınaday shárttiń tiykarında ornatıladı:

$$1 \text{ amper} = \frac{1 \text{ kulon}}{1 \text{ sek}} \cong \frac{3 \cdot 10^9 \text{ elektr muǵdarınıń CGSE – birliǵı}}{1 \text{ sek}} \cong \text{toq kúshiniń } 3 \cdot 10^9 \text{ CGSE – birliǵı}.$$

I toq kúshiniń ólshemi (1)-qatnastan alınadı:

$$[I] = \frac{[Q]}{[t]} = L^{3/2} M^{1/2} T^{-2}. \quad (2)$$

Endi birinshi áwlad ótkizgishleri bolǵan metallardaǵı toq qubılısın qaraymız. Ótkizgishlerde

toq hár qıylı potencıallargá iye bolǵan oblastlar bar bolǵan jaǵdayda payda boladı. Bunday jaǵdayda payda bolatuǵın toq ótkizgishtiń hár qıylı bólimlerindegi potencıallar teńleskenshe júredi. Eger ótkizgishtiń uchastkasınıń ushlarındaǵı potencıallar ayırmasın turaqlı etip uslap tursaq, onda bul uchastkada turaqlı toq ótedi.

Tájiriybeler bir tekli ótkizgishtiń uchastkası arqalı ótip atırǵan toqtıń kúshi *I Om nızamın* qanaatlandıratuǵınlıǵın kórsetedi:

$$I = \frac{V_1 - V_2}{R}. \quad (3)$$

Bul ańlatpada $V_1 - V_2$ arqalı ótkizgishtiń uchastkasınıń ushlarındaǵı potencıallar ayırması, al R - ótkizgishtiń usı uchastkasın táriyipleytuǵın shama bolıp, onı uchastkanıń *qarsılıǵı* dep ataydı. Solay etip, Om nızamı toq kúshiniń ótkizgishtiń ushlarındaǵı potencıallar ayırmasına tuwrı proporcional hám ótkizgishtiń usı uchastkasınıń qarsılıǵına kerı proporcional ekenligin kórsetedi.

Om nızamı 1826-jılı Om tárepinen ótkerilgen ólshewlerdiń tiykarında ashıldı. Om galvanikalıq element tárepinen beriletuǵın toq kúshiniń waqıttıń ótiwi menen kemeyetuǵınlıǵın ańǵarǵan (179-paragraftaǵı elektrodlardıń polarizaciyası qubılısın qarańız). Sonlıqtan ol elektr qozǵawshı kúshtiń deregi sıpatında termoparadan paydalandı (172-paragraftı qarańız). Termoparanıń bir dánekerlengen ornın muzda, al ekinshisi qaynap turǵan suwda uslap, ol turaqlı potencıallar ayırmasınıń deregin ala aldı. Toqtıń kúshin Ol toqtıń magnit strelkasına tásiiri boyınsha ólshedi. Bir jıl ótkennen keyin Om maqalasın baspadan shıǵardı hám ol usı maqalasında elektr toǵın naydaǵı sıyıqlıqtıń aǵısı menen salıstırıp, óziniń nızamın teoriyalıq jollar menen keltirip shıǵardı. Biraq, usınday salıstırıw sıyıqlıqtıń tek laminarlıq aǵısı ushın ǵana nızamlı (I tomǵa qarańız) hám turbulentlik aǵıs ushın durıs bolmaydı.

Omnan keyin bul nızam kóp sanlı avtorlar tárepinen tekserip kóridi hám nızamnıń júdá dál orınlanatuǵınlıǵı anıqlandı. Om nızamınan 1 % shamasındaǵı awısıw tek toqtıń júdá úlken bolǵan tıǵızlıqlarında, 1 sm^2 qa bir neshe million amper toq kúshi sáykes keletuǵın jaǵdaylarda ǵana baqlanǵan.

Omniń óziniń tájiriybelerinde de, basqa izertlewlerde de toqtıń kúshi toqtıń magnitlik tásiiri boyınsha ólshengen. Qatań túrde aytqanda, magnitlik tásiirdiń (1)-ańlatpa boyınsha waqıttıń bir birligindegi aǵıp ótken elektr zaryadınıń shamasına teń bolǵan toqtıń kúshine proporcional ekenligin aldın-ala dálillep alıw kerek. (1)-anıqlamaǵa sáykes, belgili sıyımlıqqa iye bolǵan kondensatordı aldın-ala belgili potencıallar ayırmasına shekem zaryadlap, onnan keyin tolıq zaryadsızlanıwǵa májbúrlep, toq kúshin absolyut ólshemde ólshewge boladı. Potencıallar ayırmasın ólshewge, al kondensatordıń sıyımlıǵın onıń geometriyalıq forması boyınsha esaplap tabıwǵa boladı. Biraq, bunday ólshewlerdi is júzinde ótkeriwdi orınlaw qıyın. Sebebi kondensatordı zaryadsızlandırǵanda (razryadlaǵanda) turaqlı toqtı alıwǵa bolmaydı.

Sonlıqtan, házirgi waqıtları toqtıń kúshi (Omniń jumıslarındaǵıday) toqlardıń magnitlik tásiiri, atap aytqanda bir birine parallel bolǵan eki sheksiz uzın ótkizgishlerdiń arasındaǵı óz-ara tásirlesiw kúshi boyınsha anıqlanadı (196-paragrafqa qarańız).

§ 154. Ótkizgishlerdiń qarsılıǵı. Ótkizgishtiń uchastkasınıń qarsılıǵı onıń materialınan, ólshemleri menen formasınan ǵárezli boladı.

Ótkizgishtiń kese-kesiminiń maydanı turaqlı S shamasına teń hám uzınlıǵı l bolǵan jaǵdayda qarsılıq

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1)$$

ańlatpasınıń járdeminde anıqlanadı. Bul ańlatpada ρ - ótkizgishtiń materialınan ǵárezli bolǵan shama *materialdıń salıstırmalı qarsılıǵı* dep ataladı. Solay etip, ótkizgishtiń uchastkasınıń qarsılıǵı onıń uzınlıǵı l ge tuwrı proporcional, al onıń kese-kesimi S ke kerı proporcional

(1)-formuladan mınaǵan iye bolamız

$$\rho = R \frac{S}{l}. \quad (1a)$$

Bunnan ρ salıstırmalı qarsılıqtıń san mánisiniń uzınlıǵı bir birlikke hám kese-kesiminiń maydanı da bir birlikke teń ótkizgishtiń qarsılıǵına teń ekenligi kelip shıǵadı.

Birliklerdiń *CGSE-sistemasında qarsılıqtıń bir birligi sıpatında* ushlarındaǵı potenciallar ayırması potencialdıń bir *CGSE-birligine* teń bolǵan jaǵdayda toq kúshiniń bir *CGSE-birligi* ótetuǵın ótkizgishtiń qarsılıǵı alınadı. Ámeliy islerde bul birlik dım úlken bolǵanlıqtan, *qarsılıqtıń ámeliy birligi sıpatında potenciallar ayırması 1 volt bolǵan jaǵdayda 1 amper toq ótetuǵın ótkizgishtiń qarsılıǵı qabıl etilgen. Bul birlik om dep ataladı.*

Om menen qarsılıqtıń *CGSE-birliginiń* arasındaǵı baylanıstı Om nızamınan kelip shıǵatuǵın qatnastıń járdeminde alamız:

$$\begin{aligned} 1 \text{ om} &= \frac{1 \text{ volt}}{1 \text{ amper}} \cong \frac{\frac{1}{300} \text{ potencialdıń CGSE – birligi}}{3 \cdot 10^9 \text{ toq kúshiniń CGSE – birligi}} \cong \\ &\cong \frac{1}{9 \cdot 10^{11}} \text{ qarsılıqtıń CGSE – birligi.} \end{aligned}$$

Million om *megaom* dep ataladı.

Qarsılıqtıń ólshemin

$$[R] = \frac{[V]}{[I]} = T L^{-1}$$

teńliginiń tiykarında alamız.

Ámeliy sistemada salıstırmalı qarsılıq ρ nı (1-a) formulanıń tiykarında tabılatuǵın birliklerde ólshew qabıl etilgen. Bunday jaǵdayda R qarsılıǵı omlarda, al kese-kesimniń maydanı S - santimetrdiń kvadratında ólshenedi; salıstırmalı qarsılıqtıń alınǵan birligin *om-santimetr* (qısqaşa *om·sm*) dep ataydı.

Solay etip, salıstırmalı qarsılıqtıń birligi sıpatında qabırǵalarınń uzınlıǵı 1 sm bolǵan kubtıń bir qaptal betinen qarama-qarsı qaptal betine toq ótken jaǵdayda 1 om qarsılıqqa iye bolatuǵın materialdıń salıstırmalı qarsılıǵı qabıl etilgen.

Texnikalıq esaplawlarda ótkizgishlerdiń qarsılıǵın anıqlaw ushın (1-a) formulanı paydalanıp, sımniń kese-kesiminiń maydanı S ti millimetrlerde, al uzınlıǵı l di metrlerde ólsheydi. Usıǵan sıykes salıstırmalı qarsılıqtıń birligi sıpatında uzınlıǵı 1 m, al kese-kesiminiń maydanı 1 mm² bolǵan metrialdıń salıstırmalı qarsılıǵı alınadı.

Salıstırmalı qarsılıqtıń usı texnikalıq birligi menen *om·sm* arasında mınaday qatnas orın alǵan:

$$\begin{aligned} \text{salıstırmalı qarsılıqtıń 1 texnikalıq birligi} &= \\ &= \text{om} \frac{0,01 \text{ sm}^2}{100 \text{ sm}} = 10^{-4} \text{ om} \cdot \text{sm}. \end{aligned}$$

Salıstırmalı qarsılıq ρ dan basqa, oǵan keri bolǵan *salıstırmalı ótkizgishlik* yamasa *elektr ótkizgishlik* dep atalatuǵın shamanı jıy qollanadı (IV kestege qarańız):

$$\sigma = \frac{1}{\rho}.$$

Salıstırmalı qarsılıq ρ ótkizgishtiń temperaturasınan ǵárezli. Derlik barlıq metallar ushın ádettegi temperaturalarda salıstırmalı qarsılıq temperaturaǵa baylanıslı sızıqlı túrde ózgeredi:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t). \quad (2)$$

Bul ańlatpada t Celsiya shkalasındaǵı temperatura, al ρ_0 arqalı 0°C temperaturadaǵı salıstırmalı qarsılıq belgilengen. α - turaqlı koefficienti.

0°C temperaturadağı bazı bir ótkizgishlerdiń salıstırmalı qarsılıqları menen elektr ótkizgishlikleri

Ótkizgish	$\rho \cdot 10^6, \text{om} \cdot \text{sm}$	$\sigma \cdot 10^{-4} \text{om}^{-1} \cdot \text{sm}^{-1}$
Alyuminiy	2,53	39,5
Grafit	39,2	2,55
Taza temir	8,69	11,48
Taza mıs	1,55	64,5
Sınap	94,3	1,06

Kóp sanlı metallar ushın α san mánisi boyınsha 0,00367, yaǵnıy, $\frac{1}{273}$ shamasına jaqın. Sonlıqtan, (2)-qatnastı

$$\rho = \alpha \rho_0 T$$

túrinde kóshirip jazıwǵa boladı. Bul ańlatpada T arqalı absolyut shkaladağı temperatura belgilengen. Biraq, bul qatnas juwıq xarakterge iye hám joqarı temperaturalarda da, tómengi temperaturalarda da orınlanbaydı. Joqarı temperaturalarda α koefficienti úlkeyedi.

Usınıń menen birge qarsılıq metallardı balqıtqanda ósedı. Tómengi temperaturalarda α kishireydi 81-súwrette *Cu, Fe, Pt* hám *Pb* ushın ρ nıń T dan ǵárezligi kórsetilgen.

SHama menen 1-7 K temperaturalarda bazı bir metallar menen quymalardıń qarsılıqları keskin túrde kishireydi hám derlik joǵaladı (82-súwretke qarańız). Fizik Kammerling-Onnes tárepinen 1911-jılı birinshi ret ashılǵan bul qubılıstı *asa ótkizgishlik* dep ataydı. Asa ótkizgishlik halda qarsılıq is júzinde nolge teń boladı. Házirgi waqıtları asa ótkizgishlik kóp sanlı elementlerde (*Al, Ti, Zn, Tc, Cd, Sn, Hg, Tl, Pb, Bi, U* hám basqalar), kóp quymalarda hám bir qatar ximiyalıq birikpelerde ashıldı. Quymalarda asa ótkizgishlik onıń qurawshısınıń biri taza túrde asa ótkizgish halǵa ótpeytuǵın jaǵdayda da baqlanadı. Ximiyalıq birikpelerdiń ishinde usı birikpeniń qurawshılarınıń biri asa ótkizgishlik halǵa ótpeytuǵın jaǵdayda da asa ótkizgishlik baqlanatuǵınları bar. Zatlar asa ótkizgishlik halǵa ótetuǵın kritikalıq temperatura T_k kópshilik jaǵdaylarda 1-7 K temperaturanıń átirapında. Biraq T_k nıń joqarıraq hám tóménirek mánisleri de ushırasadı. Usı waqıtlarǵa shekem izertlengen taza elementlerdiń ishinde eń tómengi temperaturaǵa $T_k = 0,35 \text{ K}$ gafniy (*Hf*), al eń joqarı temperaturaǵa $T_k = 1,17 \text{ K}$ - texneciy (*Tc*) iye; *Nb₃Sn* birikpesi ushın $T_k = 18 \text{ K}$. Bir elementtiń hár qıylı izotopları ushın kritikalıq temperatura T_k hár qıylı. Basımdı kótergende kritikalıq temperatura T_k ózgeredi, biraq kishi shamaǵa ózgeredi (shama menen 10^{-5} grad/atm shamasına), sonıń menen birge bir zatlar ushın T_k nıń mánisi joqarılaydı, al basqalarda tóménleydi¹².

¹² (Awdarıwshılardan): 1986—1993 jılları joqarı temperaturalı asa ótkizgishlerdiń ashılıwı asa ótkizgishliktiń temperaturalıq shegarasın alısqa jıljıttı hám asa ótkizgish materiallardı suyıq geliydiń qaynaw temperaturasında emes (4,2 K), al ádewir arzan kriogenlik suyıqlıq bolǵan suyıq azottıń qaynaw temperaturasında alıwǵa múmkinshilik tuwıldı.

1986-jılı IBM korporaciyasınıń ilimiy bólimniń xızmetkerleri Karl Myuller menen Georg Bednorc $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ birikpesinde kritikalıq temperaturası 35 K asa ótkizgishlikte ashtı. Usı jumısı ushın olarǵa 1987-jılı Nobel sıylıǵı berildi.

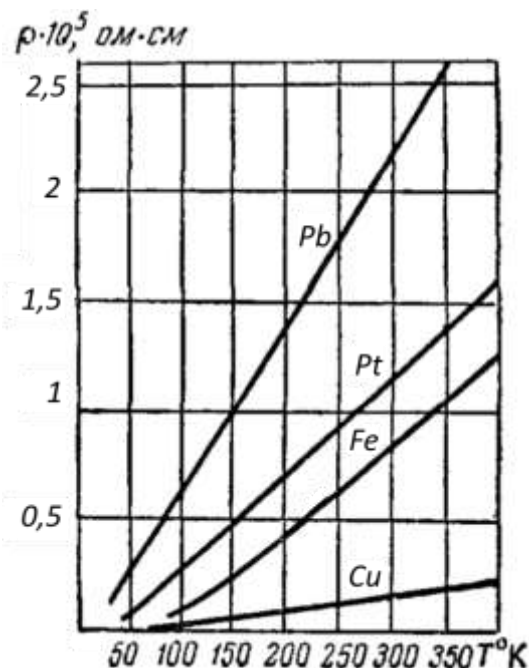
1987-jılı kritikalıq temperaturası 92 K bolǵan YBCO (ittriy-bariy-mıstıń oksidi) asa ótkizgishi ashıldı. Bul kritikalıq temperaturası suyıq azottıń qaynaw temperaturasınan (77 K) joqarı bolǵan birinshi asa ótkizgish bolıp tabıladı.

2015-jılı T_k ushın rekord joqarı temperatura alındı ($T_k = 203 \text{ K}$). Bunday asa ótkizgishlik 150 GPa (1,5 mln atmosfera) basımda turǵan kúkirt penen vodorodtıń birikpesinde tabıldı.

2018-jılı joqarı temperaturalı asa ótkizgishlik rekordi eki ret basıp ótildi:

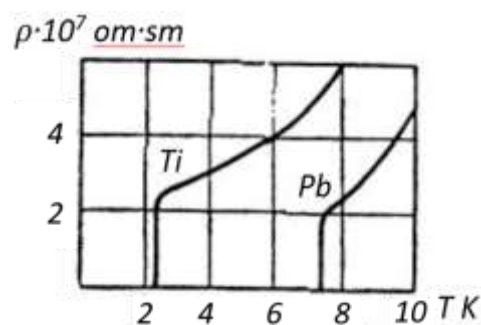
- lantanniń supergidridin (LaH_{10}) 170 GPa (1,7 mln atmosfera) shamasına shekem qısqaında $T_k = -13 \text{ }^\circ\text{S}$ (260 K) kritikalıq temperaturası alındı.

81-súwret.
Metallardıń salıstırmalı qarsılıǵınıń absolyut
temperaturadan ǵárezligi.



Zatlar asa ótkizgish halǵa ótkende olardıń bir qatar qásiyetleri de, misalı, jıllılıq sıyımlıǵı sekirmeli túrde ózgeredi hám (magnit maydanı bar bolǵan jaǵdayda) jıllılıqtıń bólip shıǵarılıwı yamasa jutılıwı orın aladı. Asa ótkizgishlerdiń magnitlik qásiyetleri ayrıqsha kózge túsedi. Asa ótkizgish haldaǵı zat "ideal" diamagnetik bolıp tabıladı, onıń ishinde magnit indukciyası nolge teń ($B = 0$). Asa ótkizgishtiń magnitleniw koefficienti (202-paragraf) $\chi = -\frac{1}{4\pi}$. Asa ótkizgishtegi magnit indukciyasınıń nolge teń bolıwın sırtqı magnit maydanın kompensaciyalaytuǵın onıń betlik qatlamında toqlardıń payda bolıwı menen túsindiriwge boladı. Asa ótkizgishtiń júdá juqa qatlamında (shama menen 10^{-5} sm) $B \neq 0$. Sırttan túsirilgen kúshli magnit maydanı asa ótkizgishlik halın buzadı. Asa ótkizgish dene arqalı ótip atırǵan toq payda etken magnit maydanı da asa ótkizgishlik haldı buza aladı.

82-súwret.
Asa ótkizgishlik halına ótkende salıstırmalı
qarsılıqtıń nolge shekem kishireyiwi.



Asa ótkizgishlik haldan ádettegi halǵa hám keri baǵıtta ótiw bir qatar sovet fizikleri tárepinen

- Hindistan alımlarınıń tastıyıqlawı boyınsha altın podlojkadaǵı nanostrukturalanǵan gúmiste ádettegi basımlarda $T_k = 236$ K (-37°S) asa ótkizgishlik alınǵan, biraq olardıń maqalası házirshe peer-review processin ótken joq hám sonlıqtan nátiyjeni birotala tastıyıqlanǵan dep esaplawǵa bolmaydı (preprint 2019-jılı 28-may kúni jariq kórdi, arXiv: 1807.08572).

2020-jılı Nature jurnalında kúkırttiń gidridi ushın jańa rekord jariq kórdi. Uglerodtı qosıw jolı menen Rochester universitetiniń bir gruppası fizikleri 267 Gpa basımda 15°S dan da joqarı temperaturadaǵı asa ótkizgishti aldı.

teoriyalıq jollar menen de, eksperimentlerde de tereń izertlendi (L.D.Landau, A.I.Shalnikov hám basqalar). A.I.Shalnikov zatlarda asa ótkizgishlik haldan ádettegi halǵa ótiwde shekli ótkizgishlikke iye qatlamlar menen gezeklesip jaylasatuǵın ayırım asa ótkizgish qatlamlardıń payda bolatuǵınlıǵın taptı.

Júdá kóp sanlı teoriyalıq izertlewlerdiń ótkerilgenligine qaramastan, eń sońǵı waqıtlarǵa shekem asa ótkizgishliktiń tolıq teoriyasın dóretiwdiń sáti túspedi. Tek, 1956-jılı amerikalı fizik Kuper tárepinen asa ótkizgishlik halǵa ótiwde júdá áhmiyetli orındı spinlik momentleri antiparallel jaylasqan elektronlar jubınıń payda bolıwınıń iyeleytuǵınlıǵın kórsetti (202-paragraftı qarańız). Bunnan keyin asa ótkizgishlikti hám onıń menen birge júzege keletuǵın qubılıslardı túsindiriwdiń sáti tústi. Asa ótkizgishte zattıń ishindegi elektronlar asa aqqıshlıq qásiyetine iye boladı eken. Usınday tiykarda asa ótkizgishlik teoriyası eń tolıq túrde sovet alımı N.N.Bogolyubov hám onıń basshılıǵında isleytuǵın xızmetkerler tárepinen rawajlandırıldı¹³.

Júdá jaqsı ótkizgishler bolıp tabılatuǵın metallar menen bir qatarda (σ nıń shaması $10^4 - 10^5 \text{ om}^{-1} \cdot \text{sm}^{-1}$) ótkizgishligi ádewir kishi bolǵan zatlar da bar (σ nıń shaması $10 - 10^{-10} \text{ om}^{-1} \cdot \text{sm}^{-1}$). Mısalı, selen, mıstıń zakisi (Cu_2O), kóp sanlı minerallar, Mendeleev kestesińiń tórtinshi, besinshi hám altınshı gruppalarınıń metall emes elementleri, quramında kislorod penen kúkirt bar organikalıq emes birikpeler, metallardıń bazı bir quymaları, bazı bir organikalıq boyawshı zatlar h.b. Bunday denelerdi *yarım ótkizgishler* dep ataydı (171-paragrafqa qarańız).

Bazı bir yarım ótkizgishlerdiń metallar menen tiyisip turǵan orınlarında ayrıqsha qubılıslar baqlanadı: toqtı tek bir baǵıtta ótkeretuǵın jabatuǵın qatlam payda boladı. Mısalı, mıstıń zakisi bolǵan jaǵdayda potenciallar ayırmasınıń birdey mánislerinde metaldan mıstıń zakisine qaray ótetuǵın toqtıń shaması mıstıń zakisinen metalǵa qaray ótetuǵın toqtıń shamasınan bir neshe mırn ese úlken (237-paragraf).

§ 155. Toqtıń tıǵızlıǵı vektori. Toq kúshi bolǵan $I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$ shaması *skalyar shama* bolıp tabıladı. Ol bir birlik waqıt ishinde berilgen bet arqalı ótetuǵın zaryadtıń muǵdarın usı betke salıstırǵanda zaryadtı alıp júretuǵın bólekshelerdiń qanday baǵıtta hám qanday múyesh penen qozǵalatuǵınlıǵınan ǵárezsiz anıqlaydı. Álbette, elektr toǵınıń bunday xarakteristikası tolıq bolmaydı; kóp jaǵdaylarda zaryadlangan bólekshelerdiń qozǵalıw baǵıtın qarawǵa tuwrı keledi. Zaryadlardıń alıp ótiliw baǵıtın esapqa alıw ushın *toqtıń tıǵızlıǵı vektori* túsiniǵin kirgizedi.

Toq oń zaryadlangan bólekshelerdiń qozǵalısinan da, teris zaryadlangan bólekshelerdiń qozǵalısinan da turadı. Tájiriybeler, belgileri qarama-qarsı bolǵan bólekshelerdiń qarama-qarsı baǵıtlardaǵı qozǵalıslarınıń barlıq qatnaslarda ekvivalent toqlardı payda etetuǵının kórsetedi. Sonlıqtan qanday de bir belgige iye bolǵan (mısalı oń belgige iye bolǵan) bólekshelerdiń qozǵalısin qaraw menen shekleniwge boladı. Bunday jaǵdayda teris zaryadlı bólekshelerdiń qozǵalısin shártli túrde oń zaryadlı bólekshelerdiń qarama-qarsı baǵıttaǵı qozǵalısi menen almasırwǵa boladı.

Dáslep, oń zaryadlangan bólekshelerdiń bir tekli aǵısın, yaǵnıy barlıq bóleksheler bir baǵıtta birdey tezlik penen qozǵalatuǵın hám bul bóleksheler keńislikte turaqlı tıǵızlıq penen tarqalǵan jaǵdaydı qaraymız.

Oyımızda bul zaryadlar qozǵalatuǵın ótkizgishtiń ishinde usı qozǵalıis baǵıtına perpendikulyar bolǵan ΔS_0 betin ayırıp alamız. San mánisi boyınsha

¹³ Awdarıwshılardan: házirgi waqıtları qabıl etilgen asa ótkizgishlik qubılısınıń mikroskopiyalıq teoriyası Bardin-Kuper-Shriffer (BKSh teoriyası) bolıp tabıladı. Onıń tiykarında qarama-qarsı spinlerge hám impulslerge iye bolǵan kuper jupları koncepciyası jatır. 1972-jılı teoriyanı dóretken fizikler fizika boyınsha Nobel sıylıǵın alıwǵa miyasar boldı. Usınıń menen bir waqıtta asa ótkizgishliktiń mikroskopiyalıq teoriyası N.N.Bogolyubov tárepinen Bogolyubov túrlendiriwleri dep atalatuǵın túrlendiriwlerdi paydalanıw jolı menen dóretildi. Bul teoriyada asa ótkizgishlik elektron gaziniń asa aqqıshlıǵı túrinde qaraladı.

$$i = \frac{\Delta Q}{\Delta t \cdot \Delta S_0} \quad (1)$$

shamasına teń, al baǵıtı boyınsha oń zaryadlangan bólekshelerdiń qozǵalı baǵıtına sáykes keletuǵın, waqıt birligi ishinde ΔS_0 beti arqalı ótetuǵın ΔQ zaryadına teń vektordı *toqtıń tıǵızlıǵı vektori* $\mathbf{i}$ dep ataymız. Solay etip *toqtıń tıǵızlıǵınıń vektori san mánisi boyınsha bir waqıt birligindegi zaryadlardıń qozǵalı baǵıtına perpendikulyar qoyılǵan bir birlik maydan arqalı ótetuǵın zaryadtıń muǵdarına teń. Toqtıń tıǵızlıǵı vektori oń zaryadlardıń qozǵalı baǵıtı menen baǵıtlas.*

Eger ΔS beti ıqtıyarlı túrde baǵıtlangán bolsa, onda onıń zaryadlardıń qozǵalı baǵıtına perpendikulyar bolǵan tegisliktegi proekciyasın alıw kerek. Bunday jaǵdayda:

$$i = \frac{\Delta Q}{\Delta t \cdot \Delta S \cos \alpha}. \quad (2)$$

Bul teńlikte α arqalı oń zaryadlardıń qozǵalı baǵıtı menen ΔS betine túsirilgen normaldıń arasındalı múyesh.

Eger zaryadlangan bólekshelerdiń aǵısı bir tekli bolmasa, onda júdá kishkene bolǵan ΔS maydanın hám júdá kishkene bolǵan waqıt aralıǵı Δt nı alamız. Bunday jaǵdayda usınday kishkene bet arqalı júdá kishkene waqıt aralıǵında ótken aǵıstı bir tekli dep qarawǵa boladı. Bunday jaǵdayda ótkizgishtegi berilgen orın arqalı berilgen waqıt momentindegi toqtıń tıǵızlıǵı vektori

$$i = \lim_{\substack{\Delta S \rightarrow 0 \\ \Delta t \rightarrow 0}} \frac{\Delta Q}{\Delta t \cdot \Delta S \cos \alpha} \quad (2a)$$

ańlatpasınıń járdeminde esaplanadı. ΔS beti arqalı ótetuǵın kishi toqtı ΔI arqalı belgilep

$$\Delta I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

formulasın alamız, bunnan keyin (2-a) teńliginen

$$i \cos \alpha = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta I}{\Delta S}$$

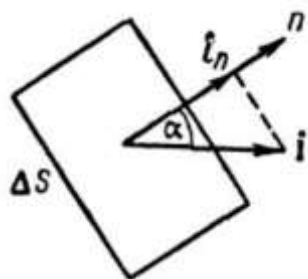
ańlatpasına iye bolamız.

$i \cos \alpha$ shaması toqtıń tıǵızlıǵı vektorınıń ΔS betine túsirilgen normaldıń baǵıtına túsirilgen proekciyası bolıp tabıladı (83-súwret). Bunnan

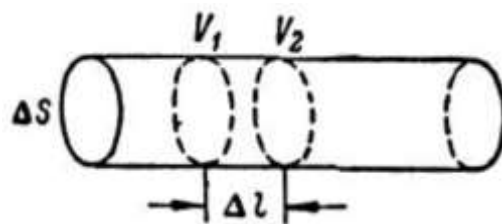
$$i_n = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta I}{\Delta S} \quad (3)$$

teńligin alamız hám *toqtıń tıǵızlıǵı vektorınıń normal qurawshısınıń bir birlik maydan arqalı ótetuǵın toqtıń kúshine teń eken.*

Toqtıń tıǵızlıǵı haqqındaǵı túsiniń 153-paragraftaǵı Om nızamına berilgen anıqlamadan basqa anıqlamanı beriwge múmkinshilik beredi. Joqarıda aytılıp ótilgenindey, toq oń zaryadlangan bólekshelerdiń qozǵalısan payda bolǵan dep esaplaymız (al, is júzinde ótkizgishtegi toq elektronlardıń qozǵalısanıń saldarınan payda boladı). Erkin zaryadlar ótkizgishte elektr maydanınıń kúshleriniń baǵıtında qozǵaladı. Demek, toqtıń tıǵızlıǵı vektori $\mathbf{i}$ potencialdıń túsiw baǵıtına qaray, yaǵnıy kernewlik vektori $\mathbf{E}$ niń baǵıtına qaray baǵıtlangán.



83-súwret. Toqtıń tıǵızlıǵınıń normal qurawshısı i_n di tabıwǵa.



84-súwret. Toqtıń tıǵızlıǵı ushın ańlatpanı keltirip shıǵarıwǵa.

ΔI to'g'i ótip turgan cilindr tárizli ótkizgishti alamiz. Meyli, bul ótkizgishtegi zaryadlar onin ΔS kesimine perpendikulyar ba'g'itta qozgalatugin bolsin (84-súwret). Bir birinen Δl qashikliqta jaylasqan ótkizgishtiin eki kesimin qaraymiz. Meyli, usi kesimlerdin arasinda'gi potenciallar ayirmasi $V_1 - V_2 = -\Delta V$ shamasina teń bolsin. Ótkizgishtiin usi uchastkasinin qarsiligi $R = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{\Delta l}{\Delta S}$ shamasina teń. Bul teńlikte σ - ótkizgish so'gilgan materialdin salıstırmalı ótkizgishligi. Ótkizgishtiin biz qarap atirgan uchastkasına Om nızamın qollanıp, mınanı alamız:

$$\Delta I = \frac{V_1 - V_2}{R} = -\sigma \frac{\Delta V}{\Delta l} \Delta S.$$

Bunnan

$$\frac{\Delta I}{\Delta S} = -\sigma \frac{\Delta V}{\Delta l}, \quad (4)$$

qatnası kelip shıgadı. Biraq, $\Delta I/\Delta S$ qatnası toqtıń tıgızlı'ğı i ға teń, uzınlıqtıń bir birligendegi potencialdin túsiwine teń bol'gan $\Delta V/\Delta l$ shaması ótkizgishtiin ishindegi maydannıń kernewligi E ge teń. Bunnan keyin (4)-teńlik mınaday túrge enedi:

$$i = \sigma E.$$

Biz toqtıń tıgızlı'ğı vektorı bol'gan $\mathbf{i}$ vektorınıń kernewlik vektorı $\mathbf{E}$ menen ba'gıtlas ekenligin atap ótken edik. Sonlıqtan, soń'gi teńlikti vektorlıq túrde jazıw'ğa boladı:

$$\mathbf{i} = \sigma \mathbf{E}. \quad (5)$$

Bul qatnas *toqtıń tıgızlı'ğı ushın Om nızamı bolıp tabıladı*. Ol toqtıń tıgızlı'ğı $\mathbf{i}$ din maydannıń kernewligi E ge proporcional ekenligin hám onıń menen ba'gıtlas ekenligin kórsetedi. Toq ótip turgan ótkizgishtiin ishinde maydannıń kernewligi nolge teń emes. Kerisinshe, eger ótkizgishtiin ishinde $E = 0$ bolsa, onda toqlar bolmaydı: $E = 0$ teńligi orınlanganda biz elektrostatikalıq qubılıslar menen is alıp baramız.

§ 156. Zaryadlardıń saqlanıwı. Stacionar toqlardıń tuyıq ekenligi. Aldıń'gi paragrafta ΔS beti arqalı ótip biz atirgan toqtıń kúshi ΔI menen toqtıń tıgızlı'gınıń arasinda'gi baylanıstı taptıq [155-paragrafta'gi (3)-formula]:

$$i_n = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta I}{\Delta S}.$$

Bunnan, kishi ΔS maydanı arqalı ótip atirgan ΔI toq kúshin bılayınsha jazıw'ğa bolatu'gınlı'ğı kelip shıgadı:

$$\Delta I = i_n \Delta S. \quad (1)$$

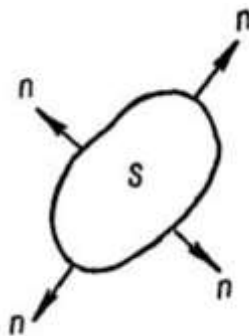
Shekli S maydanı arqalı ótip atirgan toq bol'gan ja'gdayda bul maydandı ΔS elementar maydanlarına bólemiz. Bunday ja'gdayda barlıq S maydanı arqalı ótip atirgan I toqtıń kúshi ΔI toq kúshleriniń summasına teń:

$$I = \sum i_n \Delta S. \quad (2)$$

Solay etip, toq kúshi toqtıń tıgızlı'ğı vektorınıń a'gısı bolıp tabıladı eken.

85-súwret.

Tuyıq S betke túsirilgen sırtqı normallar.



Oyımızda ótkizgishte ayırıp alıńǵan bazı bir kólemdi sheklep turǵan tuyıq bet arqalı ótetuǵın I toq kúshin anıqlaymız. Usı kólemge salıstırǵanda sırtqa qaray baǵıtlangan normaldı oń dep esaplaymız (85-súwret). Bunday jaǵdayda α múyeshleriniń mánisleri $\pi/2$ den kishi bolıwı da, úlken bolıwı da hám (1)-teńlik boyınsha ΔI elementar toq kúshleriniń mánisleriniń oń bolıwı da, teris bolıwı da múmkin. ΔI elementar toǵınıń oń mánisi ΔS beti arqalı S beti menen sheklengen kólemnıń oń zaryadlar alıp shıǵılatuǵınlıǵın, al ΔI elementar toǵınıń teris mánisi ΔS beti arqalı sol kólemnıń ishine oń zaryadlardıń alıp kiriletuǵınlıǵın ańǵartadı. Eger berilgen kólemdi sheklep turǵan (orap turǵan) S beti arqalı ótetuǵın barlıq elementar toqlardıń qosındısı nolge teń bolsa alıp kirilgen zaryadlardıń muǵdarı alıp shıǵılǵan zaryadlardıń muǵdarına teń boladı. Eger, tuyıq S beti arqalı ótetuǵın tolıq toq I dıń shaması nolge teń bolmasa, onda biz qarap atırǵan kólemge alıp kirilgen zaryadlardıń muǵdarı menen alıp shıǵılǵan zaryadlardıń muǵdarı teń bolmaydı, yaǵnıy S beti menen qorshalǵan kólemnıń ishindegi zaryadlardıń ulıwmalıq muǵdarı ózgeredi. Toqtıń oń mánisi kólemnıń ishindegi zaryadlardıń muǵdarınıń kemeyiwın, al teris mánisi úlkeyiwın ańǵartadı. Eger S beti menen sheklengen kólemnıń ishindegi zaryadlardıń Δt waqıtı ishindegi kemeyiwın belgilesek, onda

$$I\Delta t = \sum i_n \Delta S \Delta t = -\Delta Q \quad (3)$$

qatnasına iye bolamız. Bul qatnas jabıq kólemnıń ishindegi ulıwmalıq zaryadtıń ózgerisi bolǵan ΔQ shamasınıń sırttan zaryadtı alıp keliwdiń yamasa sırtqa zaryadtı alıp shıǵıwdıń esabınan bolatuǵınlıǵın kórsetedi. Solay etip, (3)-qatnas zaryadlardıń saqlanıw nızamınıń mánisine iye boladı.

(3)-qatnastan tuyıq bet arqalı ótetuǵın toq I ushın mınaday qatnastı alamız:

$$I = \sum i_n \Delta S = -\frac{\Delta Q}{\Delta t}. \quad (3a)$$

Endi qaraw ushın toq sızıqların kirgizemiz. Toqtıń sızıǵı degende hár bir noqattaǵı toqtıń tıǵızlıǵı vektorınıń baǵıtı menen baǵıttas bolǵan sızıqqa urınba baǵıttaǵı sızıqtı túsinemiz.

$\sum i_n \Delta S$ ańlatpası S tuyıq beti arqalı ótetuǵın toq sızıqlarınıń aǵısı bolıp tabıladı. (3a) teńligi tuyıq bet sheklep turǵan kólemdegi zaryadtıń muǵdarı ózgeretuǵın bolsa, onda usı tuyıq bet arqalı ótip atırǵan toq sızıqlarınıń tolıq aǵısınıń nolden ózgeshe bolatuǵınlıǵın kórsetedi. Eger berilgen bettiń ishindegi tolıq zaryad ózgermeytuǵın bolsa, onda toq sızıqları tek betti kesip ótedi. Zaryadlardıń jıynalıwı yamasa kemeyiwı orın alatuǵın orınlarda toqtıń sızıqları tamam boladı. *Bazı bir oblastta zaryadlar turaqlı bolǵanda usı oblasttaǵı toq sızıqları úzliksiz yamasa tuyıq, yamasa sheksizlikke ketedi.* Toq sızıǵı menen sheklengen keńislikte toqtıń trubkası (toqtıń nayı) dep ataymız. Toq trubkası túsiniǵiniń *anıqlaması boyınsha trubkanıń qálegen kesimi arqalı ótip atırǵan toqtıń kúshi birdey mániske iye boladı.*

Aytılǵanlardan kórinip turǵanıday, toqtıń sızıqları túsiniǵi (3a) teńlikte Elektrostatikadaǵı Ostrogradskiy-Gauss teoremasınday etip interpretaciyalawǵa múmkinshilik beredi (126-paragraf). Elektrostatikada Ostrogradskiy-Gauss teoreması boyınsha tuyıq bet arqalı ótetuǵın kernewlik sızıqlarınıń aǵısı usı bettiń ishinde jaylasqan zaryadlardıń summasına teń (4π ge kóbeytilgen). (3a) teńlik boyınsha tuyıq bet boyınsha toq sızıqlarınıń aǵısı usı bettiń ishindegi zaryadtıń kemeyiwine teń.

Kondensatordı razryadlaǵanda (zaryadsızlandırǵanda) payda bolatuǵın toq sızıqları tuyıq bolmaǵan toq sızıqlarına misal bola aladı. Kondensatordıń zaryadsızlanatuǵın astarları toq sızıqlarınıń aqırlarınıń (ushlarınıń) ornı bolıp tabıladı. Sebebi kondensatordıń zaryadsızlanıw waqıtında olardıń zaryadı ózgeredi. Kondensatordı razryadlaw processı stacionar emes: toqtıń kúshi waqıttıń ótiwi menen ózgeredi hám eń aqırında nolge teń boladı. Aqırǵı esapta qálegen zaryad tawsılatuǵın bolǵanlıqtan, toq toqtıń tuyıq emes sızıqları boyınsha kóp waqıt júre almaydı. *Stacionar, yaǵnıy turaqlı, sheksiz kóp waqıt ótetuǵın toqqa barlıq waqıtta toqtıń tuyıq sızıqları sáykes keledi.* Misalı, galvanometr tárepinen uslap turılatuǵın turaqlı toq bolǵan jaǵdayda, toq

sızıqları shınjırdır ishki bólimleri arqalı tuyıqlanadı hám tuyıq sızıqlardı payda etedi.

Differenciallıq esaptır belgilewlerin paydalanıp, biz (1)-teńlikti qaytadan jazamız:

$$dI = i_n dS. \quad (1a)$$

Bunnan keyin (2)-teńliktegi summanı berilgen S beti ushın jazılğan integral menen almasırap

$$I = \int_S i_n dS. \quad (2a)$$

teńligin alamız. Eń aqırında (3a) teńligindegi Δt nı sheksiz kishi bolğan waqıt intervalı dt menen almasırap, mınanı alamız:

$$I = -\frac{dQ}{dt}. \quad (3b)$$

Bul ańlatpağa I dmń ornına (2a) boyınsha mánisin qoyıp, elektr zaryadlarınń saqlanıw nızamın mınaday túrde jazamız:

$$\int_S i_n dS = -\frac{dQ}{dt}. \quad (4)$$

Zaryadların saqlanıw nızamın basqa túrde de jazıwğa boladı. Onıń ushın (4)-teńliktiń oń hám shep táreplerin S beti óziniń ishine alğan V kólemine bólip, mınaday ańlatpanı alamız:

$$\frac{1}{V} \int_S i_n dS = -\frac{d}{dt} \left(\frac{Q}{V} \right). \quad (5)$$

V kólemin nolge shekem kishireytip, Q/V qatnasınıń berilgen orındaǵı zaryadların tıǵızlıǵı ρ nı beretuǵınlıǵın alamız. Solay etip, (5)-teńliktiń oń bóliminde $-d\rho/dt$ shaması turadı. Shep tárepi ushın

$$\lim_{V \rightarrow 0} \frac{1}{V} \int_S i_n dS$$

ańlatpasın alamız. Vektorlıq esaptan bul shektiń $\mathbf{i}$ vektorınıń divergenciyasına teń ekenligi belgili:

$$\text{div } \mathbf{i} = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{1}{V} \int_S i_n dS.$$

Demek, (5)-teńlik mınaday túrde qabıl etedi:

$$\text{div } \mathbf{i} = -\frac{d\rho}{dt}. \quad (6)$$

Bul differenciallıq formada jazılğan elektr zaryadlarınń saqlanıw nızamı bolıp tabıladı. Eger ρ waqıtqa baylanıslı ózgermeytuǵın bolsa, onda $\frac{d\rho}{dt} = 0$ hám (6)-teńlik mınaday túrge iye boladı:

$$\text{div } \mathbf{i} = 0. \quad (6a)$$

§ 157. Lenc-Djoul nızamı. Tájiriye beler ótkizgish arqalı elektr toǵı ótkende ótkizgishten jıllılıqtıń bólinip shıǵatuǵınlıǵın kórsetedi. Jıllılıqtıń bólinip shıǵıwı zaryadtıń alıp júriwi hám, usıǵan sáykes, usı alıp júriw ushın jum salatuǵın elektrlik kúshlerdiń jumısı menen baylanıslı.

Q zaryadı t waqıtı ishinde ótetuǵın ótkizgishtiń kesimin alamız: $Q = It$. Bul zaryad ótkizgish arqalı t waqıtı ishinde orın almasırap bazı bir $V_1 - V_2$ potenciallar ayırmasın ótedi. Nátiyjede elektrlik kúshler

$$A = It(V_1 - V_2) \quad (1)$$

jumısın isleydi. Maydanniń kúshleriniń jumısı toqtıń úlkeyiwine alıp kelmeydi hám, usıǵan sáykes, ótkizgishti qızdırıw ushın jum saladı. Om nızamın paydalanıp, jumıs ushın ańlatpanı bılayınsha kóshirip jazamız:

$$A = I^2 R t. \quad (1a)$$

Bul ańlatpada R arqalı ótkizgishtiń $V_1 - V_2$ potenciallar ayırması túsetuǵın uchastkasınıń

qarsılığı belgilengen.

Ótkizgishte bólinip shıǵatuǵın jıllılıqtıń muǵdarınıń san mánisin esaplaymız. I toǵınıń kúshi amperlerde, waqıt sekundlarda, al $V_1 - V_2$ potenciallar ayırması voltlerde ańǵartılǵan dep boljayıq. Bunday jaǵdayda (1)-formulanıń jumısı djoullerde beredi. Haqıyqatında da 1 sek ishinde 1 a toq ótkende 1 kulonǵa teń elektr zaryadı, yaǵnıy zaryadtıń $3 \cdot 10^9$ CGSE-birligi ótedi; eger elektr zaryadlarınıń usınday muǵdarı potenciallar ayırması 1 V bolǵan (potencialdıń $\frac{1}{300}$ CGSE-birligi) noqatlardıń arasında ótetuǵın bolsa, onda mınaday jumıs islenedi:

$$A_0 = 3 \cdot 10^9 \cdot \frac{1}{300} \text{ erg} = 10^7 \text{ erg} = 1 \text{ dj}.$$

Djouldıń 0,24 kal ekenligin eske túsirip, ushlarındaǵı potenciallar ayırması $V_1 - V_2$ shamasına teń bolǵan jaǵdayda I amper toq ótetuǵın ótkizgishten t sekund ishinde bólinip shıǵatuǵın jıllılıq ushın mınaday ańlatpa alamız:

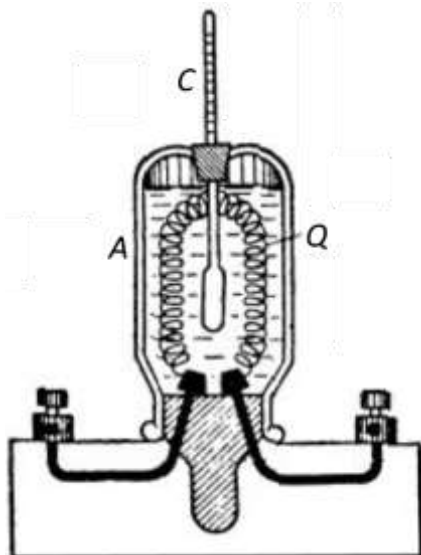
$$Q = 0,24 It (V_1 - V_2). \quad (2)$$

Bul ańlatpanı Om nızamınıń járdeminde bılayınsha kóshirip jazıwǵa boladı:

$$Q = 0,24 I^2 R t, \quad (2a)$$

$$Q = 0,24 \frac{(V_1 - V_2)^2}{R} t. \quad (2b)$$

(2), (2a)- hám (2b) ańlatpalardaǵı R qarsılıǵınıń omlarda ańǵartılǵan bolıwı kerek.



86-súwret.

Ótkizgish arqalı toq ótkende bólinip shıǵatuǵın jıllılıqtıń muǵdarın ólshew ushın arnalǵan Lenc-tiń ásbabı.

(2a) qatnası eksperimentlerde Peterburg universitetiniń professorı E.X.Lenc hám Djoul tárepinen tabıldı. Bul qatnastı *Lenc-Djoule nızamı* dep ataydı. Bul nızam boyınsha toq ótkende ótkizgishtiń uchastkasında bólinip shıǵatuǵın jıllılıqtıń muǵdarı toqtıń ótiw waqtı t ǵa, uchastkanıń qarsılıǵı R ge hám toq kúshiniń kvadratı I^2 qa proporcional.

86-súwrette Lenc paydalanǵan ásbap kórsetilgen. Spirt penen toltırılǵan A ıdıǵı kalorimetr xızmetin atqarǵan. Toq qarsılıǵı belgili bolǵan H spiralı arqalı ótkerilgen. Belgili bolǵan t waqtınıń ishindegi spirttiń qızıwı C termometriniń járdeminde ólshengen.

Lenc-Djoule nızamındaǵı 0,24 koefficienti birliklerdi arnawlı túrde saylap alıwda kirgiziledi: jıllılıqtıń muǵdarı kaloriyalarda, toqtıń kúshi amperlerde, qarsılıq omlarda, waqıt sekundlarda ólshenedi. Eger biz bólinip shıqqan jıllılıqtıń muǵdarın djoullerde, toqtıń kúshin amperlerde, qarsılıqtı omlarda, al waqtı sekundlarda ańǵartatuǵın bolsaq, onda (2)-, (2a)- hám (2b) formulalardaǵı sanlı 0,24 koefficientin 1 menen alıstıramız hám Lenc-Djoule nızamı ushın

$$Q = I^2 R t \quad (3)$$

ańlatpasına iye bolamız.

Toqtıń tıǵızlıǵı i hám jıllılıq quwatınıń tıǵızlıǵı ω túsiniń kirgizip, Lenc-Djoule nızamın basqa

túrge keltiremiz. Jıllılıq quwatınıń tıǵızlıǵı ω haqqında gáp etkende, biz waqıttır bir birliginde ótkizgishtiń kóleminiń bir birliginen bólinip shıǵatuǵın jıllılıqtır muǵdarın túsiniemiz. Uzunlıǵı Δl hám kese-kesiminiń maydanı S bolǵan cilindr tárizli ótkizgishti alamız. Bunday jaǵdayda

$$\omega = \frac{Q}{S \cdot \Delta l \cdot t}.$$

Bul teńlikke (3)-ańlatpa boyınsha Q dıń mánisin qoyıp

$$\omega = \frac{I^2 R}{S \cdot \Delta l}$$

qatnasına iye bolamız yamasa $R = \rho \frac{\Delta l}{S} = \frac{1}{\sigma} \frac{\Delta l}{S}$ hám $\frac{I}{S} = i$ teńlikleri orınlı bolǵanlıqtan

$$\omega = \frac{1}{\sigma} i^2$$

formulasın alamız. Eger bul formulaǵa toqtır tıǵızlıǵı i dıń ornına 155-paragraftaǵı (5)-formulaǵa sáykes onıń ótkizgishlik hám elektr maydanınıń kernewligi arqalı anıqlanǵan mánisin qoysaq (bul formula boyınsha $i = \sigma E$), onda

$$\omega = \sigma E^2 \quad (4)$$

teńligin, yaǵnıy jıllılıq quwatınıń tıǵızlıǵınıń elektr maydanınıń kernewliginiń kvadratına hám ótkizgishtiń ótkizgishligine proporcional bolatuǵınlıǵın kóremiz.

Ótkizgishtiń salıstırmalı qarsılıǵı qanshama kishi bolsa, onda toq kúshi ózgermegen jaǵdayda sonshama az muǵdardaǵı jıllılıq bólinip shıǵadı. Qarsılıqtır shaması ólsheuge bolmaytuǵınday kishi asa ótkizgishlik halında ótkizgish arqalı toq ótkende sezilerliktey jıllılıq muǵdarınıń bólinip shıǵıwı baqlanbaydı. Bunday jaǵdayda energiya hesh nársege jumsalmaytuǵın bolǵanlıqtan, tuyıq asa ótkizgishte qozdırılǵan toq sırttan energiya jumsalmaǵanda júdá kóp waqıtqa shekem ótip tura beredi¹⁴.

Ótkizgishtegi jıllılıqtır bólinip shıǵıwı texnikada áhmiyetli orındı iyeleydi. Zavodlarda paydalanılatuǵın elektr oshaqlarınıń hám múmkin bolǵan barlıq qızdırıwshı ásbaplardıń jumısı Lenc-Djoule qubılısına tiykarlanǵan. Toqtır tásirindegi ótkizgishlerdiń qızıwı elektr lampalarındaǵı sımlardıń qızıwı ushın paydalanıladı. Toqtır tásirinde ótkizgishlerdi qızdırıp, jaqtılıq alıw boyınsha eń birinshi tırıswlar Lenctiń ózine tiyisli. Biraq, 1874-jılı rus injeneri A. N. Lodigin birinshi bolıp jaqtılandırıw maqsetleri ushın jaramlı bolǵan hám texnikalıq kóz-qarastan jetkilikli dárejede jetilisen jaqtılıq shıǵaratuǵın lampalardı konstrukciyaladı. 1875-jılı A. N. Lodiginniń lampalarınń járdeminde Peterburgta Neva dáryasına salınıp atırǵan kópirdiń qurılısı jaqtılandırılǵan¹⁵. Bul elektr qızdırıw lampalarınń birinshi ret ámelde qollanıwı bolıp tabıladı.

Bir qatar texnikalıq máselelerde jıllılıqtır bólinip shıǵıwı zıyan keltiredi. Bunday zıyanlı joǵaltıwlardıń qatarına elektr energiyasın elektr stanciyasınan paydalanıwshıǵa shekem jetkerip beriwdegi ótkizgishlerdegi jıllılıqtır bólinip shıǵıwı bolıp tabıladı.

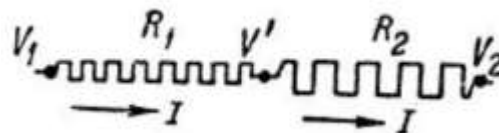
Ótkizgishlerde bólinip shıǵatuǵın jıllılıqtır muǵdarı menen qarsılıqlardı esaplawǵa bir neshe mısallardı keltiremiz.

1-mısal. Qarsılıqları R_1 hám R_2 shamalarına teń bolǵan izbe-iz jalǵanǵan eki ótkizgishtiń tolıq qarsılıǵın hám hár bir ótkizgishte bólinip shıqqan jıllılıq muǵdarlarınıń qatnası Q_1/Q_2 di anıqlaymız (87-súwret).

¹⁴ Arnawlı túrde ótkerilgen tájiriwbeler tuyıq asa ótkizgish saqıynada qozdırılǵan toqtır shamasınıń bir neshe jıllar dawamında sezilerliktey dárejede kemeymegenligin kórsetti (Awdarıwshılar).

¹⁵ Rus tilinde bul kópirdi "Liteyniy most" (qaraqalpaq tilinde "Quyılǵan kópirdi") dep ataydı (Awdarıwshılar).

87-súwret.
Ótkizgishlerdi izbe-iz jalǵaw.



Sheshimi. Ótkizgishlerdi izbe-iz jalǵaǵanda toqtırn kúshi I eki ótkizgishte de birdey boladı. Om nızamın ótkizgishlerdiń hár biri ushın óz aldına qollanamız:

$$IR_1 - V_1 - V', IR_2 = V' - V_2.$$

Bul teńliklerdi qosıp,

$$I(R_1 + R_2) = V_1 - V_2$$

teńligin alamız. Bunnan

$$I = \frac{V_1 - V_2}{R_1 + R_2} = \frac{V_1 - V_2}{R} \quad (5)$$

Sońǵı ańlatpada $R = R_1 + R_2$ shaması eki ótkizgishtiń tolıq qarsılıǵı bolıp tabıladı. Solay etip, ótkizgishlerdi izbe-iz jalǵaǵanda tolıq qarsılıq sol ótkizgishlerdiń qarsılıqlarınıń qosındısına teń boladı eken.

Hár bir ótkizgishte bólinip shıǵatuǵın jıllılıqtır muǵdarları Q_1 hám Q_2 mınaǵan :

$$Q_1 = 0,24 I^2 R_1 t, Q_2 = 0,24 I^2 R_2 t$$

Bunnan

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

qatnasına iye bolamız. Demek, izbe-iz jalǵaǵanda ótkizgishlerden bólinip shıǵatuǵın jıllılıqtır muǵdarı tutastırılǵan ótkizgishlerdiń qarsılıqlarınıń qatnaslarınday boladı. Ótkizgishlerdi izbe-iz jalǵaǵanda qarsılıǵı eń úlken ótkizgishten úlken jıllılıq bólinip shıǵadı.

2-mısal. Qarsılıqları R_1 hám R_2 shamalarına teń parallel tutastırılǵan ótkizgishlerdiń qarsılıǵın hám olardı bólinip shıqqan jıllılıq muǵdarlarınń qatnası Q_1/Q_2 di ańıqlaymız (88-súwret).

Parallel tutastırılǵan ótkizgishlerdiń ushlarındaǵı potencıallar ayırmasınıń shaması birdey. Om nızamın ótkizgishlerdiń hár qaysısına qollanamız hám olar arqalı ótip atırǵan toqlardıń shamaların I_1 hám I_2 arqalı belgileybiz:

$$I_1 = \frac{V_1 - V_2}{R_1}, I_2 = \frac{V_1 - V_2}{R_2},$$

Bunnan

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

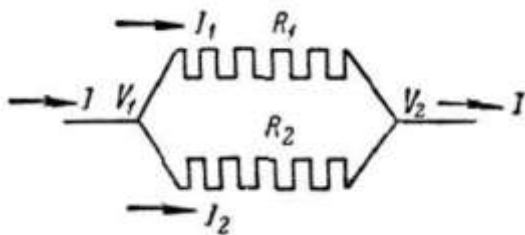
qatnasına iye bolamız, yaǵnıy parallel tutastırılǵan ótkizgishlerdegi toqlardıń kúshi olardıń qarsılıqlarına kerı proporcional. Eki ótkizgishten ótip atırǵan tolıq toqtırn kúshi mınaǵan teń:

$$I = I_1 + I_2 = (V_1 - V_2) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{V_1 - V_2}{R}.$$

Bul teńliklerde R eki ótkizgishtiń qosındı qarsılıǵın ańǵartadı. Demek, bul jaǵdayda

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (6)$$

teńligi orınlı boladı, yaǵnıy ótkizgishlerde parallel tutastırılǵanda qosındı qarsılıqtırn kerı shaması bir birine tutastırılǵan ótkizgishlerdiń qarsılıqlarınıń kerı shamalarınń qosındısına teń boladı eken.



88-súwret.
Ótkizgishlerdi parallel jalǵaw.

Bólinip shıǵatuǵın jıllılıqtır muǵdarın esaplaw ushın Lenc-Djoule nızamı ushın jazılǵan (26)-formuladan paydalanamız. Eki ótkizgishtiń ushlarındaǵı potencıallar ayırması birdey bolǵanlıqtan:

$$Q_1 = 0,24 \frac{(V_1 - V_2)^2}{R_1} t, Q_2 = 0,24 \frac{(V_1 - V_2)^2}{R_2} t.$$

Bunnan

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

qatnasına iye bolamız, yaǵnıy ótkizgishlerdi parallel jalǵaǵanda hár bir ótkizgishten bólinip shıǵatuǵın jıllılıqtıń muǵdarı ótkizgishlerdiń qarsılıqlarına kerı proporcional: qarsılıǵı kishi bolǵan ótkizgishten bólinip shıǵatuǵın jıllılıqtıń muǵdarı kóp boladı.

Eger (6)-formula boyınsha anıqlanǵan qosındı qarsılıq durıs bolsa, onda eki ótkizgishten bólinip shıqqan jıllılıq muǵdarlarınń qosındısınıń (2b) formulalıń járdeminde anıqlanıwınıń múmkin ekenligin kórsetemiz:

$$Q = Q_1 + Q_2 = 0,24 \frac{(V_1 - V_2)^2}{R_1} t + 0,24 \frac{(V_1 - V_2)^2}{R_2} t = 0,24(V_1 - V_2)^2 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) t.$$

Nátiyjede (6)-formula boyınsha mınaday jıllılıq muǵdarın alamız:

$$Q = 0,24 \frac{(V_1 - V_2)^2}{R} t.$$

§ 158. Toqtırn kúshin hám potenciallar ayırmasın ólshew. Toqtırn kúshi I di Δt waqtı ishinde ótkizgish boylap alıp ótilgen zaryadtırn muǵdarı ΔQ dırn shaması boyınsha anıqlawǵa boladı. Sebebi 152-paragraftaǵı (1)-formula boyınsha biz

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

qatnasına iye bolamız. Biraq, is júzinde bunday ólshewdi ótkeriw qıyın. Sonlıqtan toqtırn kúshin basqa principlerde soǵılǵan arnawlı ásbaplardıń járdeminde anıqlaydı. Keyinirek (213-paragrafta) elektromagnit ásbaplardıń júdá keń tarqalǵan tipin táriyipleymiz. Al házir toqtırn jıllılıq tásirine tiykarlanǵan ásbaptı qaraymız.

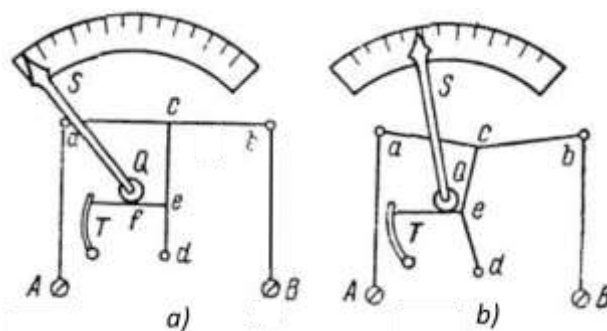
"Jıllılıq" ólshew ásbabınıń sxeması 89-súwrette keltirilgen.

Ólshenetuǵın toq A hám B qısırshılardıń alıp kelinedi hám jıńıshke ab sımı arqalı ótkeriledi. Nátiyjede Lenc-Djoul nızamı boyınsha bólinip shıǵatuǵın jıllılıqtıń tásirinde ab sımı qızadı hám sonıń saldarınan uzayadı. ab sımınıń ortasına Q blogın óziniń ishine alatuǵın hám T prujınası menen tartıp turılatuǵın ekinshi sım tutastırılǵan. Q blogınıń kósherine S strelkası tutastırılǵan. ab sımı uzayǵanda S strelkası burıladı (89b súwret). ab sımı arqalı ótetuǵın toqtırn kúshi qanshama úlken bolsa, ol sonshama kóbirek shamaǵa uzayadı hám S strelkası kóbirek burıladı.

Solay etip, sáykes shkalanı graduırovkalap, ásbap arqalı ótetuǵın toqtırn kúshi I di ólshewge boladı.

Biraq, bunday ásbaptı usı ásbap arqalı ótip atırǵan toqtırn kúshin ólshew ushın shıńırǵa tikkeley tutastırıwǵa bolmaydı. Sebebi, alınatuǵın ab sımı júdá jıńıshke bolıwı kerek. Bunday jaǵdayda onıń qarsılıǵı dım úlken boladı. Sonlıqtan bunday ásbaptı shıńırǵa tutastırıw, ádette, shıńırdıń ulıwmalıq qarsılıǵınıń ózgeriwine, usıǵan sáykes toq kúshiniń ózgeriwine alıp keledi. Toqtırn ólshengen kúshiniń shaması ásbaptı shıńırǵa tutastırmastan burınǵı toqtırn kúshine teń boladı. Usınıń menen birge, ásbaptı júdá úlken bolǵan toqlardıń kúshin ólshewge bolmaydı, sebebi bunday jaǵdayda ab sımı janıp ketedi. Sonlıqtan, ólshew ásbabana parallel etip qosımsha ótkizgishti jalǵaydı hám onıń qarsılıǵın shıńır shaqalarǵa bólinbesten burın ótetuǵın toqtırn belgili bólegi ótetuǵınday etip saylap aladı.

89-súwret.
Jıllılıq ólshew ásbabınıń sxeması.



CC' ótkizgishi arqalı ótip atırǵan I toq kúshin ólshew kerek dep boljayıq. Bunday jaǵdayda G ólshew ásbabı CC' ótkizgishine izbe-iz jalǵanadı. Ólshewshi ásbaptıń AB qısqa shıǵarına parallel etip *shunt* dep atalatuǵın belgili bolǵan S qarsılıǵı jalǵanadı (90-súwret). Ásbaptıń óziniń qarsılıǵı R_g , al shunttıń qarsılıǵı R_s bolsın. Ásbap arqalı ótetuǵın toqtıń kúshin I_g , al shunt arqalı ótetuǵın toqtıń kúshin I_s tańbasınıń járdeminde belgileyik. Bunday jaǵdayda, birinshiden, CC' ótkizgishi arqalı ótip atırǵan I toǵınıń shaması I_g hám I_s toqlarınıń qosındısına teń bolıwı kerek, ekinshiden, I_g hám I_s toqlarınıń shamaları R_g hám R_s qarsılıqlarına kerı proporcional bolıwı kerek, yaǵnıy (157-paragraf)

$$I_g + I_s = I, \frac{I_g}{I_s} = \frac{R_s}{R_g}.$$

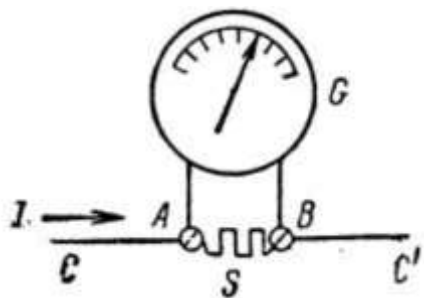
Bul eki teńlikten mınaǵan iye bolamız:

$$I_g = I \frac{R_s}{R_s + R_g}. \quad (1)$$

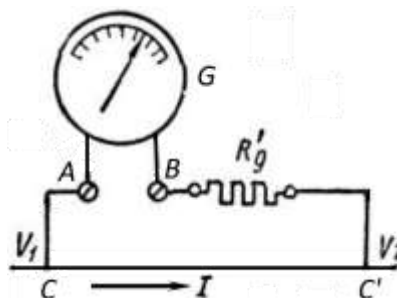
(1)-formuladan shunttıń qarsılıǵı R_s qanshama kishi bolsa, onda I ulıwmalıq toqtıń kishi bóleginiń ólshewshi ásbap arqalı ótetuǵınlıǵın kóremiz. G ásbabı arqalı ótetuǵın I_g toǵınıń ulıwmalıq I toǵınıń $1/n$ bóliminiń ótiwi ushin, (1)-formuladan kórinip turǵanıday, mınaday qatnastıń orınlanıwı kerek:

$$R_s = \frac{R_g}{n - 1}. \quad (2)$$

Mısalı, ólshewshi ásbaptıń óziniń qarsılıǵınıń $1/9$ bólegine iye shunttı alatuǵın bolsaq, onda ólshewshi ásbap arqalı shıńırdaǵı toqtıń $1/10$ shaması ótedi. Jıllılıq ólshew ásbabına shunttı jalǵap hám onı amperlerde graduırovkalap, *ampermetr* dep atalatuǵın, yaǵnıy toqtıń kúshin amperlerde ólsheytuǵın ásbaptı aladı. Shunttıń qarsılıǵı kishi bolǵanlıqtan, ampermetrdiń ulıwmalıq qarsılıǵı kishi boladı. Usınıń nátiyjesinde, ampermetrdi shıńırǵa tutastırıw ondaǵı toqtıń kúshin sezilerliktey ózertpeydi. Ampermetrdiń shkalasın ádette onıń tolıq I toqtı (yaǵnıy, shunt hám ólshewshi ásbaptıń ózinen ótetuǵın toqlardıń qosındısınıń kúshin) amperlerde beretuǵınday etip graduırovkalaydı. Kópshilik jaǵdaylarda ampermetrler shuntlardıń jıynaǵına iye boladı, olardı paydalanıp, ásbaptıń sezgirlikin ózertiwge boladı.



90-súwret. S shuntın tutastırıw.



91-súwret. Potenciallar ayırmasın ólshew ushın G ólshew ásbabı menen izbe-iz tutasqan R'_g qarsılıǵın tutastırıw.

Tap sol ólshew ásbabın potentsiallar ayırmasın ólshew ushın da paydalanıwǵa boladı. I toǵı ótip turǵan CC' ótkizgishiniń ushlarındaǵı potentsiallar ayırmasın ólshew zárırlıǵı payda boldı dep boljayıq. Onıń ushın G ólshew ásbabın CC' ótkizgishine *parallel* jalǵaymız (91-súwret).

G ólshew ásbabı arqalı ótip turǵan toqtıń kúshi I_g mınaǵan teń bolsın:

$$I_g = \frac{V_1 - V_2}{R_g}.$$

Bul ańlatpada $V_1 - V_2$ arqalı CC' ótkizgishiniń ushlarındaǵı potentsiallar ayırması, al R_g arqalı G ólshew ásbabınıń qarsılıǵı belgilengen.

Bunnan:

$$V_1 - V_2 = I_g R_g$$

teńligine iye bolamız. Ólshewshi ásbaptıń qarsılıǵı R_g berilgen shama bolǵanlıqtan, I_g toq kúshi $V_1 - V_2$ potentsiallar ayırmasın tikkeley anıqlaydı. Biraq, ólshewshi ásbaptı jalǵawdıń $V_1 - V_2$ potentsiallar ayırmasın sezilerliktey ózgertpeui ushın ásbaptıń menshikli qarsılıǵınıń shaması CC' ótkizgishiniń qarsılıǵınan úlken bolıwı kerek. Onıń ushın ab siminiń óziniń qarsılıǵı jetkilikli bolmaydı, sonlıqtan oǵan úlken R'_g qarsılıǵın izbe-iz jalǵaydı (91-súwret). Ádette, bul qarsılıqtı ásbaptıń qutısınıń ishine ornalastıradı, al ásbaptıń shkalasın voltlerde graduırovkalaydı. Usınday túrde ásbaptı *voltmetr* dep ataydı.

Juwmaqlap, biz mına jaǵdaydı ayta alamız: bir ólshew ásbabın ampermetr sıpatında da, voltmetr sıpatında da paydalanıwǵa boladı; birinshi jaǵdayda qızatuǵın simǵa parallel etip shunttı tutastıradı, ekinshi jaǵdayda qızatuǵın simǵa izbe-iz etip úlken qarsılıqtı jalǵaydı. Ampermetr toqtıń kúshi ólshenetuǵın shınjırdıń uchastkasına izbe-iz jalǵanadı; voltmetr bolsa ushlarındaǵı potentsiallar ayırması ólshenetuǵın shınjırdıń uchastkasına parallel jalǵanadı.

1-mısal. Jılılıq ólshew ásbabındaǵı qızatuǵın ab siminiń qarsılıǵı $R_g = 1 \text{ om}$. Ásbaptıń shkalası 50 bólimge iye, bir bólim 0,01 a ge sáykes keledi. Ásbaptı 15 a ge shekemgi toqlardı ólshew ushın kerek bolatuǵın shunttı saylap alıw kerek.

Sheshimi. Qoyılǵan shártke sáykes ólshew ásbabınıń barlıq shkalası 0,5 a ge sáykes keledi. Demek, shunttıń ab simi arqalı ótip atırǵan toqtıń shamasın

$$n = \frac{I}{I_g} = \frac{15}{0,5} = 30$$

ese kemeytiwi kerek. Bunnan, (2)-formula boyınsha shunttıń biz izlep atırǵan qarsılıǵın tabamız:

$$R_s = \frac{R_g}{n - 1} = \frac{1}{29} \text{ om} = 0,0345 \text{ om}.$$

Ampermetrdiń ulıwmalıq qarsılıǵı R_A

$$\frac{1}{R_A} = \frac{1}{R_s} + \frac{1}{R_g},$$

qatnasınıń járdeminde anıqlanadı (157-paragrafqa qarańız), bunnan

$$R_A = \frac{R_g R_s}{R_g + R_s} = \frac{1 \cdot 0,0345}{1 + 0,0345} \text{ om} \cong 0,0334 \text{ om}$$

shamasın alamız.

Usı ampermetrdiń járdeminde 110 V potentsiallar ayırmasınıń tásirinde qarsılıǵı 40 om bolǵan sim arqalı ótip turǵan toqtıń shaması ólshenedi dep boljayıq. Bul jaǵdayda, ampermetrdi shınjırǵa tutastırıwdıń ondaǵı toqtıń sezilerliktey ózgertpeytuǵınlıǵına ańsat iseniwge boladı. Haqıyqatında da, Om nızamı boyınsha shınjırdaǵı toqtıń kúshi mınaǵan teń:

$$I = \frac{V_1 - V_2}{R} = \frac{110}{40} \text{ a} = 2,750 \text{ a}.$$

Ampermetrdi shınjırǵa jalǵaǵanda ulıwmalıq qarsılıq 0,0334 om ǵa artadı, yaǵnıy $R_1 = 40,0334 \text{ om}$ shamasına teń boladı. Usıǵan sáykes, toqtıń mánisi

$$I = \frac{V_1 - V_2}{R_1} = \frac{110}{40,0334} \text{ a} \cong 2,748 \text{ a}$$

teń bolıp shıǵadı. Toqtıń bul kúshin ampermetr kórsetedi; kórinip turǵanınday, is júzinde bul shama toqtıń dáslepki mánisi 2,75 a den az shamaǵa ayrıladı.

2-mısal. 1-mısalda keltirilgen parametrlerge iye bolǵan qızdırwshı ólshew ásbabın barlıq shkalası 500 v bolǵan voltmetr sıpatında paydalanıw kerek. Onıń ushın *ab* sımına qanday qosımsha R'_g qarsılıqtı izbe-iz jalǵaw kerek?

Sheshimi. SHárt boyınsha, ólshew ásbabınıń barlıq shkalası 0,5 a ge sáykes keledi. Ásbaptıń qısqa shıǵarındaǵı potenciallar ayırmasınıń 500 v ke teń bolıwı ushın, ásbaptıń tolıq qarsılıǵı $R_g + R'_g$

$$R_g + R'_g = \frac{V_1 - V_2}{I} = \frac{500}{0,5} \text{ om} = 1000 \text{ om}.$$

shamasına teń bolıwı kerek. $R_g = 1 \text{ om}$ bolǵanlıqtan, izlenip atırǵan qosımsha qarsılıqtıń $R'_g = 999 \text{ om}$ bolıwı kerek.

Usı ásbaptıń járdeminde CC' ótkizgishiniń ushlarındaǵı potenciallar ayırması ólshenedi dep boljayıq (91-súwretke qarańız), shaması $I = 50 \text{ a}$ toq ótetuǵın qarsılıq $R = 4 \text{ om}$. Bul jaǵdayda voltmetrdi qosqanda CC' ótkizgishiniń ushındaǵı potenciallar ayırmasın sezilerliktey ózgerpeytuǵınlıǵına ańsat iseniwge boladı. Haqıyqatında da, Om nızamı boyınsha, CC' ótkizgishiniń ushlarındaǵı $V_1 - V_2$ potenciallar ayırması mınaǵan teń:

$$V_1 - V_2 = IR = 4 \cdot 50 = 200 \text{ v}.$$

Qarsılıǵı 1000 om bolǵan voltmetrdi CC' ótkizgishine parallel jalǵaǵanda tarmaqlanǵan shıńjırdıń CC' ótkizgishiniń ushlarındaǵı ulıwmalıq qarsılıǵı

$$R_1 = \frac{4 \cdot 1000}{4 + 1000} \text{ om} \cong 3,984 \text{ om}$$

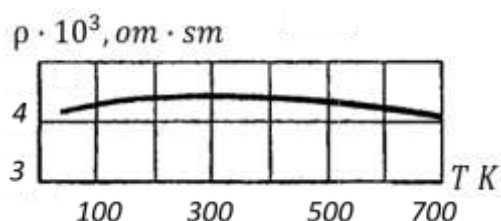
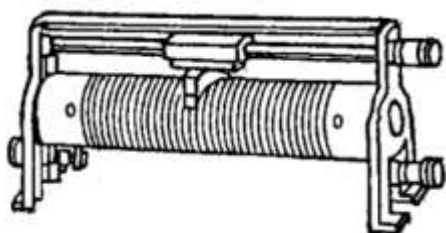
shamasına teń boladı. Qarsılıqtıń usınday kemeyiwı toq kúshiniń bazı bir shamaǵa úlkeyiwine alıp keliwı kerek, biraq, voltmetrdi qosıwdıń saldarınan payda bolatuǵın qáteliktiń maksimalıq mánisin bahalaw ushın biz toq kúshiniń burınǵıday 50 a shamasında qaldı dep esaplay alamız. Bunday jaǵdayda CC' ótkizgishiniń ushındaǵı potenciallar ayırması

$$V'_1 - V'_2 = I \cdot R_1 = 50 \cdot 3,984 \text{ v} \cdot 199,2 \text{ v}$$

shamasına teń boladı. Potenciallardıń usınday ayırmasın voltmetr kórsetedi. Kórinip turǵanınday, onıń mánisi dáslepki mánisten júdá az shamaǵa ayrıladı.

§ 159. Qarsılıqlar hám olardı ólshew. Qarsılıqlardı ólshew ushın reostatlar dep atalatuǵın ásbaplar qullanıladı.

Laboratoriyalıq praktikada úlken bolmaǵan toqlar ushın qozǵaltqıshı bar reostatlardan paydalanadı (ris. 92). Bunday reostat farfor cilindrge oralǵan sımnan turadı. Qozǵaltqıshtı ornınan jılistırıp, shıńjırǵa kirgizilgen sımınıń oramlarınıń sanın ózgeritiwge, usınıń saldarınan kirgiziletuǵın qarsılıqtıń shamasın ózgeritiwge boladı. Sım ushın material sıpatında jetkilikli dárejede joqarı salıstırmalı qarsılıǵı bar jáne kishi temperaturalıq koefficientlerge iye, yaǵnıy qarsılıǵı temperaturadan az ǵárezli bolǵan quymalar (konstantan, manganin, nixrom hám b.) paydalanıladı. 93-súwrette manganin ushın ρ nıń T dan ǵárezligi keltirilgen. Qarsılıqtıń temperaturadan ázzi ǵárezlik reostat arqalı toqtıń ótiwiniń saldarınan qızıwınıń nátiyjesinde onıń qarsılıǵınıń ózgermewi ushın kerek. Usınday reostatlar júdá qolaylı, biraq olardıń konstrukciyası jıllılıqtıń jaqsı alıp beriliwin támiyinley almaydı. Bul kúshli qızıwǵa hám kúshli toqlar bar bolǵan jaǵdaylarda olardı paydalanıwdıń múmkinshiliginiń joǵalıwına alıp keledi.



92-súwret. Qozgaltqışı bar reostat.

93-súwret. Manganinniń salıstırmalı qarsılıǵınıń absolyut temperaturadan ǵárezligi.

Úlken toqlar ushın ramaǵa tartılǵan spiral túrinde oralǵan juwan sımalar yamasa lentalar paydalanıladı (94-súwret). Sırǵanaytuǵın kontakt shınjırǵa reostattıń ayırım bólimleriniń anaw yamasa minaw sanın qosadı.

Berilgen ótkizgishtiń qarsılıǵın ampermetr yamasa voltmetrdiń járdeminde ańsat ólshew múmkin. Ólshenetuǵın MN ótkizgishine izbe-iz (95-súwret) A ampermetri tutastırıladı, al usı ótkizgishke parallel etip V voltmetrin tutastıradı. Usı MN ótkizgishiniń ólsheniwi kerek bolǵan qarsılıǵın R_g arqalı belgileymiz. Meyli, ampermetri I toq kúshin, al voltmetr bolsa qarsılıqtıń ushlarındaǵı $V_1 - V_2$ potenciallar ayırmasın ólsheyteǵın bolsın. Ampermetrdiń járdeminde ólshenetuǵın toq M noqatında tarmaqlanadı: onıń I_x bólimi MN ótkizgish arqalı, al I_g bólimi V voltmetri arqalı ótedi. Eger voltmetrdi tutastırǵan ótkizgishlerdiń qarsılıǵın esapqa almasaq, onda

$$I_g = \frac{V_1 - V_2}{R_g}$$

teńligine iye bolamız. Bunnan MN ótkizgishi arqalı ótetuǵın I_x toǵı

$$I_x = I - I_g = I - \frac{V_1 - V_2}{R_g}$$

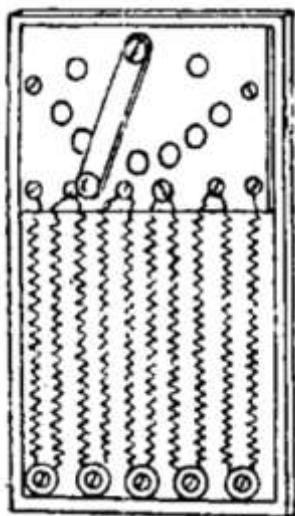
shamasına teń bolıp shıǵadı. Eger voltmetrdiń qarsılıǵı R_g ólshenetuǵın qarsılıq R_x tan kóp úlken bolsa, onda voltmetr arqalı ótetuǵın toq I_g nıń shaması I toǵınan júdá kishi boladı hám sonlıqtan juwıq túrde

$$I_x = I$$

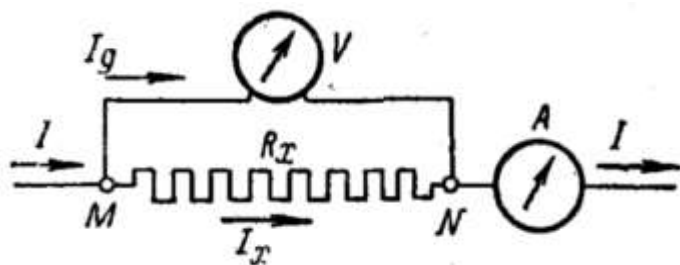
teńligin jaza alamız. Bunnan Om nızamı boyınsha

$$R_x = \frac{V_1 - V_2}{I}$$

qatnasın alamız. Demek, bunday jaǵdayda qarsılıq R_x diń shaması A ampermetri menen V voltmetriniń kórsetiwleri boyınsha tikkeley anıqlanadı eken. Kórinip turǵanıday, bul usıl R_g qarsılıǵı ólshenetuǵın R_x qarsılıǵınan úlken bolǵan voltmetrdi saylap alıwdı talap etedi. Joqarıraq dáliliktegi ólshewler ushın ólshenetuǵın qarsılıqtı standart qarsılıq penen salıstırıwǵa alıp kelinetuǵın basqa usıllardan paydalanadı. Usınday usıllardıń biri tómende táriyiplengen (167-paragraf).



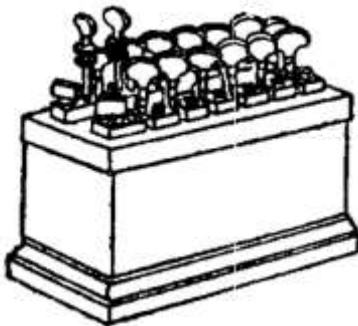
94-súwret. Sırǵanaytuǵın kontaktı bar reostat.



95-súwret. R_x qarsılıǵın ólshew ushın A ampermetrin hám V voltmetrin paydalanıw.

Standart qarsılıqlardı ádette qarsılıqlar magazini dep atalatuǵın dúzilis túrinde soǵadı. Onıń sırtqı kórinisi 96-súwrette keltirilgen. Magazin bir qatar katushkalardan turadı. Hár bir katushkaǵa qarsılıǵı dál belgili bolǵan sim oralǵan, simniń ushları magazinniń qutısınıń izolyaciyalawshı qaqpasına bekitilgen (97-súwret). Plastinalardıń arasında bos orın qaldırıladı hám onı konus tárizli mis shtepsel menen tuyıqlawǵa boladı. SHtepsel ornalastırılmaǵan jaǵdayda toq katushka arqalı ótedi. Bunday bolmaǵanda magazinniń berilgen bóliminiń qarsılıǵı is júzinde nolge teń bolǵan bolar edi. Qarsılıqları hár qıylı bolǵan katushkalardıń jıynaǵı salmaqları hár qıylı bolǵan girlerdi jaylastaratuǵınday tártipte, mısalı, qarsılıqlarınıń shaması bir birinen 0,1 om yamasa 1 om ǵa ózgeshe bolatuǵınday tártipte jaylastırıladı.

§ 160. Ótkizgishtegi erkin elektronlar. Klassikalıq kóz-qaraslar. Joqarıda kórsetip ótkenimizdey, metallar arqalı toqtıń ótiwi ótkizgishtiń ximiyalıq quramınıń qanday da bir ózgerislerine alıp kelmeydi. Bunnan metaldıń elektr ótkizgishtiginiń metaldıń atomlarınıń orın almasırwı menen júrmeytuǵınlıǵı, al elektronlardıń qozǵalıswı menen baylanıslı ekenligi kelip shıǵadı. Metaldıń ótkizgishtiginiń elektronlıq xarakterge iye bolatuǵınlıǵın túsindiriw ushın metaldaǵı atomlardıń barlıǵı bolmasa da, ayırımlarınıń elektronlar menen oń zaryadlanǵan ionlarǵa dissociaciyalanǵan dep boljawǵa tuwrı keledi. Usınıń nátiyjesinde metalda kóp sanlı erkin elektronlar boladı. Bul elektronlar metaldıń ionları tárepinen payda etilgen kristallıq pánjere boyınsha erkin qozǵalıp júre aladı (I tom, 87-paragraftı qarańız). Metaldaǵı erkin elektronlar tártipsiz jıllılıq qozǵalıslarına qatnasadı. Eger sırttan túsirilgen elektr maydanı bar bolatuǵın bolsa, onda elektronlarǵa maydan tárepinen belgili bolǵan baǵıttaǵı kúsh tásir etedi hám olardıń orın almasırwı metaldaǵı elektr toǵın payda etedi.



96-súwret. Qarsılıqlar magazini.



97-súwret. Qarsılıqlar magazininiń dúzilisiniń detalı.

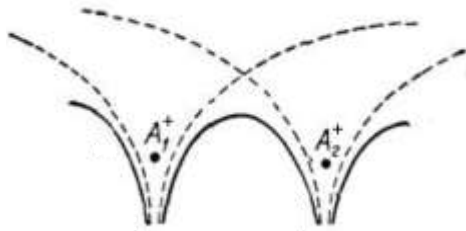
Metaldaǵı elektronlardıń erkin orın almasırwınıń múmkin ekenligi haqqındaǵı elektronlar menen kristallıq pánjereniń túyinlerinde jaylasqan oń zaryadlanǵan ionlar arasındaǵı baylanıs energiyasın qaraw menen tastıyqlanadı. Dáslep bir biri menen qońsılás jáne ara qashıqlıqları ózgeriske usharamaytuǵın A_1^+ hám A_2^+ ionların qaraymız. Ionlardıń hár qaysısınıń noqatlıq zaryad dep qaray alamız. Ionlardıń hár qaysısınıń elektron menen óz-ara tásirlesiwine sáykes keletuǵın potenciallıq energiya E_p mınaǵan teń (I tomdaǵı 61-paragraftaǵı ayılǵanlar menen salıstırıńız):

$$E_p = -\frac{C}{r}.$$

Bul teńlikte C - konstanta, al r - elektron menen ionniń arasındaǵı qashıqlıq. Hár bir ionǵa sáykes keletuǵın E_p potenciallıq energiyanıń mánisi 98-súwrettegi punktir iymekliklerdiń járdeminde kórsetilgen. Al A_1^+ hám A_2^+ ionlarınıń ekewiniń bar bolıwınıń sebebinen payda bolǵan qosındı potenciallıq energiyanıń ózgerisiniń júrisi tutas iymeklik penen sáwlelendirilgen.

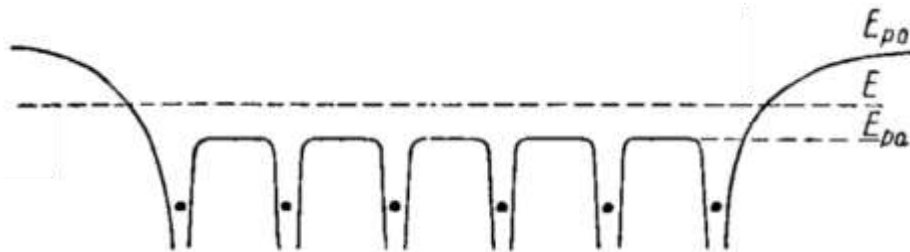
Kristaldıń pánjeresinde A_i^+ ionları durıs jaylasqan jaǵdayda barlıq ionlardıń payda etken tolıq potenciallıq energiyası 99-súwrette keltirilgendey túrge iye boladı. Ionlardıń ortasındaǵı keńislikte potenciallıq energiyanıń iymekligi tegis boladı hám ionlarǵa jaqın orınlarda tar hám

tereñ potencillıq shuqırlardı beredi. Bunday shuqırlardıñ oblastları potencillıq energiyanıñ iymekligi tegis ótetuǵın oblastlarǵa salıstırǵanda kishi; sonlıqtan metaldıń ishinde E_{pa} potencillıq energiya turaqlı mániske iye boladı dep esaplawǵa boladı. Metaldan sırtta potencillıq energiya E_{pa} dan úlken bolǵan bazı bir E_{p0} mánisine iye boladı. Demek, metaldıń ishindegi potencillıq energiya sırttaǵı potencillıq energiyadan kishi, yaǵnıy metaldıń ishinde elektron potencillıq shuqırda jaylasadı. Eger $E_{p0} = 0$ dep boljasaq, onda E_{pa} shaması < 0 boladı. Meyli, elektron $E_{p0} > E > E_{pa}$ teńsizligin qanaatlandıratuǵın E tolıq energiyasına iye bolsın. Bunday elektron metaldıń ishinde erkin qozǵala aladı, biraq metaldan ushıp shıǵa almaydı. Sebebi elektronnıń metaldan shıǵıwı ushın $A = E_{p0} - E > 0$ jumısın islew kerek.



98-súwret. Oń zaryadlangan ionlardıń qasındaǵı potencillıq iymeklikler.

Metallardaǵı toqtıń erkin elektronlardıń qozǵalıslarınıń saldarınan payda bolatuǵınlıǵın, tájiriybelerde tikkeley tastıyqlawǵa boladı.



99-súwret. Kristallardıǵı potencillıq iymeklikler.

Usınday tájiriybelerdiń tiykarında jatatuǵın ideya mınadan ibarat: Qanday da bir tezlik penen qozǵalatuǵın ótkizgishti kóz aldımızǵa elesleteyik. Ótkizgishtiń quramına kiretuǵın elektronlar ózleriniń tártipsiz qozǵalıslarınıń barısında metaldıń pánjeresiniń tulǵası menen úzliksiz soqlıǵısa. Usınıń saldarınan olar ótkizgishtiń qozǵalıǵı baǵıtındaǵı tezliktiń qurawshısına iye boladı hám, usıǵan sáykes onıń menen birge qozǵaladı. Eger ótkizgishti birden tormozlasa, onda elektronlar metaldıń kristallıq pánjeresiniń ishinde bazı bir waqıtqa shekem ótkizgishtiń qozǵalıslarınıń baǵıtında qozǵalısların inerciyası boyınsha dawam etedi. Usınıń nátiyjesinde ótkizgishtiń ishindegi elektronlardıń awısıwı orın aladı, l toǵı payda boladı hám bazı bir muǵdardaǵı Q zaryadı ótkizgish boyınsha alıp ótıledi. Bul Q zaryadınıń muǵdarın bilayınsha esaplawǵa boladı. Meyli, ótkizgishtiń baslanǵısh tezligi v_0 bolsın. Bunnan keyin ol tormozlanadı, yaǵnıy oǵan $-\omega$ tezleniwi beriledi. Bunday jaǵdayda ótkizgishtegi erkin elektronlar birinshi momentte v_0 tezligin saqlaydı, yaǵnıy olar ótkizgishke salıstırǵanda $+\omega$ tezleniwine iye boladı. Elektronlardıń bunday qozǵalıǵı maydannıń E kernewligi bar bolǵan jaǵdaydaǵıday olarǵa ω tezleniwiniń saldarınan $f = eE$ kúshiniń tásir etiwine sáykes keledi.

Solay etip, payda bolǵan bul kúshtiń shaması $f = m\omega$ ke teń bolıwı kerek. Bul teńlikte m arqalı elektronnıń massası belgilengen. Demek maydannıń kernewligi bolǵan E niń mánisi

$$E = \frac{f}{e} = \frac{m}{e} \omega \quad (1)$$

shamasına teń bolıwı kerek. Eger ótkizgishtiń uzınlıǵı l shamasına teń bolsa, onda E kernewliginiń bolıwı ótkizgishtiń ushlarında $V_1 - V_2 = El$ potencillar ayırmasınıń payda bolıwı menen teń. Bul

teńlikke (1)-teńlik boyınsha E niń mánisin qoysaq, onda payda bolǵan potenciallar ayırması ushın

$$V_1 - V_2 = \frac{m}{e} \omega l$$

teńligine iye bolamız. Kristallıq pánjereniń tulǵasına salıstırǵandaǵı elektronlardıń awısıwı menen baylanıslı bolǵan I toǵı ótkizgishtiń ushlarına $V_1 - V_2$ potenciallar ayırması túsken jaǵdayda payda bolatuǵın toqqa ekvivalent. Eger ótkizgishtiń qarsılıǵı R bolsa, onda bul toqtıń kúshi I mınaǵan teń boladı:

$$I = \frac{V_1 - V_2}{R} = \frac{m}{e} \cdot \frac{\omega}{R} l. \quad (2)$$

Meyli, ótkizgishti tolıq tormozlaw ushın ketken waqıt t bolsın. Onda ortasha tezleniw $\omega = \frac{v_0}{t}$ shamasına teń hám (2)-teńlik

$$I = \frac{m}{e} \cdot \frac{v_0}{Rt} l$$

túrine enedi. Bunnan tormozlanıwdıń barısında ótkizgish arqalı ótken elektr zaryadlarınń muǵdarı Q ushın mınaday ańlatpanı alamız:

$$Q = It = \frac{m}{e} \cdot \frac{v_0 l}{R}. \quad (3)$$

Tez qozǵalatuǵın ótkizgishti tormozlap, payda bolǵan potenciallar ayırmasınıń belgisi boyınsha toqtı payda etetuǵın zaryadlardıń belgisin anıqlawǵa boladı, al ótkizgish arqalı ótken zaryadlardıń tolıq muǵdarın ólshep, (3)-formula boyınsha elektronnıń zaryadı e niń onıń massası m ge qatnasın anıqlawǵa boladı:

$$\frac{m}{e} = \frac{v_0 l}{QR}. \quad (4)$$

Tezlenetuǵın ótkizgishte elektr toǵınıń payda bolatuǵınlıǵın birinshi ret rus fizikleri L. I. Mandelshtam menen N. D. Papaleksiler 1913-1914 jılları baqladı. Olar uzın ótkizgish oralǵan katushkanı onıń simmetriya kósheriniń dógerinde tez aylanbalı terbeliske alıp keldi. Ótkizgishtiń ushlarına telefon jalǵanǵan jaǵdayda olar katushkada payda bolǵan toqlardıń sebebinen payda bolǵan sestı esitken.

(3)-formuladan ótken elektr zaryadlarınń muǵdarınıń ótkizgishtiń uzınlıǵına hám onıń baslanǵısh tezligi v_0 ge tuwrı proporcional ekenligin kórinip tur. Elektr zaryadlarınń ólshengendey muǵdarı Q dı alıw ushın múmkin bolǵanınsha úlken tezliklerdi hám múmkin bolǵanınsha uzın bolǵan ótkizgishti alıw kerek. Sanlı maǵlıwmatlardı beretuǵın tájiriybelerdi 1916-jılı Styuart penen Tolmen ótkerdi. Olar uzın ótkizgish oralǵan katushkanı tez tormozladı. Katushka Q zaryadın ólsheytuǵın ballastikalıq galvanometr menen tutastırılǵan (230-paragrafqa qarańız). Bul tájiriybeler ótkizgishtegi toqtı teris zaryadlardıń payda etetuǵınlıǵın kórsetti; e/m qatnası ushın $4,8 \cdot 10^{17} \frac{\text{zaryadtıń CGSE-birligi}}{g}$ shaması alındı. e/m niń bul mánisi elektronlar ushın basqa usıllardıń járdeminde alınǵan mániske jaqın (218-paragrafqa qarańız).

Házirgi waqıtları elektronnıń zaryadınıń onıń massasına qatnası ushın

$$\frac{e}{m} = 5,273 \cdot 10^{17} \frac{\text{zaryadtıń CGSE - birligi}}{g}$$

mánisi qabıl etilgen¹⁶.

e/m qatnasınıń mánisin jáne elektronnıń zaryadı e niń mánisin bilip [Millikenniń tájiriybesinen (151-paragraf) $e = 4,803 \cdot 10^{-10}$ CGSE], elektronnıń massasın tabamız:

$$m = 9,109 \cdot 10^{-28} g$$

hám bul shama vodorod atomınıń massasınıń $\frac{1}{1838}$ úlesine teń.

¹⁶ Házirgi waqıtları qabıl etilgen mánisi $-1.7588200108 \times 10^{11} \frac{\text{Kl}}{\text{kg}} = -5.27280923429 \times 10^{17} \text{CGSE}/g$ (Awdarıwshılar).

...

§ 161. Klassikalıq elektronlıq teoriyanıń kóz-qarasları boyınsha Om hám Lenc-Djoul nızamları. Metallardaǵı erkin elektronlar haqqındaǵı kóz-qaraslar birinshi ret Lorenc tárepinen rawajlandırıldı; ol metallardıń elektr ótkizgishliginiń klassikalıq teoriyasınıń tiykarında jattı. Lorenc metaldaǵı erkin elektronlardı úziksiz tártipsiz qozǵalıslı halında boladı hám usınday mániste metaldaǵı elektronlardıń jıynaǵın "elektronlıq gaz" dep esapladı. Elektronlar kristallıq pánjereniń tulǵası menen soqlıǵısadı hám, usıǵan sáykes, erkin júriw jolınıń ortasha mánisi menen táriyiplenedi dep esapladı. Elektronlardıń erkin júriw jolınıń ortasha mánisin $\bar{\lambda}$ arqalı belgileymiz. Metaldıń kóleminiń bir birligindegi erkin elektronlardıń sanı n_0 di kólem birligindegi atomlardıń sanına teń dep esaplawǵa boladı. Onıń mánisi $\frac{N}{\mu} \delta$ shamasına teń. Bul ańlatpadaǵı N Avagadro sanı, μ - metaldıń molekullıq salmaǵı, δ - onıń tıǵızlıǵı. Bunnan

$$n_0 \cong \frac{\delta}{\mu} N \quad (1)$$

teńligine iye bolamız.

Statistikaniń principlerinen kelip shıǵıp, Lorenc elektronlardıń qozǵalıslarınıń ortasha kinetikalıq energiyasın atomlardıń ilgerilemeli qozǵalıslarınıń ortasha kinetikalıq energiyasına teń dep esapladı. Al bunday kinetikalıq energiyaniń mánisiniń $\frac{3}{2} kT$ shamasına teń ekenligi belgili. Bul ańlatpadaǵı k - Bolcman turaqlısı, T - absolyut shkaladaǵı temperatura. Bunnan elektronnıń tártipsiz qozǵalıslarınıń ortasha kvadratlıq tezligin $\bar{u}$ arqalı, al onıń massasın m arqalı belgilep

$$\frac{m\bar{u}^2}{2} = \frac{3}{2} kT \quad (2)$$

túrindegi teńlikke yamasa

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} \quad (2a)$$

teńligine iye bolamız.

Bunnan aldınǵı paragrafta elektronnıń massasınıń vodorod atomınıń massasınan shama menen 1840 ese kishi ekenligin aytqan edik. Sonlıqtan, elektronlardıń tártipsiz jıllılıq qozǵalıslarınıń ortasha tezliginiń atomlardıń jıllılıq qozǵalıslarınıń ortasha tezliginen kóp úlken bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Vodorod atomınıń massasın bilayınsha kórsetiwge boladı: $M = AM_H$, bul ańlatpada A - bul atomnıń atomlıq salmaǵı, al M_H - vodorod atomınıń massası¹⁷. Bunnan bul atomnıń jıllılıq qozǵalıslarınıń tezligi (ortasha kvadratlıq tezlik):

$$\bar{u}_A = \sqrt{\frac{3kT}{AM_H}}$$

shamasına teń, al usıǵan sáykes

$$\frac{\bar{u}}{\bar{u}_A} = \sqrt{\frac{A \cdot M_H}{m}} = \sqrt{1838A} \cong 43\sqrt{A}$$

qatnasın alamız.

Gaz molekullarınıń (atomlardıń) ójire temperaturalarındaǵı ortasha kvadratlıq tezligi shama menen sekunda bir neshe júz metrdi, yaǵnıy juwıq túrde 10^5 sm/sek shamasına teń. Demek, elektronlardıń jıllılıq qozǵalıslarınıń tezliginiń mánisi 10^7 sm/sek shamasınıń átirapında boladı.

Elektronlardıń tártipsiz jıllılıq qozǵalısları qanday da bir baǵıtta elektr zaryadlarınıń alıp beriliwin boldırmaydı hám, soǵan sáykes, elektr toǵınıń payda bolıwına alıp kelmeydi. Eger

¹⁷ Atomlıq salmaqtnı ximiyalıq anıqlaması boyınsha M_H tiń ornına uglerod atomınıń atomlıq salmaǵınıń 1/12 bólegin alıw kerek. Biraq ótkerilgen esaplawlarda bunday almasıwıwdıń áhmiyeti joq.

metaldır ishinde qanday da bir sırtqı derektiń járdeminde belgili baǵıttaǵı elektr maydanı payda etilse, onda usınday maydannırń tásirinde elektronlar tártiplesken qozǵalıstırń qosımsha v tezligine iye boladı. Bul baǵıtlangan qozǵalıstırń zaryadtırń alıp júriwine alıp keledi hám, usıǵan sáykes, elektr toǵınıń payda bolıwına alıp keledi. Usınday baǵıtlangan qozǵalıstırń júdá kishi bolǵan tezliginiń júdá úlken bolǵan tıǵızlıqtaǵı toqlardıń payda ete alatuǵınlıǵın ańsat kórsetiwge boladı.

Elektronlardırń baǵıtlangan qozǵalıstırń ortasha tezligin $\bar{v}$ arqalı belgileybiz. Bunday jaǵdayda tezliktiń baǵıtına perpendikulyar qoyılǵan bettiń bir birligi arqalı bir waqıt birligine teń waqıt ishindegi ótetuǵın elektronlardırń sanı $n_0 \bar{v}$ shamasına teń boladı. Hár bir elektron e zaryadın alıp júretuǵın bolǵanlıqtan, onda bettiń bir birligi arqalı waqıt birliginde ótetuǵın toqtırń tıǵızlıǵı i ushın mınaday teńlikti jaza alamız:

$$i = en_0 \bar{v}. \quad (3)$$

Baǵıtlangan qozǵalıstırń tezligi bolǵan $\bar{v}$ shamasınıń qanday mániske iye bolatuǵınlıǵın anıqlaw ushın mınaday ayqın maǵlıwmatlardı alamız: meyli, ótkizgish arqalı tıǵızlıǵı $i = 100 \frac{a}{sm^2} = 3 \cdot 10^{11} \frac{\text{toq kúshiniń CGSE-birligi}}{sm^2}$ shamasına teń toq ótetuǵın bolsın. Elektronlardırń baǵıtlangan qozǵalıstırń tezligi toqtırń tıǵızlıǵı menen (3)-teńlik boyınsha baylanısqa:

$$\bar{v} = \frac{i}{n_0 e}.$$

Elektronnırń zaryadı $e = 4,8 \cdot 10^{-10} \text{ CGSE}$. (1)-teńlik boyınsha metaldırń kólem birligindegi erkin elektronlardırń sanı bolǵan n_0 shamasınıń mánisi $\frac{N}{\mu} \delta$ ge teń. Ádettegi metall ótkizgishler ushın molekualıq salmaqıń shaması bir neshe onlaǵan, mısalı mıs ushın $\mu = 64 \text{ g/mol}$. Kópshilik jaǵdaylarda metallardıń tıǵızlıǵı bolǵan δ shaması 10 nan aspaydı. Bunnan $\bar{v}$ ushın

$$\bar{v} = \frac{i\mu}{N\delta e} \cong \frac{3 \cdot 10^{11} \cdot 60}{6 \cdot 10^{23} \cdot 10 \cdot 4,8 \cdot 10^{-10}} \frac{sm}{sek} \cong 6 \cdot 10^{-3} \frac{sm}{sek}$$

shamasındaǵı mániske iye bolamız.

Demek, biz toq ótip turǵan metaldaǵı elektronlardırń tártiplesken qozǵalıstırń tezligi júdá kishi boladı eken hám ójire temperaturalarında olardıń tártipsiz jıllılıq qozǵalıstırń tezligi $\bar{u}$ dan bir neshe tártipke kishi.

Toqtırń tıǵızlıǵı i di elektronlardırń tártiplesken qozǵalıstırń payda etetuǵın elektr maydanınıń kernewligi E menen baylanıstıramız.

Kernewligi E bolǵan elektr maydanı bolǵanda hár bir elektrongá E niń baǵıtına qarama-qarsı baǵıtlangan $f = eE$ kúshi tásir etedi. Sebebi elektronnırń zaryadı teris. Bul kúshitiń tásirinde hár bir elektron óziniń erkin júriw jolında

$$\omega = \frac{f}{m} = \frac{eE}{m} \quad (4)$$

tezleniwine iye boladı. Eger maydannırń kernewligi turaqlı bolsa, onda elektronnırń tezleniw de turaqlı hám ol teń ólshewli tezleniw menen qozǵaladı. Biraq (4)-qozǵalıstırń teńlemesi elektronnırń tek *eki soqlıǵısıwınıń arasında ǵana orınlı boladı*. Soqlıǵısıw momentinde elektrongá $f = eE$ kúshinen ádewir úlken bolǵan kúsh tásir etedi, sonıń saldarınan onıń qozǵalıstırń baǵıtlanganlıǵı buzıladı. Solay etip, tikkeley soqlıǵısqannan keyingi elektronlardırń kóp sanı ushın baǵıtlangan qozǵalıstırń tezligi ortasha nolge teń boladı. Erkin júriw jolınıń aqırında elektron tezleniw ω menen eki soqlıǵısıwdırń arasındaǵı waqıttırń kóbeymesine teń tezlikke iye boladı:

$$v_1 = \omega \tau = \frac{eE}{m} \tau. \quad (5)$$

Barlıq elektronlar ushın erkin júriw waqıtı $\bar{\tau}$ di erkin júriw jolınıń ortasha uzınlıǵı bolǵan $\bar{\lambda}$ shamasın elektronlardırń ortasha tezligine bóliw jolı menen alamız. Toqtırń ádettegedey tıǵızlıqlarında hám ádettegi temperaturalarda alıp júriwetuǵın zaryadtırń tezliginiń shaması tártipsiz jıllılıq qozǵalıstırń tezligi bolǵan $\bar{u}$ shamasına salıstırǵanda júdá kishkene bolǵanlıqtan biz birinshi tezlikti (tártiplesken qozǵalıstırń ushın ortasha tezlikti) esapqa almasaq ta, sonlıqtan

$$\bar{\tau} = \frac{\bar{\lambda}}{\bar{u}}$$

teńligi orınlanadı dep esaplawımızǵa boladı. $\bar{\tau}$ tır bul mánisin (5)-ańlatpaǵa qoyıp, erkin júriw jolınıń aqırında elektronlardıń baǵıtlangan qozǵalıstıń mınaday ortasha tezlikke iye bolatuǵınlıǵına iye bolamız:

$$v_1 = \frac{eE}{m} \cdot \frac{\bar{\lambda}}{\bar{u}}. \quad (6)$$

Erkin júriw jolındaǵı ortasha waqıttır ishindegi tártiplesken qozǵalıstır ortasha tezligi bolǵan $\bar{v}$ shaması v_1 tezliginiń yarımına teń boladı (soqlıǵısıwlardıń arasındaǵı qozǵalıstı teń ólshewli tezleniwshi qozǵalıstı dep esaplaymız):

$$\bar{v} = \frac{1}{2} v_1 = \frac{1}{2} \frac{eE}{m} \cdot \frac{\bar{\lambda}}{\bar{u}}.$$

Demek, elektr maydanınıń tásirinde elektronlardıń tártipsiz qozǵalıstına baǵıtlangan qozǵalıstı qosıladı, bul qozǵalıstır ortasha tezligi elektr maydanınıń tezligi E ge proporcional.

Bul alıp júriwshi qozǵalıstır¹⁸ ortasha tezliginiń bolıwı metaldaǵı toqtır payda bolıwına alıp keledi.

$\bar{v}$ ushın tabılǵan ańlatpanı (3)-formulaǵa qoyıp bul toqtır tıǵızlıǵın tabamız:

$$i = \frac{1}{2} \cdot \frac{e^2 n_0 \bar{\lambda}}{m \cdot \bar{u}} \cdot E \quad (7)$$

Berilgen ótkizgish ushın berilgen temperaturada $\frac{e^2 n_0 \bar{\lambda}}{m \cdot \bar{u}}$ kóbeytiwshisi turaqlı, sonlıqtan sońǵı ańlatpa toqtır tıǵızlıǵı ushın $i = \sigma E$ Om nızamı bolıp tabıladı. Bul nızam boyınsha toqtır tıǵızlıǵı (155-paragrafqa qarańız) elektr maydanınıń kernewligi E ge tuwrı proporcional.

Solay etip, Om nızamı joqarıda keltirilgen metallardıń elektronlıq teoriyasınan tikkeley kelip shıǵadı eken.

(7)-formulanı Om nızamı ushın jazılǵan $i = \sigma E$ ańlatpa menen salıstırıp,

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{e^2 n_0 \bar{\lambda}}{m \cdot \bar{u}} = \sigma \quad (8)$$

shamasınıń metaldıń salıstırmalı ótkizgishligi bolıp tabılatuǵınlıǵın kóremiz. Bunnan, metaldıń salıstırmalı ótkizgishliginiń onıń kólem birligindegi erkin elektronlardıń sanı menen elektronlardıń erkin júriw jolınıń uzınlıǵı $\bar{\lambda}$ ge tuwrı proporcional ekenligi kelip shıǵadı.

Lenc-Djoul nızamın metallardıń elektronlıq teoriyasınıń tiykarında tallaymız. Sırttan túsirilgen elektr maydanınıń tásirinde qozǵalıp, elektronlar ózleriniń $\bar{\lambda}$ erkin júriw jolında baǵıtlangan qozǵalıstı menen baylanıslı bolǵan v tezligine sáykes kinetikalıq energiyaǵa iye boladı. Soqlıǵısıwdıń saldarınan elektronlar kinetikalıq energiyasın metaldıń pánjeresiniń tulǵasına beredi. Soqlıǵısıwdan keyin túsirilgen maydanniń tásirinde elektronlar jáne de kinetikalıq energiyaǵa iye boladı hám bul energiya jáne metallǵa beriledi. Nátiyjede metall elektr maydanınıń kúshleriniń jumısınıń esabınan qızadı.

Ótkizgishtıń kóleminiń bir birliginde waqıt birligi ishindegi bólinip shıǵatuǵın energiyanı esaplaymız.

Joqarıda kórsetilip ótilgenindey [(6)-formula], óziniń erkin júriw jolınıń aqırında

$$v_1 = \frac{eE}{m} \cdot \frac{\bar{\lambda}}{\bar{u}}$$

shamasına teń tezlikke iye boladı. Sonlıqtan, soqlıǵısıwdıń aqıbetinde elektronnıń beretuǵın energiyasınıń muǵdarı

$$E_k = \frac{mv_1^2}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{e^2 E^2 \bar{\lambda}^2}{m \bar{u}^2}$$

¹⁸ Rus tilindegi "perenosnoe dvizhenie" sózi "alıp júriwshi qozǵalıstı" dep awdarılǵan (Awdarıwshılar).

shamasına teń boladı. Waqıttıń bir birliginde elektron ortasha $\bar{z}$ ret soqlıǵısıwǵa ushıraydı. I tomnıń 53-paragrafında kórsetilip ótilgenindey, soqlıǵısıwlardıń sanı $\bar{z}$ tiń erkin júriw jolınıń ortasha uzınlıǵı $\bar{\lambda}$ hám jıllılıq qozǵalıslarınıń tezligi menen bılayınsha baylanısqa:

$$\bar{\lambda} = \frac{\bar{u}}{\bar{\omega}}.$$

Ótkizgishtıń kólem birligindegi bir birlik waqıttıń ishinde beriletuǵın energiyanıń shamasın E_k nı waqıt birliginiń ishindegi bir elektron ushın soqlıǵısıwlar sanı $\bar{z}$ ke hám elektronlardıń kólem birligindegi sanı n_0 ge kóbeytiw jolı menen alamız:

$$\omega = E_k \bar{z} \cdot n_0 = \frac{1}{2} \frac{n_0 e^2 \bar{\lambda}}{m \bar{u}} E^2.$$

(8)-formuladaǵı $\frac{1}{2} \frac{n_0 e^2 \bar{\lambda}}{m \bar{u}}$ kóbeytiwshisi metaldıń salıstırmalı ótkizgishtigi σ ǵa teń. Bunnan, 157-paragrafta keltirilgen Lenc-Djoul nızamına sáykes keletuǵın [(4)- formula]

$$\omega = \sigma E^2$$

formulasına iye bolamız.

Demek, metallardaǵı erkin elektronlar haqqındaǵı kóz-qaraslar Om jáne Lenc-Djoul nızamların túsindire aladı eken. Biraq, bizler kelesi paragraflarda teoriyanıń bunnan bılaj rawajlanıwınıń ádewir qıyınshılıqlarǵa ushıraytuǵınlıǵın kóremiz. Bunday qıyınshılıqlardı tek kvantlıq mexanikanıń járdeminde jeńiwge boladı.

§ 162. Metallardıń elektr ótkizgishtigi menen jıllılıq ótkizgishtigi arasındadı baylanıs. Videman-Franc nızamı bunnan aldınǵı paragrafta alınǵan juwmaqlardıń áhmiyetli nátiyjesi bolıp tabıladı. Bul nızam elektr ótkizgishtik qubılısı menen jıllılıq ótkizgishtik qubılısın baylanıstıradı. Metallar jıllılıqtı jaqsı ótkizgishter, al dielektrikler jıllılıqtı jaman ótkizgishter bolıp tabıladı. Sonlıqtan, metallardıń jıllılıq ótkizgishtiginiń erkin elektronlardıń tásirinde payda boladı dep boljaw tábiyiy. Bunday boljawdı qabıl etip, metallardıń jıllılıq ótkizgishtigi ushın gazlerdiń jıllılıq ótkizgishtigi ushın jazılǵan koefficientti qabıl etiwge boladı dep esaplaymız. Sebebi, jıllılıqtıń elektronlar hám molekulalar tárepinen alıp beriliwiniń mexanizmleri birdey. Sonlıqtan, metaldıń jıllılıq ótkizgishtik koefficienti κ ushın I tomdaǵı 56-paragrafta keltirip shıǵarılǵan (6)-formulanı erkinlik dárejeleriniń sanı $i = 3$ dep qabıl etip, tikkeley paydalanamız:

$$\kappa = \frac{1}{2} n_0 k \bar{u} \bar{\lambda}.$$

Bul ańlatpada k - Bolcman turaqlısı, n_0 - elektronlardıń kóbem birligindegi sanı, $\bar{\lambda}$ - olardıń metaldıń pánjeresindegi erkin júriw jolınıń uzınlıǵı, $\bar{u}$ - jıllılıq qozǵalıslarınıń ortasha tezligi.

Jıllılıq koefficienti κ nıń 161-paragraftaǵı (8)-formulanıń járdeminde esaplanatuǵın elektr ótkizgishtik koefficienti σ ǵa qatnasın alıp, mınaday katnasqa iye bolamız:

$$\frac{\kappa}{\sigma} = \frac{m \bar{u}^2}{e^2} k.$$

$m \bar{u}^2 / 2$ shaması elektronlardıń ortasha kinetikalıq energiyası bolıp tabıladı; eger usı energiyanı molekulalardıń (atomlardıń) tap sol temperaturadaǵı ortasha kinetikalıq energiyasına teń dep, yaǵnıy $\frac{3}{2} kT$ shamasına teń dep esaplasaq, onda κ / σ qatnası

$$\frac{\kappa}{\sigma} = \frac{3k^2}{e^2} T$$

túrine enedi. Bul qatnasta k hám e shamaları turaqlılar bolıp tabıladı (Bolcman turaqlısı hám elektronnıń zaryadı). Bunnan mınaday jaǵdayǵa iye bolamız: jıllılıq ótkizgishtik koefficienti κ nıń elektr ótkizgishtik koefficienti σ qa qatnası absolyut temperatura T ǵa proporcional hám metaldıń sortınan ǵárezli emes.

Bul nızamlıq eksperimentallıq jol menen Videman hám Franc tárepinen ashıldı. Eger jıllılıq ótkizgishtik koefficienti κ nı $kal/(grad \cdot sm \cdot sek)$ larda, al elektr ótkizgishtik koefficienti σ nı $om^{-1} \cdot sm^{-1}$ larda ańǵartsaq, onda T nıń aldındaǵı kóbeytiwshi hár qıylı metallar ushın $(4,6 - 5,5) \cdot 10^{-9}$

shamasına teń boladı. Bul jende keltirilip shıǵarılǵan $3k^2/e^2$ qatnasınıń teoriyalıq mánisi tap sol birliklerde $5,3 \cdot 10^{-9}$ ǵa teń. Biraq, eger κ menen σ lar ushın jazılǵan formulalardı Maksveldiń tezlikler boyınsha tarqalıw formulasınıń tiykarında jetilistirsek (dálligin joqarılatısaq), onda alınǵan nátiyjelerdiń tájiriybelerde alınǵan nátiyjelerge sáykes keliwi tómendeydi. Bul sáykes keliwdiń tosınan júzege keletuǵın xarakterge iye ekenligin hám teoriyanı bunnan bılay rawajlandırıwdıń zárúrligin kórsetedi. Bizler metaldaǵı erkin elektronlardıń elektr ótkizgishlik hám onıń menen baylanıslı bolǵan bir qatar qubılıslardı ulıwma túrde bolsa da, bári bir, kóp jaǵdaylarda teoriya menen tájiriybeniń arasında aytarlıqtay sáykes kelmewler orın aladı. Elektr ótkizgishlik ushın jazılǵan $\sigma = \frac{1}{2} \frac{n_0 e^2 \bar{\lambda}}{m \bar{u}}$ koefficientiniń ańlatpası tájiriybelerde tikkeley ólshenbeytuǵın eki turaqlıń óziniń ishine aladı: n_0 - metaldıń ishindegi kólem birligindegi erkin elektronlardıń sanı hám $\bar{\lambda}$ - elektronnıń erkin júriw jolınıń ortasha uzınlıǵı. Lorenc teoriyası n_0 shaması kólem birligindegi atomlardıń sanına, al $\bar{\lambda}$ niń mánisi ótkizgishtiń kristallıq pánjeresindegi ionlardıń arasındaǵı qashılıqqa teń dep boljaydı. Bul boljawlar tábiyiy hám elektr ótkizgishlik koefficienti ushın alınǵan tájiriybelik mánislerge qayshı kelmeydi. Biraq, σ ushın alınǵan ańlatpa durıs temperaturalıq ǵárezlikti bermeydi, sebebi σ ushın jazılǵan ańlatpadan temperaturadan sózsiz ǵárezli bolǵan birden-bir aǵza elektronlardıń jıllılıq qozǵalıwınıń tezligi $\bar{u}$ bolıp tabıladı. Kinetikalıq teoriyaǵa sáykes, bul shamanıń mánisi T absolyut temperaturanıń kvadrat túbirinen ǵárezli. Biraq, tájiriybeler (154-paragraf) salıstırmalı qarsılıq ρ nıń absolyut temperaturaǵa tuwrı proporcional, al usıǵan sáykes σ shamasınıń elektr ótkizgishliginiń temperaturanıń birinshi dárejesine kerı proporcional ekenligin kórsetedi; nátiyjede tájiriybeniń juwmaqlarına sáykeslikti ornatiw ushın $n_0 \bar{\lambda}$ kóbeymesin absolyut temperaturanıń kvadrat túbirine kerı proporcional ózgeredi dep esaplaw kerek boladı; biraq onı tiykarlaw dım qıyın.

Teoriyalıq kóz-qaraslar menen tájiriybelerde alınǵan maǵlıwmatlardıń arasındaǵı jáne bir sáykes kelmewshilik onnan da keskin túrge iye. Ótkizgishte qozǵalatuǵın hám energiyaǵa iye bolatuǵın kóp sanlı erkin elektronlar haqqındaǵı boljaw ótkizgishlerdiń jıllılıq sıymılıǵınıń ótkizbeytuǵın qattı denelerdiń sıymılıǵınan ádewir úlken boladı degen pikirdi payda etedi. Elektronlardıń sanı atomlardıń sanı menen bara-bar dep esaplap, biz zattıń hár bir gramm-molekulası ushın qosımsha ishki energiyanı alamız. Bul qosımsha energiya elektronlardıń tártipsiz qozǵalısları menen baylanıslı hám $\frac{3}{2} kNT = \frac{3}{2} RT$ shamasına teń bolıwı kerek. Bul teńlikte R arqalı gaz turaqlısı belgilengen.

Bul mollik jıllılıq sıymılıǵınıń $\frac{3}{2} R \cong 3 \text{ kal/grad} \cdot \text{mol}$ shamasına ósetuǵınlıǵına alıp keledi. Biraq, tájiriybeler ótkizgishlerdiń Dyulong hám Pti nızamın ótkizbeytuǵın denelernen jaman emes qanaatlandıratuǵınlıǵın kórsetedi (I tom, 93-paragraftı qarańız) hám olardıń mollik jıllılıq sıymılıǵı biziń tallawlarımızǵa sáykes $9 \text{ kal/(grad} \cdot \text{mol)}$ shamasına emes, al shama menen $6 \text{ kal/grad} \cdot \text{mol}$ ge teń.

Demek, elektr ótkizgishlik hám jıllılıq ótkizgishlik processlerine qatnasatuǵın elektronlar qanday da bir sebeplerge baylanıslı ótkizgishtiń jıllılıq sıymılıǵına tásir etpeydi eken. Bul jaǵdaydı Lorenc teoriyasınıń kóz-qarasları boyınsha túsindiriwdiń múmkinshiligi joq hám tek kvantlıq mexanikanıń járdeminde túsindiriledi.

§ 163. Metallardıń elektr ótkizgishliginiń kvantlıq teoriyası. Bunnan aldınǵı paragrafta kórsetilip ótilgenindey, elektr ótkizgishlik teoriyasınıń tek kvantlıq mexanikanıń járdeminde rawajlandırılıwı múmkin. Kvantlıq mexanikanıń klassikalıq mexanikadan tiykarǵı ayırması mınadan ibarat: kvantlıq mexanikanıń kóz-qarası boyınsha ulıwma aytqanda bólekshelerdiń sisteması bir birinen belgili bolǵan ayırmashılıqlarǵa iye (úzlikli, "diskret") energiyalıq hallarda turadı, al klassikalıq teoriya boyınsha sistema energiyanıń belgili bolǵan shekleriniń ishindegi energiyanıń qálegen mánisine iye hallarda tura aladı. Kvantlıq kóz-qaraslar boyınsha múmkin bolǵan bir haldan ekinshi halǵa ótiw sekirmeli túrde energiyanıń shekli ΔE shamasına ózgeriwi

menen ámelge asadı. Bunday juwmaq atomlıq fizika menen molekualıq fizika oblastlarına tiyisli bolǵan kóp sanlı faktler menen tastıyıqlanadı (III tomǵa qarańız).

Aytılǵan jaǵdaylardı ayqın mısıl menen illyustriciyalaymız. Meyli bir elektron koordinata basında jaylasqan noqatlıq oń zaryadtırn kulonlıq maydanında jaylasqan bolsın. Bunday jaǵdayda onıń potencialı E_p mınaǵan teń:

$$E_p = -\frac{C}{r}.$$

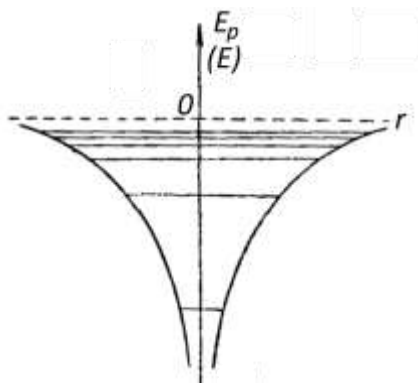
Bul teńlikte C - oń konstanta, al r - koordinata basınan elektronga shekemgi qashıqlıq (100-súwret). Bul jaǵdayda kvantlıq teoriya boyınsha (III tomǵa qarańız) teris energiyalar oblastındaǵı ($E < 0$) elektronnıń tolıq energiyası

$$E = -\frac{B}{n^2} \quad (1)$$

shamalarınń birewine teń boladı. Bul ańlatpada B - konstanta, al n sanı pútin sanlardıń mánisin qabıl etedi: $n = 1, 2, 3, \dots$ (1)-formula boyınsha esaplangan energiyalardıń mánisleri 100-súwrette gorizont baǵıtındaǵı sızıqlarǵa ("qáddilerge") sáykes keledi.

Energiyanıń shamalarınń úzlikli ekenligi haqqındaǵı juwmaq atomlıq sistemalar ushın durıs boladı. Dara jaǵdayda, vodorod atomınń hám oǵan uqsas bolǵan ionlardıń (atom yadrosınń kulonlıq maydanındaǵı bir elektron) múmkin bolǵan energiyalarınń mánisleri (1)-formulanıń járdeminde anıqlanadı. Usınıń menen birge kristallarda da elektronlar tek belgili bolǵan energiya qáddilerinde tura aladı.

160-paragrafta kórsetilip ótilgenindey, metaldaǵı elektronlardıń bir bólimi belgili bolǵan atomlar menen baylanısın úzedi hám potenciallıq shuqırdań ishinde erkin qozǵaladı. Biraq, kvantlıq mexanikanıń kóz-qarasları boyınsha bunday qozǵalı klassikalıq teoriyadaǵı qozǵalıstan elektronlardıń energiyasınıń tek úzlikli bolǵan mánislerge iye bolıwı menen ayrıladı. Elektronlardıń kristallardaǵı energiyasınıń bul mánisleriniń qáddilerdiń jıynaǵı túrinde kórsetiliwi múmkin, al ádettegidey ólshemlerge iye bolatuǵın kristallardaǵı qáddileriniń sanı oǵada úlken. Sonlıqtan, qońsılas qáddiler bir birine júdá jaqın jaylasadı (101-súwret).



100-súwret. Kulon maydanındaǵı elektronnıń energiyasınıń qáddileri.



101-súwret. Elektronlardıń kristallardaǵı energiyalarınń qáddileri.

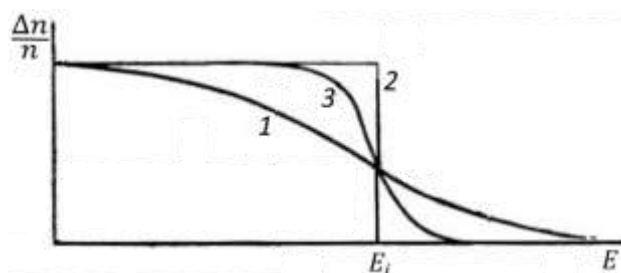
Elektr ótkizgishlikti túsiniw ushın kvantlıq mexanikanıń klassikalıq mexanikadan jáne bir ózgesheligi bar. Bul ayırma elektronlardıń energiyanıń qáddileri boyınsha tarqalıwına tiyisli. Klassikalıq kóz-qaraslar boyınsha, energiya qáddileri boyınsha elektronlar Bolcman nızamı boyınsha tarqaladı. Bunday tarqalıwǵa 102-súwrettegi 1-ıymeklik sáykes keledi. Kvantlıq mexanikada bolsa elektronlar Pauli principi dep atalatuǵın principke baǵınatuǵın bolǵanlıqtan, tarqalıw basqasha boladı. Bul princip boyınsha energiyanıń bir qáddinde (ol "azǵınǵan" bolmaǵan jaǵdayda) eki elektronnan aslam elektronnıń jaylasıwı múmkin emes. Bul elektronlar bir birinen óziniń menshikli magnit momentleri boyınsha ayrıladı (III tomǵa qarańız).

Pauli principinen absolyut nol temperaturadağı ($T = 0$) elektronlardıń energiyanıń qáddileri boyınsha jaylasıwınıń klassikalıq hám kvantlıq ayırmaları dárhál kelip shıǵadı. Haqıyqatında da, klassikalıq kóz-qaraslar boyınsha $T = 0$ bolǵan jaǵdayda barlıq elektronlardıń energiylarınıń nolge teń bolıwı kerek. Pauli principini boyınsha $T = 0$ temperaturada bir qáddidegi elektronnıń sanı ekewden úlken bolmaydı. Eger kristaldaǵı erkin elektronlardıń sanı n bolsa, onda olar $T = 0$ temperaturada eń tómen bolǵan $n/2$ dana energiya qáddilerinde jaylasadı. Bunday jaǵdayda elektronlardıń qáddiler boyınsha tarqalıwı 102-súwrettegi 2-sınıq sızıqlardıń járdeminde kórsetiledi. Meyli E_i arqalı elektronlar menen toltırılǵan sońǵı qáddiniń energiyanıń ańǵartatuǵın bolsın (101-súwret). 2 iymekligi $T = 0$ bolǵan jaǵdayda energiyları $E \leq E_i$ shamasına teń bolǵan elektronlar menen birdey bolıp toltırılǵanlıǵın bildiredi (hár bir qáddide eki elektronnan); al $E > E_i$ energiylarǵa sáykes keletuǵın qáddiler bos. $T \neq 0$ temperaturalardaǵı elektronlardıń qáddiler boyınsha tarqalıwı Fermi nızamına sáykes anıqlanadı hám bul nızamǵa 102-súwrettegi 3 iymekligi sáykes keledi¹⁹. Júdá joqarı temperaturalarda Fermi iymekligi Bolcmanń klassikalıq nızamına sáykes keletuǵın iymeklikke jaqınlasadı.

102-súwret.

Elektronlardıń energiya qáddileri boyınsha tarqalıwı.

- 1 - Bolcman boyınsha $T \neq 0$ temperaturada,
- 2 - Fermi boyınsha $T = 0$ temperaturada,
- 3 - Fermi boyınsha $T \neq 0$ temperaturada.



Metallar ushın E_i energiyanıń úlken mániske iye bolatuǵınlıǵın hám bir neshe onlaǵan mıń graduslardaǵı atomlardıń jıllılıq qozǵalıslarınıń ortasha energiyanıń sáykes keletuǵınlıǵı úlken áhmiyetke iye.

Kvantlıq mexanikanıń joqarıda keltirilgen juwmaqları elektr ótkizgishlik qubılısın tiykarınan túsindiriwge múmkinshilik beredi. Sırtqı elektr maydanı bolmaǵan jaǵdayda elektronlar tezliklerdiń baǵıtı boyınsha simmetriyalı jaylasadı, bul klassikalıq teoriyadaǵı sıyaqlı olardıń tártipsiz qozǵalıslarına, soǵan sáykes kristallardaǵı baǵıtlanǵan elektr toǵınıń bolmaytuǵınlıǵına alıp keledi.

Júdá joqarı bolmaǵan temperatura bar jaǵdaydı qaraymız. Bunday jaǵdayda qáddilerdiń barlıǵı elektronlar menen tolmaǵan. Bunday jaǵdayda hátte ázzi sırtqı maydanı elektronlardı biygirek qáddilerge alıp óte aladı. Sebebi qáddiler bir birine júdá jaqın jaylasqan. Baska sóz benen aytqanda, sırtqı maydannıń tásirinde elektronlardıń energiyanıń ózgeriwı múmkin, yaǵnıy elektronlar qosımsha tezlikke iye bola aladı. Sırtqı maydannıń tásirinde elektronlardıń olarǵa tásir etetuǵın kúshlerdiń tásirinde orın almasıwı júzege keledi. Nátiyjede kristal arqalı toq óte baslaydı. Bul jaǵday joqarı elektr ótkizgishlikke iye bolǵan metall kristallarǵa tiyisli. Elektr ótkizgishlik σ nıń shekli mánisin túsindiriw ushın kvantlıq mexanikaǵa sáykes erkin elektronlardıń qozǵalıslarınıń tolqınlıq xarakterge iye ekenligin esapqa alıw kerek (III tomǵa qarańız). Elektronlıq tolqınlar kristallıq pánjerede barlıq waqıtta bar bolatuǵın bir tekli emes orınlarda shashıraydı. Tolqınlardıń shashırawı bolsa kristaldaǵı elektronlardıń erkin júriw jolınıń shekli uzınlıǵına sáykes keledi. Ideal pánjere bolǵan jaǵdayda tolqınlardı shashıratuǵın bir tekli bolmaǵan orınlar tek pánjereniń jıllılıq qozǵalısları (terbelisleri) menen ǵana baylanıslı. Bul jaǵday σ nıń $1/T$ shamasına proporcionalıǵına alıp keledi (T arqalı kristaldıń absolyut temperaturası belgilengen). Bizlerdiń kórsetkenimizdey (154-paragraf), σ nıń T dan usınday ǵárezligin haqıyqatında da baqlanadı hám onı klassikalıq kóz-qarastan túsindiriwdiń múmkinshiligi joq. Kristallıq pánjerede aralasparlar bar

¹⁹ Bul nızamdı "Fermi-Dirak bólistiriliwı" dep ataydı (Awdarıwshılar).

bolğan jaǵdayda temperaturadan ǵárezsiz bolğan bir tekli emes orınlar orın aladı, sonlıqtan σ menen temperaturanıń arasındaǵı baylanıs $\sigma = a \frac{1}{T} + b$ túrine enedi. Bul teńlikte a menen b lar arqalı konstantalar belgilengen. Eger qanday da bir metalǵa basqa metaldı az muǵdarda aralastırǵanda σ nıń T dan ǵárezligi tómengi temperaturalarda haqıyqatında da baqlanadı.

Metallardıń qarsılıǵı jıllılıq qozǵalıslarınıń saldarınan payda bolğan pánjeredegi bir tekli bolmaǵan orınlardaǵı elektronlıq tolqınların shashıravınıń nátiyjesinde payda boladı degen ideyanı birinshi ret sovet fizigi YA. I. Frenkel tárepinen onıń metallardıń teoriyası boyınsha islegen jumıslarında usındı.

Kvantlıq teoriya klassikalıq teoriyanıń ekinshi qıyınshılıǵın da saplastırdı, atap aytqanda erkin elektronlardıń metallardıń jıllılıq sıyımlılıǵına tásiriniń joq ekenliginiń sebebin de túsındirdi (162-paragraf). Temperatura joqarılaǵanda elektronlardıń bir bólimi energiyanı joqarıraq qáddilerine ótedi. Biraq, úsh erkinlik dárejesine sáykes keletuǵın jıllılıq energiyasınıń ortasha mánisi bolğan $\bar{E} = \frac{3}{2}kT$ shaması E_i ge salıstırǵanda kishi bolsa, onda Fermi formulasına sáykes elektronlardıń qáddiler boyınsha tarqalıwı $T = 0$ bolğan jaǵdayda tarqalıwday bolmaydı (102-súwrettegi 3 hám 2 iymeklikleri bir birinen úlken ayırmaǵa iye emes). Bunnan, elektronlardıń ulıwmalıq energiyasınıń temperaturadan ǵárezliginiń ázzi ekenligi (júdá úlken bolmaǵan temperaturalarda) hám bunnan óz gezeginde metaldaǵı erkin elektronlardıń bolıwınıń onıń jıllılıq sıyımlılıǵına is júzinde tásir etpeytuǵınlıǵı kelip shıǵadı.

Erkin elektronlardıń is júzinde metallardıń jıllılıq sıyımlılıǵına tásir etpeytuǵınlıǵın dálirek kórsetiw ushın elektronlardıń tezlikler boyınsha tarqalıwınıń sanlıq nızamın paydalanıw kerek.

102-súwrette elektronlardıń qáddiler boyınsha tarqalıwınıń grafigi keltirilgen. Eger biz tolıq energiyası energiyanıń $E, E+dE$ intervalında bolğan elektronlardıń salıstırmalı sanı dn/n haqqında maseleni qoyatuǵın bolsaq, onda biz basqa túrge iye bolğan grafikti alamız. Qáddiler energiyanıń hár qıylı mánislerinde birdey bolmaǵan tıǵızlıq penen jaylasatuǵın bolǵanlıqtan, yaǵnıy dE intervalınıń energiyanıń qanday oblastında jaylasqanlıǵına baylanıslı, birdey bolğan dE intervallarına qáddilerdiń hár qıylı sanları sáykes keledi. Fermi bólistiriliwı nızamı boyınsha:

$$\frac{dn}{n} = \gamma \frac{E^{1/2}}{1 + e^{\frac{E-E_i}{kT}}} dE. \quad (2)$$

Bul formulada γ arqalı konstanta belgilengen²⁰, E_i bolsa, joqarıda ayılıp ótilgenindey, $T = 0$ temperaturadaǵı elektronlardıń eń úlken energiyası bolıp tabıladı. Bunday jaǵdayda 102-súwrettegi 2 hám 3 grafikleriniń ornına 103-súwrette keltirilgen grafiklerdi alamız. Bul grafiklerde 2 iymekligi $T = 0$ bolğan, al 3 iymekligi $T \neq 0$ jaǵday ushın alınǵan.

Bazı bir T temperaturasındaǵı kristaldaǵı elektronlardıń ortasha energiyası

$$\bar{E} = \frac{1}{2} \int E dn$$

shamasına teń boladı. Bul integrallaw E niń múmkin bolğan mánisleriniń barlıǵı ushın alınadı. (2)-tarqalıwdı paydalanıp

$$\bar{E} = \gamma \int_0^\infty \frac{E^{3/2}}{1 + e^{\frac{E-E_i}{kT}}} dE.$$

añlatpasın alamız. Integrallaw tómendegidey juwıq nátiyjeni beredi:

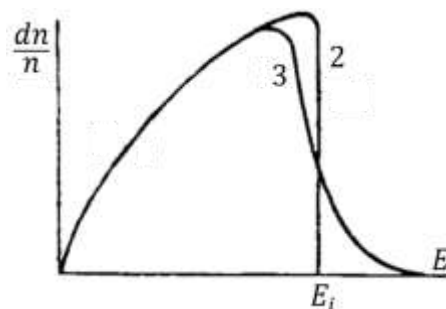
$$\bar{E} = \frac{3}{5} E_i \left[1 + \frac{5\pi^2}{12} \left(\frac{kT}{E_i} \right)^2 \right].$$

Turaqlı kólemdegi C_V mollik jıllılıq sıyımlıǵı energiyadan (bir molge sáykes keletuǵın) temperatura boyınsha alınǵan tuwındıǵa teń bolǵanlıqtan, onıń ushın

$$C_V = N \frac{d\bar{E}}{dT} = \frac{\pi^2}{2} Nk \left(\frac{kT}{E_i} \right) \quad (3)$$

²⁰ γ konstantasınıń mánisi kristaldıń kólemine ǵárezli.

túrindegi ańlatpaǵa iye bolamız. Bul ańlatpada N - Avogadro sanı bolıp tabıladı.



103-súwret.

Elektronlardıń energiyalar boyınsha tarqalıwı.

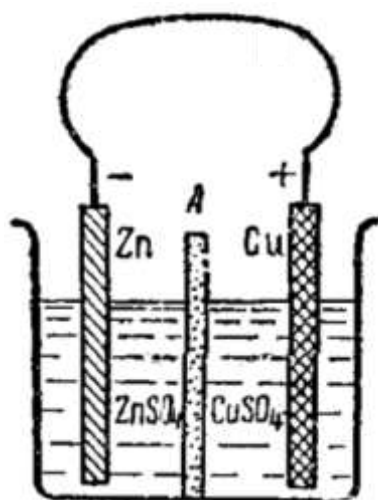
Klassikalıq teoriya boyınsha elektronlıq gazdıń mollik jıllılıq sıyımlıǵı $C_V = \frac{3}{2}Nk$ ańlatpasınıń járdeminde ańıqlanadı. Joqarıda aytııp ótilgenindey, metallar ushın E_i bólekshelerdiń onlaǵan mıń gradus temperaturalardaǵı jıllılıq qozǵalıslarınıń ortasha energiyasına sáykes keledi. Demek, E_i shaması orta temperaturalar ushın kT shamasınan júzlegen ese úlken. Al, $\left(\frac{kT}{E_i}\right) \sim 0,01$ hám elektronlıq gazdıń ortasha temperaturalardaǵı jıllılıq sıyımlıǵı ushın (3)-formula klassikalıq teoriya bergen shamaǵa salıstırǵanda júdá kishi bolǵan shamalı beredi.

§ 164. Turaqlı toqtır tuıyq shınjırı. Ótkizgishte turaqlı toqtır ótiwin boldırıw ushın onıń ushlarında turaqlı potencıalları ayırmasın payda etiw kerek. Usınday turaqlı potencıalları ayırmasınıń derekleriniń hár qıylı bolıwı múmkin. Bunday dereklerdiń mısalı bolıp *galvanikalıq elementler* xızmet ete aladı

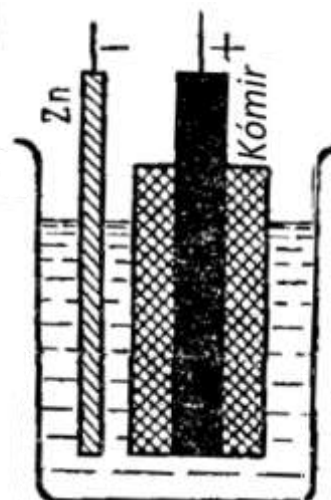
Galvanikalıq element belgili bolǵan eritpege (elektrolitlerge) túsirilgen kópshilik jaǵdaylarda eki metallı plastinkalardan turadı. Mısalı, Daniel elementi (104-súwret) cink kuporosınıń eritpesine túsirilgen cink plastinkasınan hám mıs kuporosınıń eritpesine túsirilgen mıs plastinkasınan turadı. Eritpeler bir birinen A mayda tesikli diywalı menen ajratılǵan. Bir biri menen tutastırılmaǵan plastinkaları bar Daniel elementinde 1,1 v shamasındaǵı potencıalları ayırması payda boladı. Elektrodlarında 1,5 v bolǵan potencıalları ayırmasın beretuǵın *Leklanche elementi* (105-súwret) nashatırdıń eritpesindegi cink plastinkasınan hám marganec perekisiniń qatlamı menen qorshalǵan kómir plastinkadan turadı.

Házirshe, qanday sebeplerge baylanıslı galvanikalıq elementlerdiń qısqa shılarında potencıalları ayırmasınıń payda bolıwın qarawǵa ótpesten burın, turaqlı potencıalları ayırmasınıń usınday deregi tuıyq shınjırǵa tutastırǵanda neniń baqlanatuǵınlıǵın qarayıq.

Elementti qısqa sha tutastıratuǵın shınjırdań qarsılıǵı R ge teń dep boljaymız hám onıń sırtqı qarsılıq dep ataymız (106-súwret). Óz gezeginde elementtiń ózi de R_0 qasılıǵına iye boladı hám onı *ishki* qarsılıq dep ataymız. Sırtqı qarsılıq ushlarında V_1 hám V_2 potencıallarına iye boladı. Bul potencıalları berilgen qarsılıqtıń sırtqı ótkizgishi tárepinen tutastırılǵan jaǵdaydaǵı elektrodlardıń potencıalları bolıp tabıladı. V_1 potencıalı V_2 potencıalınan úlken dep boljaymız; bunday jaǵdayda sırtqı shınjırdaǵı toq potencıalı V_1 bolǵan elektrodtań, potencıalı V_2 bolǵan elektrodqa karay júredi. Sırtqı shınjırda biz *potencialdıń túsiwine* iye bolamız.



104-súwret. Daniel elementi.

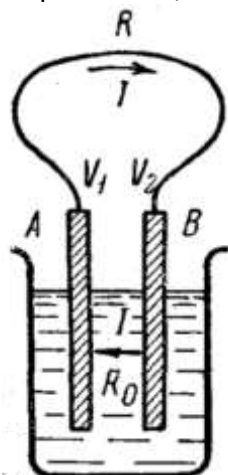


105-súwret. Leklanshe elementi.

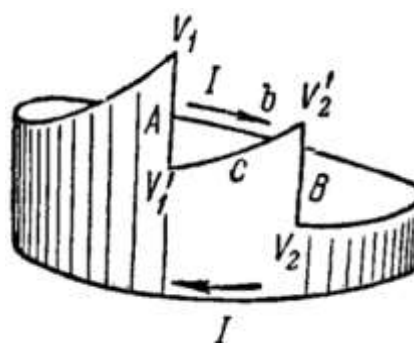
Sırtqı qarsılıq R tárepinen payda etilgen shınjırdıń uchashtasına Om nızamın qollanıp, sırtqı shınjırdaǵı potencialdıń túsiwiniń

$$V_1 - V_2 = IR \quad (1)$$

shamasına teń bolatuǵınlıǵı kóremiz. Zaryadlardıń aǵıwınan turatuǵın stacionar toqtıń tuyıq bolıwı kerek (156-paragrafqa qarańız), demek, shınjırdıń ishki bólimindegi toq sırtqı bólimindegi toqqa salıstırǵanda qarama-qarsı baǵıtta ótiwi kerek. Eger shınjırdıń sırtqı bóliminde toq A elektrodınan B elektrodına qaray aǵatuǵın bolsa, onda ishki bólimde toq B elektrodınan A elektrodına qaray aǵadı (106-súwret). Eger elektrod penen elektrolittiń shegarasında potencialdıń sekirmeli ózgerisi bolǵan jaǵdayda ǵana bunday jaǵdaydıń orın alıwı múmkin. Bunday sekiriwlerdiń payda ete alatuǵın sebeplerdi biz keyinirek qaraymız. Házir tek B elektrodı menen elektrolittiń arasındǵı shegarada potencialdıń V'_2 shamaǵa kóteriliwi (sekiriwi) payda boladı dep boljaymız. Barlıq shınjırdaǵı potenciallardıń túsiwi menen sekiriwlerin grafiktiń járdeminde kórsetiwdiń qolaylı bolıwı ushın payda bolǵan cilindrlik bet boylap potencial V nı qoyıp baramız. 107-súwrette A hám B noqatları elektrodlardıń turǵan ornına, AbB bólimi shınjırdıń sırtqı bólimine, al BcA bólimi shınjırdıń ishki bólimine sáykes keledi.



106-súwret. Galvanikalıq element penen sırtqı qarsılıqtıń shınjırı.



107-súwret. Galvanikalıq element penen sırtqı qarsılıqtan turatuǵın tuyıq shınjırdaǵı potencialdıń túsiwi menen sekiriwleri.

Elektrolittiń ishinde toq V'_2 potencialınan V'_1 potencialına qaray júredi. Om nızamı boyınsha shınjırdıń ishki bólimindegi potencialdıń túsiwi mınaǵan teń:

$$V'_2 - V'_1 = IR_0. \quad (2)$$

Bul teńliktegi R_0 - shıńjırdıń ishki bóliminiń qarsılıǵı. Oyımızda tuyıq shıńjırdı boylap, AbBcA baǵıtında júremiz hám potencialı V_1' bolǵan dáslepki A noqatına qaytıp kelemiz; konturdı aylanıp shıqqandaǵı potencıallardıń túsiwiniń summası olardıń kóteriliwleriniń summasına teń bolıwı kerek.

Potencıallardıń sekiriwlerin ε arqalı belgileymiz:

$$\begin{aligned} V_1 - V_1' &= \varepsilon_1, \\ V_2' - V_2 &= \varepsilon_2, \end{aligned}$$

Eger shıńjır boyınsha aylanıp júriwdiń barısında potencial úlkeyetugin bolsa, onda sekiriwdiń oń dep, al eger júriwdiń barısında potencialdıń mánisi kishireyetugin bolsa, onda sekiriwdi teris dep esaplaw shártin qoyamız. Konturdı aylanıp ótkende potencialdıń túsiwleriniń summasınıń kóteriliwlerdiń summasına teń bolıw shárti bilayınsha jazıladı:

$$IR + IR_0 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2. \quad (3)$$

SHıńjırdı aylanıp shıqqandaǵı potencıallardıń sekiriwleriniń summası bolǵan

$$\mathcal{E} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2,$$

shaması shıńjırǵa kirgizilgen *elektr qozǵawshı kúsh* dep ataladı. bul jaǵdayda sekiriwlerdiń summası elementtiń elektr qozǵawshı kúshin (e.q.k.) ańlatadı. E.q.kúshin kirgiziw arqalı biz (3)-ańlatpanı

$$IR + IR_0 = \mathcal{E} \quad (3a)$$

túrinde kóshirip jazamız. Bul teńlik *tuyıq shıńjır ushın Om nızamı* bolıp tabıladı. Onı bilayınsha kóshirip jazamız:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + R_0}. \quad (4)$$

Bunnan tuyıq shıńjırdaǵı toqtıń kúshi I diń e.q.k. $\mathcal{E}$ ge tuwrı proporcional hám shıńjırdıń tolıq qarsılıǵı $R + R_0$ ge keri proporcional ekenligi kelip shıǵadı.

$IR = V_1 - V_2$ teńliginiń orınlı ekenligin ańǵarıp, (Za) teńlikten

$$V_1 - V_2 = \mathcal{E} - IR_0, \quad (5)$$

ańlatpasın alamız, yaǵnıy *elementtiń qısqışlarındaǵı $V_1 - V_2$ potencıallar ayırması onıń e.q. kúshinen shıńjırdıń ishki bólimindegi potencialdıń túsiwın alıp taslaǵanǵa teń*. SHıńjırdıń ishki bólimindegi potencialdıń túsiwi qanshama úlken bolsa, onda elementtiń qısqışlarındaǵı potencıallar ayırması e.q.kúshiniń shamasınan sonshama kúshlirek ayırmaǵa iye boladı.

Ajratılǵan element ushın $I = 0$ hám, usıǵan sáykes, shıńjırdıń ishki bólimindegi potencialdıń túsiwi de nolge teń boladı; bunday jaǵdayda (5)-ańlatpadan $\mathcal{E} = V_1 - V_2$ teńligine iye bolamız, yaǵnıy e.q.kúsh $\mathcal{E}$ ajratılǵan elementtiń qısqışlarındaǵı potencıallar ayırmasına teń boladı.

Sırtqı qarsılıq penen tuyıqlanǵan elementtiń qısqışlarındaǵı potencıallar ayırmasınıń shaması barlıq waqıtta onıń e.q.kúshinen kishi boladı.

Eger element arqalı ótetugin I toǵı potencıallar ayırmasınıń qanday da bir sırtqı deregi tárepinen kompensaciyalanǵan bolsa, onda usı elementtiń qısqışlarındaǵı potencıallar ayırması onıń e.q.kúshi $\mathcal{E}$ ge teń boladı (167-paragraftaǵı e.q.kúshini kompensaciya usılınıń járdeminde anıqlawǵa qarańız).

156-paragrafta biz stacionar toq bolǵan jaǵdayda toqtıń sızıqlarınıń tuyıq ekenligin kórsettik. Bunnan qozǵalıwı toqtı payda etetugin zaryadlardıń tuyıq iymeklikler boyınsha qozǵalatuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Solay etip, galvanikalıq elementtiń shıńjırında shártli túrde oń belgige iye dep alınǵan zaryadlar tek potencıallardıń túsiw oblastında (yaǵnıy AbB shıńjırınıń sırtqı uchastkasında) hám shıńjırdıń BcA ishki oblastında ǵana emes, al potencıallardıń sekiriwi orın alatuǵın oblastlarda da qozǵaladı eken (107-súwret). Bul potencıallardıń sekiriwi orın alatuǵın uchastkalarda olar *potencialdıń úlkeyiw baǵıtında*, yaǵnıy elektrlik kúshlerdiń tásir etiw baǵıtına qarama-qarsı baǵıtta qozǵaladı. Álbette, bul qozǵalıw elektrostatalıq kúshlerdiń tásirinde júzege kelmeydi, al qanday da basqa sebeplerge baylanıslı payda bolǵan kúshlerdiń tásirinde júzege

keledi. Bul kúshlerdi *táreplik kúshler* dep ataydı²¹. Galvanikalıq elementte táreplik kúshler elektrodlardıń materialınıń elektrolitlerde eriwiniń nátiyjesinde júretuǵın ximiyalıq processlerdiń esabınan júredi.

Elektr qozǵawshı kúsh haqqındaǵı túsinikti táreplik kúshler shınjırdıń qálegen ornında bar bolatuǵın jaǵday ushın ulıwmalastıramız. Toqtıń tıǵızlıǵı ushın Om nızamı mınaday túrge iye:

$$\mathbf{i} = \sigma \mathbf{E}.$$

Bul ańlatpanı biz toqtı payda etetuǵın zaryadlarǵa elektr kúshleri tásir etedi degen boljawdıń tiykarında alǵan edik. Ulıwma jaǵdayda zaryadlarǵa elektrlik kúshler de, basqa da sebeplerge baylanıslı bolǵan kúshlerdiń de tásir etiwı múmkin (olardı bizler táreplik kúshler dep atadıq). Zaryadqa tásir etetuǵın táreplik kúshlerdi $\mathbf{f}_0$ arqalı belgileybiz.

Bunday jaǵdayda 161-paragraftaǵı (4)-ańlatpadaǵı zaryadtıń tezleniwı $\mathbf{w}$ nı bilayınsha jazıw kerek boladı:

$$\mathbf{w} = \frac{\mathbf{f} + \mathbf{f}_0}{m} = \frac{e\mathbf{E} + \mathbf{f}_0}{m} = \frac{e(\mathbf{E} + \mathbf{f}_0/e)}{m}.$$

$\mathbf{f}_0/e$ qatnasın $\mathbf{E}_0$ arqalı belgileybiz hám onı táreplik kúshlerdiń kernewligi dep ataymız. Bunday jaǵdayda zaryadtıń tezleniwı $\mathbf{w}$ elektr maydanınıń kernewligi $\mathbf{E}$ menen táreplik kúshlerdiń kernewligi $\mathbf{E}_0$ niń qosındısı boyınsha anıqlanadı

$$\mathbf{w} = \frac{e(\mathbf{E} + \mathbf{E}_0)}{m}.$$

Bunnan keyin 161-paragrafta keltirilgen tallawlardı qaytalap, biz Om nızamınıń ańlatpasına kelemiz hám ol endi

$$\mathbf{i} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{E}_0) \quad (6)$$

túrine iye boladı. Bul ańlatpada zaryadlardıń qozǵalıwındaǵı táreplik kúshlerdiń iyelegen ornı kórinip tur. Táreplik kúshler bolmaytuǵın orınlarda $\mathbf{E}_0 = 0$ hám sonlıqtan buringı formadaǵı Om nızamınıń alınatuǵınlıǵı óz-ózinen kórinip tur.

Toqtıń nayın (trubkasın), yaǵnıy toqtıń sıızqları menen sheklengen keńislikti qaraymız (biz qarap atırǵan ótkizgishtiń barlıǵı toqtıń nayı bolıwı múmkin). Naydıń kesimi ΔS boyınsha toqtıń kúshi turaqlı hám onı bilayınsha jazıwǵa boladı:

$$I = i_n \Delta S = \sigma(E_n + E_{0n}) \Delta S.$$

ΔS kesimi toqtıń sıızqlarına perpendikulyar dep boljaymız. Bunday jaǵdayda usı kesimge túsirilgen $\mathbf{n}$ normal baǵıtı boyınsha toqtıń sıızǵı I dıń baǵıtına sáykes keledi hám

$$I = \sigma(E_l + E_{0l}) \Delta S$$

ańlatpasına yamasa

$$E_l + E_{0l} = \frac{I}{\sigma \Delta S}$$

ańlatpasına iye bolamız. Bul teńliktiń eki bólimin de naydıń uzınlıǵınıń elementi Δl ge kóbeytip hám tuyıq naydıń barlıq elementleri boyınsha summalap

$$\sum (E_l + E_{0l}) \Delta l = \sum \frac{I}{\sigma \Delta S} \Delta l$$

teńligine iye bolamız. Naydıń qálegen kesimi boyınsha toqtıń kúshi I turaqlı bolǵanlıqtan, onı summa belgisiniń aldına shıǵarıwǵa boladı hám bunday jaǵdayda

$$\sum E_l \Delta l + \sum E_{0l} \Delta l = I \sum \frac{\Delta l}{\sigma \Delta S}$$

ańlatpasın alamız.

$\sum \frac{\Delta l}{\sigma \Delta S}$ shaması naydıń tolıq qarsılıǵına teń hám onı biz $R + R_0$ arqalı belgileybiz. Bunday jaǵdayda R_0 shamasın shınjırdıń táreplik kúshler tásir etetuǵın bóliminiń qarsılıǵı (ishki qarsılıq),

²¹ Rus tilindegi "storonnie sili" sózi tolıq túrde "úshinshi tárepten tásir etetuǵın kúshler" mánisin beredi. Biz tekstte "táreplik kúshler" terminin qabıl etemiz hám usı termindi paydalanǵanıımızda jáne bir tárepten (úshinshi tárepten) tásir etetuǵın kúshlerdi túsiniw kerek boladı (Awdarıwshılar).

al R shamasın táreplik kúshler tásir etpeytuǵın bólimniń qarsılıǵı (sırtqı qarsılıq) dep túsinemiz. Bunnan keyin tuyıq kontur ushın $\sum E_l \Delta l$ summasınıń nolge teń ekenligin kóremiz. Sebebi bul ańlatpa bir birlik zaryadtıń naydıń tuyıq konturı arqalı aylanıp ótiwiniń barısındaǵı elektrostatikalıq kúshlerdiń islegen jumısın beredi (elektrostatikalıq kúshlerdiń potenciallyǵı).

Tuyıq kontur ushın jazılǵan $\sum E_{ol} \Delta l$ ańlatpa *táreplik kúshlerdiń kernewliginiń cirkulyaciyası dep ataladı*. Bul shama tuyıq konturdiń barlıq elementleri boyınsha alınǵan táreplik kúshlerdiń kernewliginiń konturdiń elementleri bolǵan E_{ol} lerdiń baǵıtlarına túsirilgen proekciyalarınń usı elementlerdiń uzınlıqlarınıń kóbeymeleriniń summasına teń. Bul summanı $\mathcal{E}$ arqalı belgilep

$$\mathcal{E} = \sum E_{ol} \Delta l, \quad (7)$$

ańlatpasına iye bolamız. Bunday jaǵdayda (6)-teńlik mınaday túрге iye boladı:

$$\mathcal{E} = I(R + R_0).$$

Bunnan $\mathcal{E}$ niń konturda tásir etetuǵın e.q.kúshi ekenligin kóremiz. Solay etip, tuyıq shınjır ushın Om nızamın alamız hám bul nızamda *e.q.kúshi táreplik kúshlerdiń kernewliginiń vektorınıń cirkulyaciyası sıpatında kórsetiledi*.

Táreplik kúshler shınjırdaǵı qálegen orında tásir ete aladı. Táreplik kúshler shınjırdaıń ayırım orınlarında tek potencialdıń sekirmeli ózgeriwlerin payda etetuǵın jaǵdayda cirkulyaciyanıń toqtıń tuyıq konturı ushın potencialdıń sekirmeli ózgerisleriniń algebralıq qosındısıń ǵana beretuǵınlıǵın ańsat kóriwge boladı. Demek, joqarıda keltirilgen e.q.kúshine potencialdıń sekiriwleriniń summası sıpatında berilgen anıqlama (7)-qatnastıń dara jaǵdayı boladı. Galvanikalıq elementten yamasa elementleriń batareyasınan alınatuǵın turaqlı toq bolǵan jaǵdayda táreplik kúshler ximiyalıq processler júretuǵın oblastlarda tásir etedi (shınjırdaıń ishki bólimi).

(7)-ańlatpadaǵı konturdiń elementlerin sheksiz kishi dep esaplap, summanı barlıq tuyıq konturǵa tarqatılǵan integral menen almastıramız. Bunday jaǵdayda e.q.kúsh ushın jazılǵan ańlatpa

$$\mathcal{E} = \oint E_{ol} dl$$

túrine enedi. Oń tárepte turǵan integral táreplik kúshlerdiń kernewligi vektorınıń cirkulyaciyası bolıp tabıladı.

Mısal. Elementtiń ishki qarsılıǵı bolǵan R_0 shaması e.q.kúshi $\mathcal{E}$ bolǵan element tuyıqlanǵan sırtqı qarsılıq R den k ese kishi. Tabıw kerek: elementtiń qısqushlarındaǵı potenciallar ayırması $V_1 - V_2$ elementtiń e.q.kúshi $\mathcal{E}$ dan qansha shamaǵa ayırıladı?

Sheshimi. (4)-ańlatpadan toqtıń shaması I di (5)-ańlatpaǵa qoyıp, elementtiń qısqushlarındaǵı potenciallar ayırması $V_1 - V_2$ ni anıqlaymız. Bunday jaǵdayda

$$V_1 - V_2 = \mathcal{E} \frac{R}{R + R_0}$$

yamasa

$$V_1 - V_2 = \frac{\mathcal{E}}{1 + \frac{R_0}{R}}$$

ańlatpaların alamız. SHárt boyınsha $\frac{R_0}{R} = \frac{1}{k}$ qatnası orınlı bolǵanlıqtan, sońǵı formula mınaday túрге enedi:

$$V_1 - V_2 = \frac{\mathcal{E}}{1 + \frac{1}{k}} = \frac{k}{k + 1} \mathcal{E}.$$

Demek, elementtiń qısqushlarındaǵı $V_1 - V_2$ potenciallar ayırması e.q.kúshiniń shamasınan $\frac{\mathcal{E}}{1 + \frac{1}{k}}$ ese kishi.

Eger sırtqı qarsılıq R ishki qarsılıq R_0 ge salıstırǵanda úlken bolsa, onda $1 + \frac{1}{k}$ qatnası 1 ge salıstırǵanda kishi shamaǵa aylanadı hám potenciallar ayırması $V_1 - V_2$ e.q.kúshiniń shamasına jaqınlasadı.

Kerisinshe, eger R diń mánisi R_0 ge salıstırǵanda kishi bolsa, onda $\frac{1}{k}$ shaması úlken boladı hám

potenciallar ayırması $V_1 - V_2$ niń shaması $\mathcal{E}$ den ádewir kishi boladı.

§ 165. Turaqlı toq shıńjırında bólinip shıǵatuǵın energiya. Turaqlı toqtıń tuyıq shıńjırındaǵı energiyalıq qatnaslardı qaraymız. 106-súwrette e.q.kúshi $\mathcal{E}$ hám ishki qarsılıǵı R_0 bolǵan element penen azıqlanatuǵın turaqlı toqtıń shıńjırı kórsetilgen. SHıńjırdań sırtqı qarsılıǵın R arqalı belgileybiz. SHıńjırda bólinip shıǵatuǵın tolıq quwat shıńjırdań sırtqı hám ishki bólimlerindeǵı bólinip shıǵatuǵın quwatlar dań qosındısınan turadı. Onı

$$W = I^2 R + I^2 R_0 = I^2 (R + R_0)$$

túrinde yamasa 164-paragraftaǵı (3a) formuladaǵı $I(R + R_0) = \mathcal{E}$ ańlatpasın esapqa alıp

$$W = I \cdot \mathcal{E} \quad (1)$$

túrinde jaza alamız. Solay etip, *shıńjırda bólinip shıǵatuǵın tolıq quwat toqtıń kúshi menen elementtiń e.q.kúshiniń kóbeymesi túrinde ańlatıladı eken.* Bul quwat energiyanıń qanday da bir táreplik derekleriniń esabınan bólinip shıǵadı. Energiyanıń usınday deregi bolıp elementte júretuǵın ximiyalıq reaksiyalar xızmet ete aladı.

Demek, *turaqlı toqtıń shıńjırında táreplik kúshler $+I\mathcal{E}$ shamasına teń oń quwattı rawajlandıradı.*

Endi shıńjırda bólinip shıǵatuǵın quwattıń element tuyıqlanǵan sırtqı qarsılıq R den qanday ǵárezlikke iye ekenligin qaraymız. Berilgen $\mathcal{E}$ e.q.kúshine jáne R_0 ishki qarsılıǵına iye bolǵan element sırtqı R qarsılıǵı menen tuyıqlanǵan bolsın; R den minaday shamalardıń ǵárezligin anıqlaymız: shıńjırda bólinip shıǵatuǵın tolıq quwatlıq W , shıńjırdań sırtqı bóliminde bólinip shıǵatuǵın quwat W_0 hám san mánisi boyınsha shıńjırdań sırtqı bóliminde bólinip shıǵatuǵın quwattıń barlıq quwatqa qatnasına teń bolǵan paydalı tásir coefficient (p.t.k.) η .

SHıńjırdaǵı toqtıń kúshi I Om nızamı boyınsha

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + R_0}$$

formulasınıń járdeminde anıqlanadı. Eń úlken mániske ol $R = 0$ bolǵan jaǵdayda erisedi. Bunday jaǵdaydaǵı toqtı *qısqa tuyıqlanıw toǵı* dep ataydı. Onıń kúshi mınaǵan teń:

$$I_{q.t} = \frac{\mathcal{E}}{R_0}.$$

Sırtqı qarsılıqtıń mánisi úlkeygende toq kúshiniń shaması kishireyedi hám sırtqı qarsılıqtıń mánisin sheksiz úlkeygende nolge asimptotalıq túrde jaqınlasadı (108-súwretke qarańız).

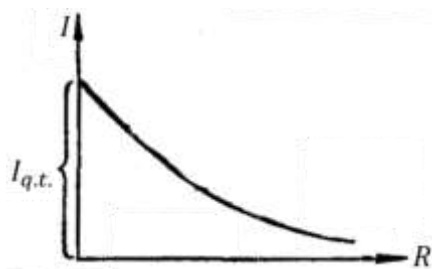
SHıńjırda bólinip shıǵatuǵın tolıq quwat mınaǵan teń:

$$W = I\mathcal{E} = \frac{\mathcal{E}^2}{R + R_0}.$$

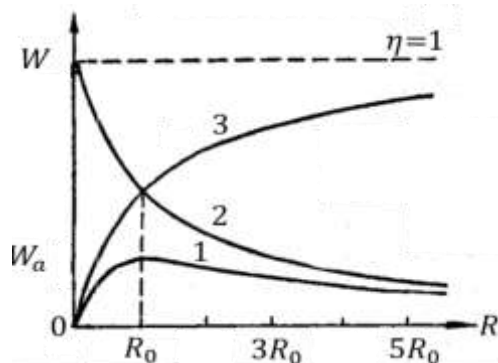
Qısqaşa tuyıqlanıw toǵı payda bolǵan jaǵdayda ($R = 0$) ol eń úlken mániske iye boladı.

$$W_{max} = \frac{\mathcal{E}^2}{R_0}.$$

R diń úlkeyiwi menen quwattıń mánisi kishireyedi hám R diń mánisi sheksiz úlkeygende asimptotalıq ráwishte nolge umtıladı.



108-súwret. Toq kúshiniń sırtqı qarsılıqtan ġárezligi.



109-súwret. SHınjırdıń sırtqı bóleginde bólinip shıqqan quwat W_a nıń (1), tolıq quwat W nıń (2), paydalı tásir koefficienti η nıń (3) shınjırdıń sırtqı bóliminiń qarsılıǵı R den ġárezligi.

SHınjırdıń sırtqı bóliminde bólinip shıǵatuǵın quwattıń mánisi mınaǵan teń:

$$W_a = I^2 R = \frac{\mathcal{E}^2}{(R + R_0)^2} \cdot R.$$

Qısqa tuyıqlanıw toǵı bar bolǵan jaǵdayda $R = 0$. Bunday jaǵdayda shınjırdıń ishki bóliminde bólinip shıǵatuǵın quwat nolge teń. $R = R_0$ teńligi orınlanǵanda, yaǵnıy sırtqı qarsılıq ishki qarsılıqqa teń bolǵanda, W_a eń úlken mánisine jetedi. Bunday jaǵdayda

$$W_{a\max} = \frac{\mathcal{E}^2}{4R_0},$$

yaǵnıy, qısqa tuyıqlaǵandaǵı quwattıń tórtten birine teń.

$R = R_0$ teńligi orınlanǵanda quwat W_a nıń maksimum shamasınıń alınatuǵınlıǵına iseniw ushın W_a shamasınan sırtqı qarsılıq boyınsha tuwındı alamız:

$$\frac{dW_a}{dR} = \frac{\mathcal{E}^2}{(R + R_0)^4} [(R + R_0)^2 - 2(R + R_0) \cdot R].$$

Nátiyjede

$$\frac{dW_a}{dR} = \frac{\mathcal{E}^2}{(R + R_0)^4} \cdot (R_0^2 - R^2)$$

arılatpasına iye bolamız. Maksimumnıń shártı boyınsha birinshi tuwındınıń nolge teń bolıwı kerek:

$$\frac{dW_a}{dR} = 0.$$

Bunnan $R = R_0$ teńligine iye bolamız.

Bunday shárt orınlanǵanda W_a shamasınıń minimumın emes, al maksimumın alatuǵınımızdı ekinshi tuwındı $\frac{d^2W}{dR^2}$ nıń belgisin anıqlaw jolı menen anıqlaw jolı menen isenemiz.

Sırtqı qarsılıqtıń shaması sheksiz úlkeygende shınjırdıń sırtqı bóliminde bólinip shıǵatuǵın quwat nolge umtıladı.

Paydalı tásir koefficientin shınjırdıń sırtqı bóliminde bólinip shıǵatuǵın W_a quwattıń barlıq quwat W ǵa qatnası túrinde anıqlanadı:

$$\eta = \frac{W_a}{W} = \frac{R}{R + R_0}.$$

$R = 0$ teńligi orınlanǵanda $\eta = 0$ teńligine iye bolamız, R diń úlkeyiwi menen p.t.k. η úlkeyedi hám R qarsılıǵınıń sheksiz úlkeyiwi menen $\eta = 1$ ge umtıladı. Biraq, bunday jaǵdayda sırtqı shınjırdı bólinip shıǵatuǵın quwat nolge umtıladı. Sonlıqtan p.t.koefficientiniń maksimumı shárti ámeliy jaqtan qızıq emes.

109-súwrettegi 1 iymekligi shınjırdıń sırtqı bóliminde bólinip shıqqan W_a quwatınıń shınjırdıń

sırtqı bóliminiń qarsılıǵı R den ǵáreziligin, 2 iymekligi tolıq quwattıń R den ǵárezligin hám, aqırında, 3 iymeklik paydalı tásir koefficienti η nıń sol sırtqı karsılıq R den ǵárezligi kórsetilgen. Kórinip turǵanınday, R diń úlkeyiwi menen η shaması da úlkeyedi.

Ámeliy kóz-qarastan mına jaǵday eń qızıqlısı bolıp tabıladı: shınjırdıń sırtqı bóliminde bólinip shıǵatuǵın W_a quwatı dáslep ósedi, al bunnan keyin $R = R_0$ teńligi orınlanǵanda maksimumǵa jetedi hám bunnan keyin kishireye baslaydı.

$R = R_0$ teńligi orınlanǵanda W_a maksimum mánisine jetedi hám bunday jaǵdayda p.t.k. ushın $\eta = \frac{1}{2}$ shaması alınadı.

§ 166. Bir tekli bolmaǵan shınjır ushın Om nızamı. Kirxgof nızamı. 153-paragrafta keltirilgen Om nızamı bir tekli bolǵan shınjır ushın, yaǵnıy hesh qanday e.q.kúshleri yamasa potencialdıń sekiriwleri joq shınjırda orınlanadı. Biraq, biz tek e.q.kúshler bar bolǵan jaǵdaylarda ǵana shınjırdaǵı turaqlı toqtıń payda bolıwınıń múmkin ekenligin atap óttik; galvanikalıq elementlerde e.q.kúshi elektrodlar menen olar batırılǵan eritpelerdiń arasındaqı shegaradaǵı potenciallardıń sekirmeli ózgerisleriniń saldarınan payda boladı (164-paragraf). Biz keyinirek (168-paragraf) potenciallardıń sekiriwleriniń hár qıylı bolǵan eki metaldıń kontaktında hám temperatura bir tekli bolmaǵan jaǵdayda payda bolatuǵınlıǵın kóremiz. Solay etip, ulıwma jaǵdayda potenciallardıń $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \dots$ sekiriwleri bar bolǵan shınjırda qaraw kerek boladı. SHınjırda aylanıp ótiwdiń berilgen baǵıtında sekiriwlerdiń hár qıylı belgilerge iye bolıwı múmkin. SHınjırda berilgen uchastkasındaǵı potenciallardıń sekiriwleriniń algebralıq qosındısı $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \dots$ usı uchastkada tásir etetuǵın e.q.kúshi bolǵan $\mathcal{E}$ ni payda etedi²².

Ápiwayılıq ushın hár bir biri menen izbe-iz jalǵanǵan qıylı bolǵan A, B, C ótkizgishlerinen turatuǵın bir tekli bolmaǵan shınjırda qaraymız (110-súwret).

Ótkizgishlerdiń arasındaqı kontaktlardı 1 hám 2 cifraları menen belgileybiz. Oń táreptegi ushtaǵı potencialdı V_1 , al shep táreptegi ushtaǵı potencialdı V_2 arqalı belgileybiz. A ótkizgishitiń birinshi kontakttaǵı potencialın $V_A^{(1)}$ arqalı, al B ótkizgishiniń tap sol kontakttaǵı potencialın $V_B^{(1)}$ arqalı belgileybiz; tap sol sıyaqlı ekinshi kontaktlar bar bolǵan orınlardaǵı B hám C ótkizgishleriniń potencialların sıykes $V_B^{(2)}$ hám $V_C^{(2)}$ arqalı belgileybiz. A, B hám C ótkizgishleriniń qarsılıqları sıykes R_A, R_B hám R_C shamalarına teń. Ótkizgishler izbe-iz tutastırılǵan bolǵanlıqtan olar arqalı birdey I toǵı ótedi. Ótkizgishlerdiń hár qaysısınıń óz aldına biz Om nızamın qollana alamız:

$$\begin{aligned} IR_A &= V_1 - V_A^{(1)}, \\ IR_B &= V_B^{(1)} - V_B^{(2)}, \\ IR_C &= V_C^{(2)} - V_2. \end{aligned}$$

Bul úsh teńlikti aǵzama-aǵza qosıp

$$I(R_A + R_B + R_C) = V_1 + (V_B^{(1)} - V_A^{(1)}) + (V_C^{(2)} - V_B^{(2)}) - V_2. \quad (1)$$

teńligin alamız. Biraq, $V_B^{(1)} - V_A^{(1)}$ hám $V_C^{(2)} - V_B^{(2)}$ ayırmaları 1 hám 2 ótkizgishleriniń arasındaqı potenciallardıń sekiriwi ε_1 hám ε_2 bolıp tabıladı. ε_1 hám ε_2 potenciallardıń sekiriwleriniń summası shınjırda berilgen uchastkasındaǵı $\mathcal{E}$ e.q.kúshin beredi, demek:

$$(V_B^{(1)} - V_A^{(1)}) + (V_C^{(2)} - V_B^{(2)}) = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = \mathcal{E}.$$

Sonıń menen birge R_A, R_B hám R_C qarsılıqlarınıń qosındısı shınjırda tolıq qarsılıǵı R di beredi:

$$R_A + R_B + R_C = R.$$

Bunnan (1)-teńlikti

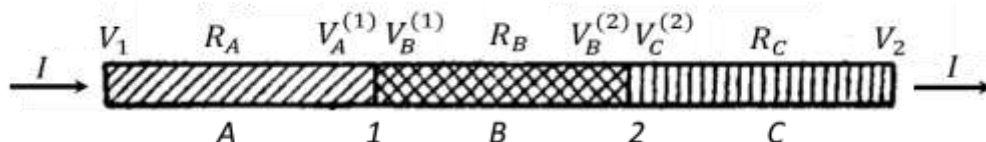
$$IR = V_1 - V_2 + \mathcal{E}$$

²² Bir tekli bolmaǵan shınjırda tek potencialdıń sekiriwleri ǵana emes, al ulıwma aytqanda potencialdıń úziksiz ózgerisiniń orın alıwı da múmkin (mısalı ionlardıń koncentraciyaları bir orınnan ekinshi orıńǵa ótkende ózgeretuǵın elektrolitte).

túrinde yamasa

$$I = \frac{V_1 - V_2 + \mathcal{E}}{R} \quad (2)$$

túrinde jazıwǵa boladı. (2)-qatnas bir tekli bolmaǵan shınjır ushın qollanılatuǵın Om nızamın ańǵartadı: toqtırn kúshi shınjırdaǵı ushlarındaǵı potencıalları ayırması $V_1 - V_2$ menen shınjırdaǵı e.q.kúshi $\mathcal{E}$ niń qosındısınıń shınjırdaǵı tolıq qarsılıǵı R ge qatnasına teń. Bunday jaǵdayda potencıaldı toqtırn baǵıtında úlkeytetuǵın e.q.kúsh oń dep esaplanadı.



110-súwret. Bir tekli emes shınjırdaǵı kontaktlar bar orınlardaǵı potencıallardıń sekiriwleri.

Eger shınjırdaǵı berilgen uchastkasında bar bolǵan e.q.kúshi nolge teń bolsa, yaǵnıy $\mathcal{E} = 0$ teńligi orınlanatuǵın bolsa, onda (2)-formula ádettegi Om nızamına ótedi:

$$I = \frac{V_1 - V_2}{R}.$$

Tuyıq shınjır ushın $V_1 = V_2$ hám tolıq qarsılıq shınjırdaǵı sırtqı bóliminiń qarsılıǵı R menen shınjırdaǵı ishki bóliminiń qarsılıǵı R_0 den quraladı. Bunnan

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + R_0}$$

ańlatpasına iye bolamız hám ol 164-paragraftaǵı (4)-formulaǵa sáykes keledi.

(2)-formulanıń járdeminde ańlatılatuǵın Om nızamı qálegen quramalı shınjırda esaplawǵa múmkinshilik beredi. Biraq tarmaqlarǵa bólingen shınjırlardı tikkeley esaplaw quramalı bolıp tabıladı. Eger Kirxgof tárepinen berilgen teńlemelerdiń eki sistemasın paydalansa, onda bul quramalı bolǵan jaǵday ádewir ápiwayılasadı.

Tarmaqlanǵan shınjır onıń uchastkaları arqalı ótetuǵın toqlardıń kúshi, uchastkalardıń qarsılıqları hám usı uchastkalarǵa tutastırılǵan e.q.kúshleri menen táriyiplenedi. Bul shamalar bir biri menen baylanısqa hám olardıń birewleri boyınsha ekinshilerin tabıwǵa boladı. Mısalı, berilgen qarsılıqlar menen e.q.kúshleri boyınsha shınjırdaǵı uchastkalarınıń hár birindegi toqlardıń baǵıtları menen kúshlerin tabıwǵa boladı.

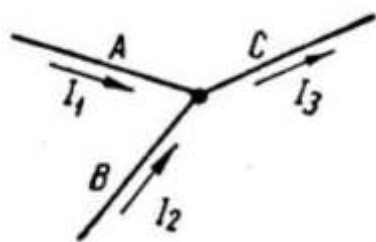
Kirxgof teńlemeleriniń hár qaysısın óz aldına qaraymız.

Kirxgoftırnı teńlemeleriniń birinshi sisteması. Tarmaqlanǵan shınjırdaǵı túyin dep keminde úsh ótkizgish tutasatuǵın noqattı ataymız (111-súwret). Birinshi sistema túyinlerge tiyisli. Bizler turaqlı toq bolǵan jaǵdayda qaraytuǵın bolǵanlıqtan, shınjırdaǵı qálegen noqatında, solardıń ishinde qálegen túyinde bar bolǵan zaryadtırn turaqlı bolıp qalıwı kerek. Demek, qansha zaryad alıp kelinse, tap sonshama zaryadtırn alıp ketiliwı kerek (156-paragrafqa qarańız). Eger biz túyinge keletuǵın toqlardı oń belgige iye dep esaplasaq, onda túyin arqalı ketetuǵın toqlardı teris belgige iye dep esaplaymız. Sonlıqtan, *túyinnen shıǵatuǵın toqlardıń qosındısı nolge teń bolıwı kerek* dep juwmaq shıǵaramız. Bul juwmaqta analitikalıq túrde bilayınsha jazamız:

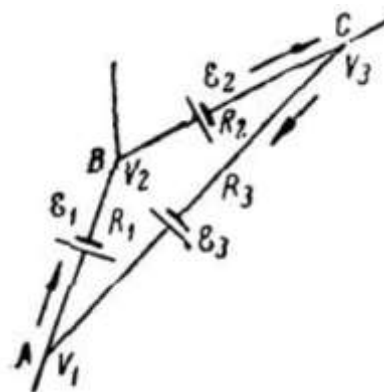
$$\sum_{k=1}^n I_k = 0. \quad (3)$$

Bul teńlikte n berilgen túyinde qosılatsuǵın toqlardıń sanın ańǵartadı; shınjırdaǵı hár bir túyini ushın usınday teńleme orınlı boladı.

Berilgen shınjırdaǵı hár qıylı túyinleri ushın jazılǵan (3)-teńlemelerdiń jıynaǵı Kirxgoftırnı teńlemeleriniń birinshi sistemasın payda etedi.



111-súwret. Úsh sımınıń járdeminde payda etilgen túyin.

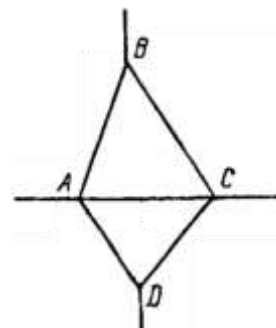


112-súwret. ABCA tuyıq konturı.

Kirxgoftıń teńlemeleriniń ekinshi sisteması berilgen tarmaqlanǵan sistemada ayırıp kórsetiw múmkin bolǵan iqtıyarlı tuyıq konturlarǵa tiyisli. Bir tekli bolmaǵan AB, BC hám CA uchastkalarınan turatuǵın ABCA iqtıyarlı tuyıq konturdı alamız (112-súwret). Konturdı belgili bolǵan baǵıtta boylap ótiwdi, misalı saat strelkasınıń baǵıtında ótiwdi oń dep esaplawdı, al saat strelkasınıń qozǵalıw baǵıtına qarama-qarsı baǵıtta boylap ótiwdi teris dep esaplaw shártin qabil etemiz. Aylanıp ótiw baǵıtında qozǵalganda ósetuǵın potencialdı oń, al aylanıp shıǵıw baǵıtında potencial tómeytuǵın bolsa, onda onı teris dep esaplaymız. Konturdıń bir tekli bolmaǵan hár bir AB, BC hám CA uchastkalarına (2)-formula túrinde berilgen Om nızamın qollanamız. AB, BC hám CA uchastkalarınıń qarsılıqların sáykes R_1, R_2, R_3 arqalı, olar arqalı ótetuǵın toqlardı I_1, I_2, I_3 arqalı hám olarda ushırasatuǵın e.q.kúshlerdi $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \mathcal{E}_3$ arqalı belgileyemiz. A, B, C noqatlardıń potencialların sáykes V_1, V_2 hám V_3 arqalı belgileyemiz.

113-súwret.

ABCA, ACDA hám ABCDA tuyıq konturları.



Bunday jaǵdayda, AB, BC hám CA uchastkalarınıń hár qaysısı ushın Om nızamı boyınsha

$$I_1 R_1 = V_1 - V_2 + \mathcal{E}_1,$$

$$I_2 R_2 = V_2 - V_3 + \mathcal{E}_2,$$

$$I_3 R_3 = V_3 - V_1 + \mathcal{E}_3$$

teńlemelerine iye bolamız. Bul úsh teńlikti aǵzama-aǵza qosıp,

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_3 R_3 = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3$$

ańlatpasınıń orınlı ekenligine kóz jetkeremiz. Kórinip turǵanıday, A, B, C noqatlarınıń potencialları bolǵan V_1, V_2 hám V_3 shamaları joǵaldı. Bunday tallawdı qálegen tuyıq kontur ushın qollanıwǵa bolatuǵın bolǵanlıqtan, ulıwma jaǵdayda tuyıq kontur ushın minaday teńlikti jazıwǵa boladı:

$$\sum_{k=1}^m I_k R_k = \sum_{k=1}^m \mathcal{E}_k. \quad (4)$$

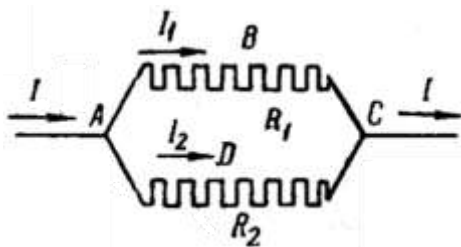
Bul teńlikte m tuyıq konturdaǵı uchastkalardıń sanın ańǵartadı, al k bolsa uchastkanı táriyipleytuǵın nomer bolıp tabıladı. Solay etip: *ótkizgishlerdiń tarmaqlanǵan shınjırında iqtıyarlı*

túrde alınğan qálegen tuyıq konturdaǵı shıńırdıń sáykes uchastkasındaǵı qarsılıqlardaǵı toqlardıń kúshlerine kóbeymesi usı konturda ushırasatuǵın e.q.kúshlerdiń qosındısına teń boladı. Berilgen tarmaqlanğan shıńırdıǵı ayırıp alınğan hár qıylı tuyıq konturlar ushın jazılğan (4)-teńlemelerdiń qosındısı Kirxgof teńlemeleriniń ekinshi sistemasın payda etedi. Túyinler menen konturlar ushın dúzilgen (3)- hám (4)-Kirxgof teńlemeleri tarmaqlanğan toqlardıń tarmaqların esaplawǵa múmkinshilik beredi. Anıqlanıwı kerek bolğan shamalardıń sanı neshe bolsa, sonshama dana (3)- hám (4)-teńlemelerdi dúziw kerek (teńlemelerdiń sanı belgisizlerdiń sanına teń bolıwı ushın). Bunday jaǵdayda bir teńlemeniniń ekinshi teńlemeniniń nátiyjesi bolmawına itibar beriw kerek. Eger tarmaqta r dana túyin bolsa, onda tek $r - 1$ túyin ushın bir birinen ǵárezsiz bolğan teńlemelerdi dúziw kerek. Eń sońǵı túyin ushın jazılğan teńleme onıń aldındaǵı túyinler ushın jazılğan teńlemelerdiń nátiyjesi boladı. Eger tarmaqta bir neshe dana tuyıq konturdı ayırıp alıwdıń múmkinshiligi bolsa, mısalı $ABCA$, $ACDA$ hám $ABCD$ tuyıq konturları bolsa (113-súwret), onda Kirxgoftıń ekinshi sistemasınıń teńlemeleriniń hár biriniń bir birinen ǵárezsiz túrde alınıwı shárt.

Mısalı, 113-súwrette keltirilgen quramalı shıńır ushın $ABCA$ hám $ACDA$ konturları ushın teńlemelerdi dúziwge boladı: olar bir birinen ǵárezsiz boladı. Al $ABCD$ konturı ushın alınğan teńleme onnan burın alınğan eki teńlemeniniń nátiyjesi bolıp tabıladı. Mısalı, baska $ABCA$ hám $ACDA$ konturları ushın bir birinen ǵárezsiz bolğan teńlemelerdi dúziwge boladı, bunday jaǵdayda $ACDA$ konturı ushın jazılğan teńleme dáslepki eki teńlemeniniń nátiyjesi bolıp tabıladı.

Kirxgoftıń teńlemeleriniń ekinshi sistemasın dúzgende toqlar hám e.q.kúshleriniń belgileri ushın joqarıda keltirilgen qaǵıydalardı muqıyatlı túrde paydalanıw kerek.

§ 167. Ayırım máselelerdi sheshiw ushın Kirxgof teńlemelerin paydalanıw. 1. Ótkizgishlerdi parallel tutastırıw. Dáslep Kirxgof teńlemeleriniń sistemasın bir biri menen parallel tutastırılğan eki ótkizgish haqqındaǵı ápiwayı másele ushın qollanamız. Meyli, qarsılıqları R_1 hám R_2 bolğan eki ótkizgish parallel tutastırılğan bolsın. Eki ótkizgish arqalı ótetuǵın toqtıń ulıwmalıq kúshi I ge teń hám 114-súwrette kórsetilgendey baǵıtqa iye. Berilgen R_1, R_2 hám I shamaları boyınsha ótkizgishtiń hár qaysısındaǵı I_1 hám I_2 toqların anıqlaw kerek.



114-súwret.

Eki B hám D ótkizgishlerin parallel tutastırıw.

Bul máseledegi belgisiz shamalar I_1 hám I_2 toqlarınıń mánisleri bolıp tabıladı. Demek, eki teńleme dúziwimiz kerek. Birinshi teńlemenini túyinlerdiń biri, mısalı A túyini ushın dúzemiz. I toǵın túyinge keletuǵın, al I_1 hám I_2 toqların túyinnen shıǵatuǵın dep esaplap, olarǵa teris belgilerin beremiz. Solay etip, A túyini ushın jazılğan Kirxgoftıń birinshi teńlemesi bılayınsha jazıladı:

$$I - I_1 - I_2 = 0.$$

Bunnan

$$I = I_1 + I_2 \quad (1)$$

teńlemesi kelip shıǵadı. Kirxgoftıń ekinshi teńlemesin tuyıq ABCDA konturı ushın jazamız. Bul konturdı saat strelkasınıń qozǵalıw baǵıtında aylanıp ótip, yaǵnıy A túyinińen B ótkizgishi arqalı C túyinine ótip hám bunnan keyin D ótkizgishi arqalı A túyinine qaytıp kelip, biz I_1 toǵı oń belgige iye, al I_2 toǵı teris belgige iye dep juwmaq shıǵaramız. Bul konturda e.q.kúshleri bolmaǵanlıqtan, Kirxgoftıń ekinshi teńlemesi bılayınsha jazıladı:

$$I_1 R_1 - I_2 R_2 = 0.$$

Bunnan

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1} I_2, \quad (2)$$

añlatpasına iye bolamız. (1)- hám (2)-teńlemelerdi I_1 hám I_2 toqları ushın birgelikte sheship

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I, I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I$$

shamaların anıqlaymız. Bul bizge izlenip atırğan sheshimdi beredi. (2)-teńlemeden

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1},$$

qatnasın da alamız. Bul parallel tutastırılğan eki ótkizgishtegi toqtırn kúshleriniń olardıń qarsılıqlarına kerı proporcional ekenligi haqqındaǵı belgili nızam bolıp tabıladı.

2. Uitston kópiri. Uitston kópiri belgisiz bolğan bazı bir R_x qarsılıǵın belgili bolğan R_0 qarsılıǵı menen salıstırıw ushın qollanılatuǵın sxema bolıp tabıladı. Uitston kópiriniń sxeması minalardan turadı: E galvanikalıq elementinen júretuǵın shınjır (115-súwret) A túyininen baslap tarmaqlanadı. Onıń bir bólimin bir biri menen izbe-iz tutastırılğan R_x hám R_0 qarsılıqları quraydı. Ekinshi bólimin ádette kerilgen bir tekli AC ótkizgishi payda etedi. R_x hám R_0 qarsılıqları bir biri menen tutasatuǵın B noqatına G ólsheuwshi ásbaptıń (galvanometrdiń) bir qısqışı bekitilgen; onıń ekinshi qısqışı sırganaytuǵın D kontaktına bekitilgen. Bul kontakt AC sımı boylap qozǵala aladı hám sonlıqtan ótkizgishtiń AD hám DC uchastkalarınıń R_1 hám R_2 qarsılıqlarınıń qatnasın ózgerter aladı. Biz tómende

$$\frac{R_x}{R_0} = \frac{R_1}{R_2} \quad (3)$$

qatnası orınlanǵanda shınjırdıń BGD uchastkasında toqtırn bolmaytuǵınlıǵın kórsetemiz. Bul qatnastı mına túrde qaytadan jazıwǵa boladı:

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_0. \quad (3a)$$

Bir tekli sim ushın onıń ayırım uchastkalarınıń qarsılıqları olardıń uzınlıqlarınıń qatnasınday. Solay etip, eger biz sımınıń AD uchastkasınıń uzınlıǵı l_1 arqalı, al DC uchastkasınıń uzınlıǵın l_2 arqalı belgilesek, onda

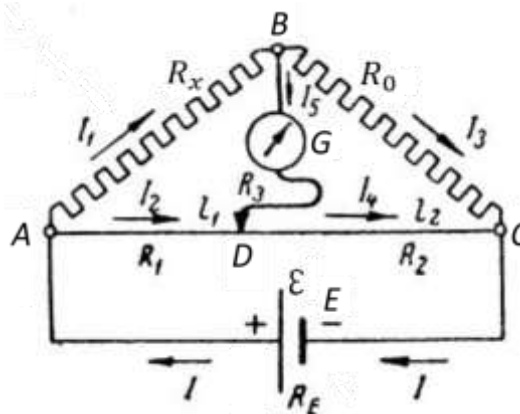
$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{l_1}{l_2}$$

qatnasına iye bolamız hám bunnan keyin (Za) teńligi

$$R_x = \frac{l_1}{l_2} R_0$$

túrine enedi. Bul qatnas ólsheNETUǵın R_x qarsılıǵın belgili bolğan R_0 qarsılıǵı menen salıstırıw ushın xızmet etedi. Onıń ushın qozǵalatuǵın D kontaktın G galvanometri arqalı ótetuǵın toqtırn joǵalıwına shekem jılistıradı. Toqtırn joq ekenligi galvanometrdiń strelkasınıń awısıwınıń bolmawı menen anıqlanadı. Uzınlıqlardıń qatnası bolğan l_1/l_2 shamasın esaplaw ushın kerek bolğan shamalardı AC sımı boylap qoyılğan esaplawshı sızǵıshtiń járdeminde anıqlaydı.

115-súwret.
Uitston kópiriniń sxeması.



(3)-qatnastı keltirip shıǵarıw ushın Kirxgof teńlemelerin paydalanamız. Dáslep bizge barlıq R_x, R_0, R_1 hám R_2 qarsılıqları, E galvanikalıq elementiniń ishki karsılıǵı R_E , onıń e.q.kúshi $\mathcal{E}$ hám shınjırdıń G galvanometri tutastırılǵan BGD uchastkasınıń qarsılıǵı R_3 belgili dep boljayıq. Elementten biziń sxemamızdıń A hám C túyinlerine toqtı ótkizetuǵın simlardıń qarsılıǵın esapqa almaymız. Elementten ótetuǵın toqtıń kúshin I arqalı, al shınjırdıń AB, AD, BC, DC hám BGD uchastkalarındaǵı toqlardı I_1, I_2, I_3, I_4 hám I_5 arqalı belgileybiz.

Biziń sistemamızdaǵı túyinlerdiń sanı tórtew: A, B, C, D. 166-paragrafta ayılǵanlarǵa muwapıq olardıń úshewi ushın Kirxgof teńlemelerin dúzemiz. Usı úsh túyinler sıpatında A, B hám D túyinlerin qabıl etemiz. Túyinge keletuǵın toqlardı biz on belgige, al olardan shıǵatuǵın toqlardı teris belgige iye dep esaplawdı qabıl etken edik. Biraq, quramalı sistemadaǵı toqlardıń qalay baǵıtlanǵanlıǵın bilmewimiz múmkin. Bunday jaǵdayda toqlarǵa ıqtıyarlı baǵıtlardı bere alamız. Kirxgof teńlemelerin sheshiwdiń nátiyjesinde biz on shamalar túrindegi bazı bir I_k shamaların alamız. Bul biz durıs baǵıt bergен toqlar bolıp tabıladı. I_k toqlarınıń basqa mánislerin biz teris shamalar túrinde alamız; bul toqlar ushın haqıyqıy baǵıtlar biz bergен baǵıtlarǵa qarama-qarsı. Biz qarap atırǵan jaǵdayda 115-súwrette strelkalar menen kórsetilgen baǵıtlardı jazamız. Onday jaǵdayda biz tómendegi túrdegi Kirxgof teńlemeleriniń birinshi sistemasın alamız:

$$\left. \begin{array}{l} \text{A túyini ushın } I - I_1 - I_2 = 0, \\ \text{B túyini ushın } I_1 - I_3 - I_5 = 0, \\ \text{D túyini ushın } I_5 + I_2 - I_4 = 0. \end{array} \right\} \quad (4)$$

Biziń sxemamızda ABDA, BCDB hám ACEA tuyıq konturların ayırıp alıwdıń nátiyjesinde Kirxgoftıń teńlemeleriniń ekinshi sistemasın dúzemiz. Usı konturlardıń hár qaysısın saat strelkasınıń júriw baǵıtında ótiw ushın mınaday teńlemelerdiń sáykes keletuǵınlıǵın kóremiz:

$$\left. \begin{array}{l} \text{ABDA konturı ushın: } I_1 R_x + I_5 R_3 - I_2 R_1 = 0, \\ \text{BCDB konturı ushın: } I_3 R_0 - I_4 R_2 - I_5 R_3 = 0, \\ \text{ACEA konturı ushın: } I_2 R_1 + I_4 R_2 + I R_E = \mathcal{E} \end{array} \right\} \quad (5)$$

Solay etip biz altı teńlemeni aldıq. Olar berilgen e.q.kúshi hám berilgen R_x, R_0, R_1, R_2, R_3 , hám R_E qarsılıqları boyınsha barlıq altı I, I_1, I_2, I_3, I_4 hám I_5 toǵın tabıwǵa múmkinshilik beredi. Biraq, biz (3)-qatnasqa alıp keletuǵın ápiwayıraq mäseleni sheshiw menen sheklenemiz. Atap aytqanda, G galvanometri arqalı ótetuǵın I_5 toǵınıń nolge teń bolıw shártin tabamız. $I_5 = 0$ teńligi orınlanǵan jaǵdayda sistemanıń ekinshi hám úshinshi teńlemeleri

$$I_1 = I_3, I_2 = I_4, \quad (6)$$

teńliklerin, al (5)-sistemanıń birinshi jáne ekinshi teńlemeleri

$$I_1 R_x = I_2 R_1, \quad I_3 R_0 = I_4 R_2. \quad (7)$$

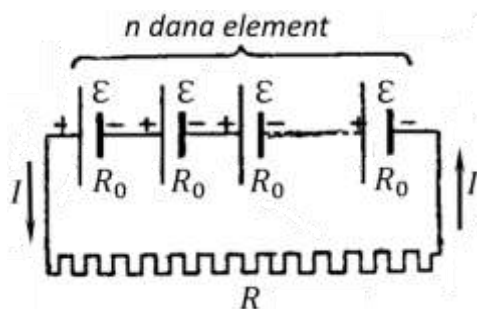
teńliklerin beredi. (6)- hám (7)-teńliklerden

$$\frac{R_x}{R_0} = \frac{R_1}{R_2}$$

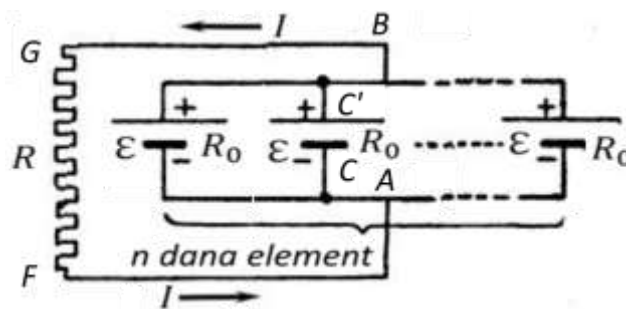
qatnasına iye bolamız. Usı qatnaslardıń orın alatuǵınlıǵın kórsetiw talap etilgen edi.

R_x hám R_0 qarsılıqların salıstırıwdır dállıgınıń joqarı bolıwı ushın $\frac{R_1}{R_2} = \frac{l_1}{l_2}$ qatnasınıń birden kúshli ayırmaǵa iye bolmawı kerek. Sonlıqtan Uitston kópiriniń járdeminde belgisiz bolǵan R_x qarsılıǵın anıqlaw ushın onıń shamasınıń R_0 standart qarsılıqtıń shamasınan úlken ayırmaǵa iye bolmawı kerek. Usınday maqsetler ushın Uitston kópiriniń VS tarmaǵın payda etetuǵın standart qarsılıq sıpatında ádette qarsılıqlar magazinın aladı (159-paragrafqa qarańız) hám magazinнен anaw yamasa minaw sandaǵı shtepsellerdi suwırıp alıw jolı menen R_0 diń shamasın R_x tiń shamasına jaqınlatıwǵa boladı.

3. Elementlerdi batareyaǵa tutastırıw. Dáslep eki jaǵdaydı qaraymız: elementlerdi batareyaǵa izbe-iz tutastırıw hám elementlerdi batareyaǵa parallel tutastırıw. Ápiwayılıq ushın barlıq turastırılatuǵın elementler birdey $\mathcal{E}$ e.q.kúshine hám birdey R_0 ishki qarsılıqlarǵa iye dep esaplaymız.



116-súwret. Elementlerdi batareyaǵa izbe-iz tutastırıw.



117-súwret. Elementlerdi batareyaǵa parallel tutastırıw.

Meyli batareyanı n dana izbe-iz tutastırılǵan element payda etsin (116-súwret); batareya sırtqı R qarsılıǵı menen tuyıqlanǵan. SHınjırdaǵı toqtıń shamasın anıqlaw talap etiledi. Elementlerdi bir biri menen tutaştıratuǵın simlardıń qarsılıqların esapqa almaymız.

Biziń shınjırımızdı payda etetuǵın barlıq tuyıq kontur ushın Kirxgoftıń ekinshi teńlemesin jazamız; bul jaǵdayda teńlemenıń bilayınsha jazılatuǵınlıǵı ayqın:

$$InR_0 + IR = n\mathcal{E}.$$

Bunnan

$$I = \frac{n\mathcal{E}}{R + nR_0} \quad (8)$$

ańlatpasın alamız. Eger bul ańlatpanı bir dana $\mathcal{E}$ e.q.qushi hám ishki qarsılıǵı R_0 bolǵan elementi bar shınjırdaǵı toqtıń kúshin beretuǵın

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + R_0}$$

teńligi menen salıstırsaq, onda birdey bolǵan n dana elementti batareyaǵa tutastırsaq, onda e.q.kúshiniń n ese hám ishki qarsılıqtıń da n ese úlkeyetuǵınlıǵın kóremiz. Bunnan sırtqı qarsılıq R diń shaması ishki qarsılıq R_0 diń shamasınan júdá úlken bolǵan jaǵdayda elementlerdi izbe-iz jalǵawdıń utımlı bolatuǵınlıǵı ayqın boladı. Haqıyqatında da, eger R diń mánisi júdá úlken bolsa, yaǵnıy $R \gg nR_0$ teńsizligi orınlanatuǵın bolsa, onda (8)-formulanıń bólimindegi nR_0 shamasın R ge salıstırǵanda esapqa almawǵa boladı. Bunday jaǵdayda juwıq túrde

$$I = n \frac{\mathcal{E}}{R}$$

formulasına iye bolamız. YAǵnıy, n dana elementti izbe-iz jalǵawdıń nátiyjesinde toqtıń shaması bir element bolǵan jaǵdayǵa salıstırǵanda derlik n ese úlken boladı eken. Eger sırtqı qarsılıq R ulıwmalıq ishki qarsılıq nR_0 den kishi bolsa, onda (8)-formuladaǵı usı nR_0 shamasınıń qasında sırtqı qarsılıq R shamasın esapqa almawǵa boladı. Bunday jaǵdayda juwıq túrde

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_0}$$

qatnasın alamız (yaǵnıy bir element bar bolǵan jaǵdaydaǵıday toqtı alamız).

Endi barateyaǵa parallel tutastırılǵan e.q.kúshleri $\mathcal{E}$ birdey bolǵan, hár qaysısınıń ishki qarsılıqları R_0 ge teń m dana elementti qaraymız (117-súwret). Meyli, batareya R qarsılıǵı menen tuyıqlanǵan bolsın. Tutastırıtıuǵın sımardıń qarsılıǵın esapqa almaymız. A túyinde shınjır birdey bolǵan m dana uchastkaǵa tarmaqlanatuǵın bolǵanlıqtan, Kirxgoftıń birinshi teńlemesi olardıń hár birindegi toqtıń shamasınıń shınjırdaǵı toqtıń shaması I den m ese kishi bolatuǵınlıǵın kórsetedi. Basqa sóz benen aytqanda, elementlerdiń hár qaysısı arqalı I/m toǵı ótedi. Bunnan keyin shınjırdaǵı tuyıq uchastkalarınıń biri ushın Kirxgoftıń ekinshi teńlemesin dúzemiz (mısalı $ACC'BDFGA$ konturı ushın). Bunday jaǵdayda

$$\frac{I}{m}R_0 + IR = \mathcal{E}$$

teńlemesine iye bolamız hám bunnan

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + \frac{R_0}{m}} \quad (9)$$

formulasın alamız. Bul (9)-formula *birdey bolǵan m elementti bir birine parallel etip batareyaǵa tutastırǵanda e.q.kúshtiń ózgermeytuǵınlıǵın, al ishki qarsılıqtıń m ese kisherietuǵınlıǵın kórsetedi.*

Sırtqı qarsılıqtıń shaması kishi bolǵanda elementlerdi batareyaǵa parallel tutastırıwdıń utımlı bolatuǵınlıǵın ańsat kóriwge boladı: haqıyqatında da, eger R diń mánisi esapqa almawǵa bolarlıqtay kishi bolsa, onda onı R_0/m shamasınıń qasında esapqa almawǵa boladı hám (9)-formula mınaday túrde jazıladı:

$$I = m \frac{\mathcal{E}}{R_0}.$$

Demek, toqtıń shaması bir element bolǵan jaǵdaydaǵıǵa salıstırǵanda m ese úlken boladı eken. Al, sırtqı qarsılıq úlken bolǵan, yaǵnıy $R \gg \frac{R_0}{m}$ teńsizligi orınlı bolǵan jaǵdayda (9)-formula elementlerdi batareyaǵa parallel jalǵawdıń toqtıń kúshiniń úlkeyiwine alıp kelmeytuǵınlıǵın kórsetedi.

Kirxgoftıń teńlemelerin paydalanıp, hár qaysısı parallel tutastırılǵan birdey m elementten turatuǵın n dana izbe-iz tutastırılǵan gruppalarǵı payda etkende I toq kúshiniń

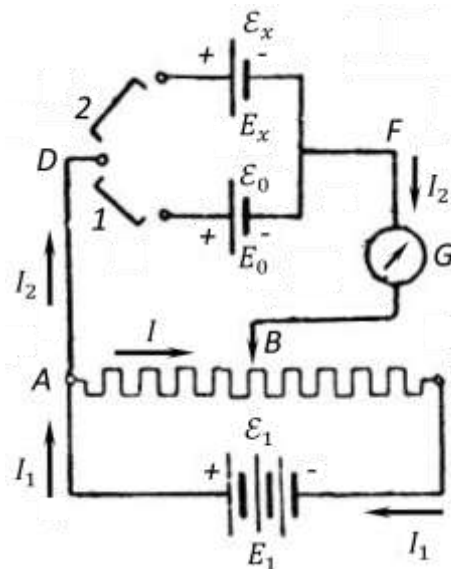
$$I = \frac{n\mathcal{E}}{R + \frac{n}{m}R_0}$$

shamasına teń bolatuǵınlıǵın kórsetiwge boladı.

4. Elementtiń elektr qozǵawshı kúshin anıqlawdıń kompensaciyalıq usılı. Elementtiń e.q.kúshin ádette e.q.kúshiniń shaması jaqsı belgili bolǵan "normal" element dep atalatuǵın elementtiń e.q.kúshi menen salıstırıp anıqlaw usılı jaqsı belgili. Bul salıstırıw 118-súwrette kórsetilgen kompensaciyalıq sxemanıń járdeminde ámelge asırıladı. E_0 normal elementiniń e.q.kúshi $\mathcal{E}_0$ bolsın. Ol e.q.kúshi $\mathcal{E}_0$ den úlken bolǵan $\mathcal{E}_1$ shamasına teń E_1 batareyası hám e.q.kúshi ólshenetuǵın E_x elementi AC sırtqı qarsılıǵı menen tuyıqlanatuǵın bolsın. E_0 normal elementi AC qarsılıǵına A gıltiniń járdeminde AC shınjırına onıń oń polyusı AC qarsılıǵınıń A noqatına sáykes keletuǵınday etip tutastırıladı. Al teris polyus B kontaktı menen tutastırılǵan hám ol AC qarsılıǵı boylap sırganap qozǵala aladı. G galvanometri E_0 normal elementi arqalı ótetuǵın toqtıń kúshin ólsheydi. Dáslep, ólshenetuǵın E_x elementin 2 gıltiniń járdeminde sxemadan ajratılǵan dep boljaymız.

118-súwret.

Elementtiń elektr qozǵawshı kúshin anıqlawdıń kompensaciyalıq usılınıń sxeması.



Meyli, shınjırdıń AB, BCE₁A hám ADE₀FB uchastkaları arqalı I , I_1 hám I_2 toqları ótetuǵın bolsın. Bunday jaǵdayda A túyinenen Kirxgoftıń birinshi teńlemesin paydalanıp

$$I_1 - I_2 = I$$

teńligin alamız. SHınjırdıń ADE₀FB uchastkasınıń qarsılıǵın R_0 arqalı, al AB uchastkasınıń qarsılıǵın R_1 arqalı belgileymiz. Bunday jaǵdayda, ADE₀FB shınjırı ushın Kirxgoftıń ekinshi teńlemesin dúzip

$$R_0 I_2 - R_1 I = -\mathcal{E}_0$$

teńligine iye bolamız yamasa $I = I_1 - I_2$ teńligi orınlı bolǵanlıqtan,

$$R_0 I_2 - R_1 (I_1 - I_2) = -\mathcal{E}_0 \quad (10)$$

teńlemesin jaza alamız. B kontaktın jılastırıw arqalı I_2 toǵınıń shamasın nolge alıp keliwge boladı. Bul jaǵday G galvanometriniń strelkasınıń burılmay qalıwına sáykes keledi. Bunday jaǵdayda (1)-qatnas minaday túrge enedi:

$$I_1 R_1 = \mathcal{E}_0. \quad (11)$$

Demek, AB uchastkasındaǵı potencialdıń túsiwi $I_1 R_1$ shamasınıń mánisi normal elementtiń e.q.kúshi $\mathcal{E}_0$ shamasına teń bolǵanda onıń e.q.kúshi kompensaciyalanǵan, yaǵnıy normal element arqalı ótip atırǵan toqtıń shaması nolge teń boladı. Bunday jaǵdayda ABCE₁A konturı ushın Kirxgoftıń ekinshi teńlemesin jazıp, I_1 toq kúshiniń $\mathcal{E}_1$ e.q.kúshiniń hám barlıq konturdıń qarsılıǵı R_3 boyınsha alınatuǵınlıǵın kóremiz:

$$I_1 = \frac{\mathcal{E}_1}{R_3}.$$

Normal element kompensaciyalanǵannan keyin, ona 1 gıltiniń járdeminde ajıratadı hám onıń ornına sxemaǵa 2 gıltiniń járdeminde ólshenetuǵın E_x elementin tutastıradı. Sırǵanap qozǵalatıǵın B kontaktınıń ornın ózgerte otırıp, G galvanometri arqalı ótetuǵın toqtıń shamasınıń jáne de nolge teń bolıwına erisedi. Bunday jaǵdayda B kontaktınıń turǵan ornı normal element tutastırılǵan jaǵdaydaǵıǵa salıstırǵanda basqasha boladı hám shınjırdıń AB uchastkasınıń qarsılıǵı bazı bir basqa mániske iye boladı. Biraq, (11)-shártke uqsas bolǵan shárttiń bul jaǵdayda da orınlanıwı kerek:

$$I_1 R_2 = \mathcal{E}_x. \quad (12)$$

Toqtıń kúshi I_1 jáne $\mathcal{E}_1/R_3$ shamasına teń boladı. Bunday jaǵdayda (11)- hám (12)-teńliklerden e.q.kúshleriniń qatnasın alamız:

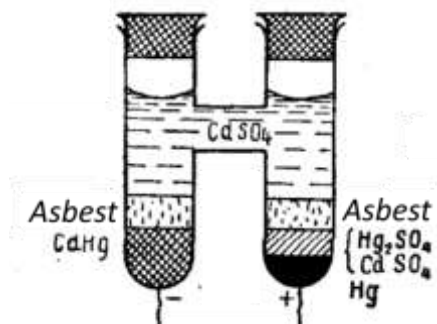
$$\frac{\mathcal{E}_x}{\mathcal{E}_0} = \frac{R_2}{R_1}$$

yamasa

$$\mathcal{E}_x = \frac{R_2}{R_1} \mathcal{E}_0.$$

Solay etip, normal elementtiń e.q.kúshi $\mathcal{E}_0$ di hám qarsılıqlardıń qatnası R_2/R_1 ni bilip, ólshenetuǵın $\mathcal{E}_x$ e.q.kúshin anıqlawǵa boladı eken.

Kórinip turǵanıday, usıl R_1 hám R_2 qarsılıqlarınıń mánislerin biliwdi talap etpeydi hám R_2/R_1 qatnasınıń mánisin biliw jetkilikli. Onı biz jılıytuǵın B kontaktınıń turǵan ornın boyınsha anıqlaymız.



119-súwret.
Normal element.

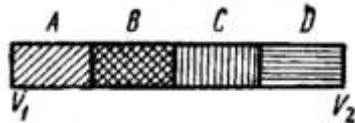
Normal element sıpatında ádette sinaplı-kadmiyli element paydalanıladı. Onıń e.q.kúshi waqıttıń ótiwi menen júdá az ózgeredi (elektrodlardıń polarizaciyası kishi; 179-paragrafqa qarańız). Bul element (119-súwret) sinap elektrodıtan (oń polyus) hám kadmiydiń amalgamasınan (teris polyus) turadı. Onıń arasında CdSO_4 kristalları bar kúkırtqıshqıl sinap (Hg_2SO_4) hám kúkırtqıshqıl kadmiydiń CdSO_4 eritpesi bar. 20°C temperaturadaǵı normal elementtiń elektr qozǵawshı kúshi $\mathcal{E}_{0,20} = 1,0183 \text{ B}$ shamasına teń hám ol júdá az shamaǵa ózgeredi. $t^\circ\text{C}$ temperaturadaǵı e.q.kúshi $\mathcal{E}_{0,t}$ bılayınsha anıqlanadı:

$$\mathcal{E}_{0,t} = \mathcal{E}_{0,20} - 4,075 \cdot 10^{-5}(t^\circ - 20^\circ) - 9,444 \cdot 10^{-7}(t^\circ - 20^\circ)^2 + 9,8 \cdot 10^{-9}(t^\circ - 20^\circ)^3.$$

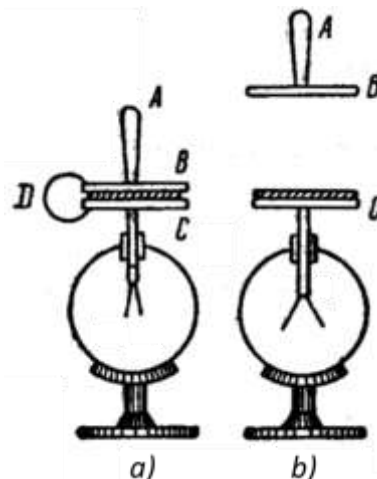
§ 168. Potenciallardıń kontaktlıq ayırması. E.q.kúshlerin payda etetuǵın sebeplerdi túsiniw ushın dáslep eki metaldıń shegarasındaǵı hám metall-vakuumnıń shegarasındaǵı sharayatlardı qaraymız. 1797-jılı Volta hár qıylı bolǵan eki metaldı bir birine tiydirgende olardıń arasında potenciallar ayırmasınıń payda bolatuǵınlıǵın ashtı. Volta ózinen keyingi metallardıń biri menen tiyiskende oń zaryadlanatuǵın metallardıń qatarın taptı. Bul qatar mınaday:

Al, Zn, Sn, Cd, Pb, Sb, Bi, Hg, Fe, Cu, Ag, Au, Pt, Pd.

Bunnan keyin Volta mınaday jaǵdaydıń orın alatuǵınlıǵın taptı: Eger hár qıylı bolǵan A, B, C, D metalların bir birine izbe-iz tutastırsa (120-súwret), onda ótkizgishlerdiń ushında payda bolatuǵın potenciallar ayırmasınıń shaması tek eń shetki A hám D ótkizgishlerdiń tábiyatınan ǵárezli, al olardıń ortasındaǵı B menen C ótkizgishleriniń tábiyatınan ǵárezsiz boladı eken. Hár qıylı metallardıń bir biri menen tutasıwınıń saldarınan payda bolatuǵın potenciallar ayırmasın *potenciallardıń kontaktlıq ayırması* dep ataydı. Metallardıń hár qıylı jupları ushın potenciallardıń kontaktlıq ayırması volttıń bir neshe onnan birinen voltke shekem jetedi hám ol metallardıń tazalıǵınan, ayırıqsha betleriniń tazalıǵınan kúshli ǵárezli.



120-súwret. Metallardıń izbe-iz qatarı.

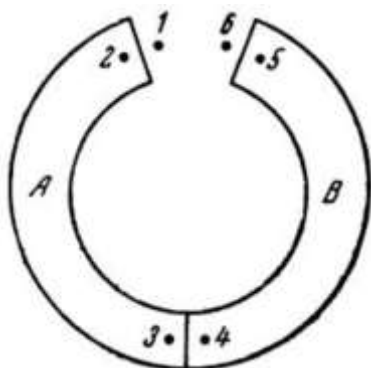


121-súwret. Kontaktlıq potenciallar ayırmasın tabıw.

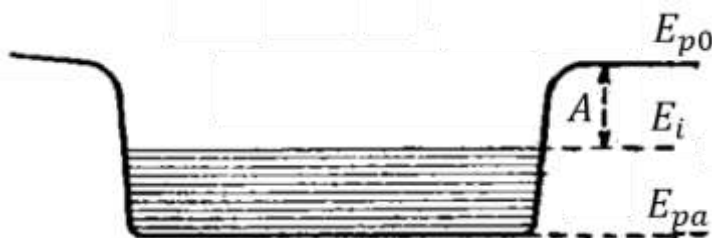
Kontaktlıq potenciallar ayırmasınıń bar ekenligin mınaday tájiriybeniń járdeminde anıqlawǵa boladı. Elektroskoptıń sterjenine sinap kóritetuǵın metaldıń C plastinkasın bekitedi (121 a súwret). Bul C plastinkası joqarǵı tárepten izolyaciyalawshı materialdıń juqa qabatı menen jabılǵan. C plastinkasınıń ústine ekinshi sinap kóritetuǵın metaldan islengen A izolyaciyalawshı tutqası bar B plastinkasın jabadı. Eki plastinkanı D simi menen tutastıradı. Bunday jaǵdayda, joqarıda ayılǵanlarǵa sáykes C hám B plastinkalarınń arasında usı metallardıń tábiyatlarına sáykes keletuǵın hám D siminiń qanday metaldan islengenliginen ǵárezsiz potenciallar ayırması payda boladı. Usınıń nátiyjesinde C hám B plastinkalarınan turatuǵın tegis kondensator zaryadlanadı. Joqarǵı B plastinkasın jerge alıp ketemiz hám D simin da alıp ketemiz. Tómengi C plastinkası sinap kóritetuǵın metallardıń arasındaǵı potenciallar ayırmasına teńdey potencialǵa iye bolatuǵınday bolıp zaryadlangan bolıp shıǵadı. Biraq ádettegi japıraqları bar elektroskoptıń sezgirliginiń jetkilikli bolmawı sebepli biz bunday zaryadtı taba almaymız. C hám B plastinkalarınń arasındaǵı potenciallar ayırmasınıń bar ekenligin tabıw ushın B plastinkasın A tutqasın uslap kóteremiz (121 b súwret). Bunday jaǵdayda plastinkalardıń arasındaǵı qashıqlıq úlkeyedi, al soǵan sáykes payda bolǵan kondensatordıń sıymıǵı kishireyedi (148-paragraf). Bunday jaǵdayda plastinkalardaǵı zaryadlar ózgerissiz saqlanatuǵın bolǵanlıqtan, sıymıǵı neshe ese kishireygen bolsa, onda plastinkalardıń arasındaǵı potenciallar ayırmasınıń shaması sonshama ese úlkeyedi. Plastinkalardı bir birinen jetkilikli dárejede qashıqlatqan jaǵdayda B plastinkasındaǵı potencial elektroskoptıń japıraqları ayrılǵanday dárejede úlkeyedi. Eger elektroskop voltlerde graduırovkalanǵan bolsa hám onıń sıymıǵı aldın-ala ólshengen bolsa (plastinka bolmaǵan jaǵdaydaǵı sıymıǵı jáne jer menen tutastırılǵan ekinshi plastinkanı alıp kelgendegi sıymıǵı), onda potenciallardıń izlenip atırǵan ayırmasın esaplawǵa boladı. Biraq, bul usıl jetkilikli dárejede dál emes hám biz tómende potenciallardıń kontaktlıq ayırmasın ólshewdiń basqa usılların táriyipleymiz.

Potenciallardıń kontaktlıq ayırmasınıń payda bolıwın tolıǵıraq qaraymız. Eki A hám B metallarınan turatuǵın tuyıq emes shınjırdı alamız (122-súwret) hám 1, 2, 3, 4, 5, 6 noqatları arqalı izbe-iz aylanıp ótkendegi potencialdıń ózgerisin baqlaymız. 1 hám 2 noqatlarınıń arasında potenciallar ayırması bar, sonlıqtan metaldaǵı elektronlar potencial shuqırda jaylasadı. 2 hám 3 noqatlarınıń potencialları birdey, sebebi olar bir metalǵa tiyisli. A metallı menen B metallınıń arasındaǵı kontaktta potenciallar ayırması payda boladı hám usınıń nátiyjesinde 3 noqatınan (A metallı) 4 noqatına ótkende (B metallı) potencialdıń ózgerisi orın aladı. 4 hám 5 noqatları birdey potenciallarǵa iye. 5 hám 6 noqatlarınıń arasında (B metall hám vakuum) jáne potencialdıń sekiriwi orın aladı. Sebebi B metaldaǵı elektronlar potenciallıq shuqırda jaylasqan. Solay etip, hár qıylı bolǵan eki shamanı qarawǵa boladı: eki metaldıń bir birine tiygen orındaǵı potenciallar

ayırması (onıń potentsiallardıń ishki kontaktlıq ayırması dep ataydı) hám vakuumdegi metallardıń ekewiniń betlerindegi 1 hám 6 noqatlarınıń aradaǵı potentsiallar ayırması. Bul sońǵı potentsiallar ayırmasın potentsiallardıń sırtqı kontaktlıq ayırması dep ataymız hám ádette usınday potentsiallar ayırması ólshenedi. Sonlıqtan, onı V_{AB} kontaktlıq potentsiallar ayırması jep jiyi ataydı. 1 hám 6 noqatlarınıń aradaǵı potentsiallar ayırmasınıń bar bolıwınıń sebebinen A hám B metallarınıń arasında elektr maydanı, al A hám B metallarınıń erkin betlerinde elektr zaryadları payda boladı.



122-súwret. Kontaktlıq potentsiallar ayırmasın túsindiriwge.



123-súwret. Kristallardaǵı energiyanıń qáddileriniń tolıq emes toltırılıwı.

163-paragrafta ayılıp ótilgenindey, metaldaǵı elektronlar potentsiallıq shuqırda jaylasadı, bul potentsiallıq shuqırdıń ishinde energiyanıń qáddileri boladı. Temperaturanıń absolyut nolinde tómengi $n/2$ dana qáddi elektronlar menen tolǵan (n arqalı elektronlardıń sanı belgilengen), qalǵanları bos. $T \neq 0$ temperaturalarda elektronlardıń bir bólimi joqarı qáddilerde jaylasadı. Biraq, júdá joqarı bolmaǵan temperaturalarda bunday elektronlardıń sanı salıstırmalı úlken emes hám, sonlıqtan, ápiwayılıq ushın tek $n/2$ tómengi qáddiler elektronlar menen tolǵan dep esaplaymız. Bul qáddiler 123-súwrette kórsetilgen. Bul súwrette E_{p0} - elektronlardıń metaldan sırttaǵı energiya, al E_i - toltırılǵan qáddilerdiń eń aqırǵısına sáykes keletuǵın energiya. $A = E_{p0} - E_i$ shaması elektronnıń metaldan vakuumge shıǵıw jumısın beredi. Shıǵıw jumısın eV kóbeymesiniń A shıǵıw jumısına teń bolatuǵınday etip, elektronnıń zaryadı e menen potentsiallar ayırması V nıń kóbeymesi túrinde saylap alınıwı kerek:

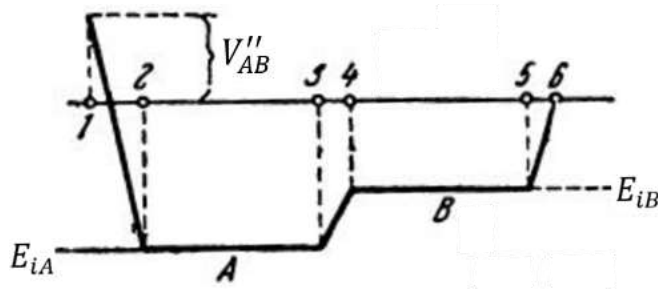
$$eV = A.$$

Elektronnıń zaryadı turaqlı shama bolǵanlıqtan shıǵıw jumısınıń mánisi potentsiallar ayırmasınıń mánisi $V = \frac{A}{e}$ boyınsha bir mánisli anıqlanadı. Biraq, shıǵıw jumısınıń mánisin potentsialdıń birliklerinde emes, al elektron-volt dep atalatuǵın jumıstıń ayrıqsha birliginde ólsheydi (qısqasha eV)²³. Jumıstıń bul birligi shaması elektronnıń zaryadına teń bolǵan zaryadtı potentsiallar ayırması 1 volt bolǵan noqatlardıń arasında jılistırǵanda islengen jumısqa teń. CGSE sistemasında $e = 4,803 \cdot 10^{-10}$ shamasına teń bolǵanlıqtan

$$1 \text{ eV} = \frac{4,803 \cdot 10^{-10}}{300} \text{ erg} = 1,601 \cdot 10^{-12} \text{ erg}$$

teńliklerine iye bolamız.

²³ Házirgi waqıtları Elektronvolt (elektron-volt, siyeklew elektronvolt dep jazadı) termini qabıl etilgen hám onı eV túrinde belgileydi (Awdarıwshılar).



124-súwret.
Bir birine tiyetuǵın eki metaldıń
potenciallıq shuqırı.

Metaldagı elektronnıń energiyası kóz-qarasınan eki metall bir birine tiygende elektronnıń energiyasınıń qanday ózgerislerge ushıraytuǵınlıǵın qaraymız. 124-súwrette bir birine tiyetuǵın eki metaldıń elektronlardıń energiyaları grafikalıq túrde súwretlengen. Bul súwrettegi 1, 2, 3, 4, 5, 6 noqatları 122-súwrettegi sol cıfралardıń járdeminde kórsetilgen noqatlarǵa sáykes keledi. E_{iA} shaması A metallındaǵı eń sońǵı toltırılǵan qáddilerdegi elektronnıń energiyasına, al E_{iB} B metallındaǵı toltırılǵan eń sońǵı qáddige sáykes keletuǵın energiya belgilengen. Eger bul energiyalar bir birine teń bolmasa, onda metallardıń kontaktında 3 noqatınan 4 noqatına ótiwge sáykes keletuǵın potenciallar ayırması payda boladı. Bul sekiriw potenciallardıń ishki kontaktlıq ayırması V''_{AB} bolıp tabıladı.

2 hám 1 noqatlarınıń arasındaǵı potenciallar ayırması metaldan (2 noqatı) vakuumǵa (1 noqatı) elektronlı ótkeriw ushın A_A jumısı islew menen baylanıslı. A_A jumısı A metallınan suwırıp alınǵan hám onıń betiniń qasındaǵı vakuumda jaylasqan elektron iye bolǵan $V_A = \frac{A_A}{e}$ potencialdı anıqlaydı (1 noqatı). Tap sol sıyaqlı, B metallınıń betiniń qasındaǵı 6 noqatındaǵı elektronnıń potencialı $V_B = \frac{A_B}{e}$ shamasına teń. Bul qatnasta A_B arqalı B metallınan vakuumge elektronnıń shıǵıw jumısı belgilengen. Solay etip, metallardıń arasındaǵı sańlaqta V'_{AB} shamasına teń potenciallar ayırması payda boladı (1 hám 6 noqatlarınıń arasındaǵı):

$$V'_{AB} = V_B - V_A = \frac{V_B - V_A}{e}. \quad (1)$$

V'_{AB} shaması bir birine tiyisip turǵan eki metaldıń arasındaǵı potenciallardıń sırtqı kontaktlıq ayırması bolıp tabıladı. Joqarıda aytılıp ótilgenindey, ol eki metaldan shıǵıw jumıslarınıń ayırmasınıń sebebinen payda bolǵan.

1 hám 2 noqatlarınıń arasındaǵı potenciallardıń kontaktlıq ayırmasınıń tolıq mánisi V_{AB} potenciallardıń sırtqı hám ishki kontaktlıq ayırmalarınan quraladı:

$$V_{AB} = V'_{AB} + V''_{AB}. \quad (2)$$

Potenciallardıń ishki kontaktlıq ayırması $V''_{AB} = E_{iB} - E_{iA}$ shamasına teń (124-súwretke qarańız). Potenciallardıń ishki kontaktlıq ayırmasınıń tolıq teoriyası tek kvantlıq mexanikanıń tiykarında beriliwi múmkin. Klassikalıq elektronlıq teoriyasınıń kóz-qaraslarınıń járdeminde potenciallardıń ishki kontaktlıq ayırmasın tek A hám B metallarındaǵı kólemniń bir birligindegi elektronlardıń sanı n_0 niń hár qıylı bolıwı menen túsindiriw múmkin. A metallındaǵı kólem birligindegi elektronlardıń sanın n_{0A} arqalı, al B metallındaǵına n_{0B} arqalı belgileyik. Eger $n_{0A} < n_{0B}$ teńsizligi orın aladı dep esaplasa, onda eki metaldıń bir biri menen tiyisip turǵan beti arqalı B metallınan A metallına ótker elektronlardıń sanına salıstırǵanda A metallınan B metallına kemirek elektron diffuzıyalanadı. Usınıń saldarınan A hám B metallarınıń arasında V''_{AB} potenciallar ayırması payda boladı. Sáykes teoriyalıq esaplawlar (mayda shrift penen jazılǵan tekstke qarańız)

$$V''_{AB} = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_{0A}}{n_{0B}} \quad (3)$$

teńliginiń orınlanatuǵınlıǵın kórsetedi. Bul teńlikte k arqalı Bolcman turaqlısı, e arqalı elektronnıń zaryadı, T arqalı metallardıń absolyut temperaturası belgilengen. Biraq, barlıq metallar ushın elektronlardıń sanları n_{0A} hám n_{0B} bir birinen az shamaǵa ayrıladı. Sonlıqtan V''_{AB} potenciallar

ayırması ádette V'_{AB} potencíalları ayırmasınan kishi hám is júzinde potencíallardıń kontaktlıq ayırması V_{AB} nıń shaması V'_{AB} tiń shamasına jaqın, yaǵnıy shıǵıw jumısları arqalı (1)-teńliktiń járdeminde ańǵartıladı.

Bir qatar izbe-iz tutastırılǵan metallardıń ushlarındaǵı potencíalları ayırması tek eń shetki metallardıń tábiyatınan ǵárezli, al aralıqlıq metallardıń tábiyatınan ǵárezli emes. Onıń ushın izbe-iz tutastırılǵan A, B, C metalların qaraymız. Usınday tuyıqlanbaǵan shınjırdıń ushlarındaǵı potencíalları ayırması ayırım juplardıń potencíallarınıń ayırmalarınıń qosındısına teń:

$$V_{AC} = V_{AB} + V_{BC} = (V_B - V_A) + (V_C - V_B) = V_C - V_A.$$

Kórinip turǵanıday, V_{AC} nıń shaması tek V_A hám V_C shamalarınıń mánisleri boyınsha anıqlanadı, yaǵnıy V_{AC} nıń shaması eger B metallı bolmaǵan jaǵdayda A hám C metalları bir birine tiyip turǵan jaǵdayda payda bolatuǵın potencíallardıń ayırmasına teń. Solay etip, biz mınaday juwmaqqa kelemiz: *bir biri menen izbe-iz tutastırılǵan metallardan tuyıq shınjır payda etilgende (125-súwret) bul metallardıń potencíallarınıń kontaktlıq ayırmalarınıń summası shınjırda qosındı e.q.kúshin payda etpeydi.* Haqıyqatında da, $\mathcal{E}$ e.q.kúshi tuyıq shınjırdı aylanıp ótkendeǵı potencíallardıń barlıq sekiriwleriniń algebralıq qosındısınan turadı. Bunnan, tuyıq shınjırdı, misalı hár qıylı bolǵan A, B, C metallarınan turatuǵın shınjırdı aylanıp ótken jaǵday ushın mınaǵan iye bolamız:

$$\mathcal{E} = V_{AC} = V_{AB} + V_{BC} = (V_B - V_A) + (V_C - V_B) = V_C - V_A.$$

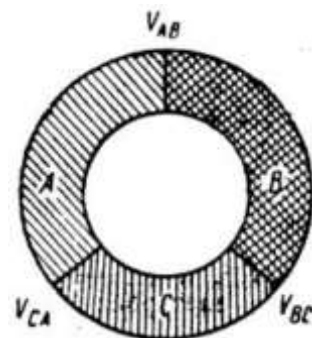
Bun nátiyje shınjırdaǵı barlıq kontaktlar birdey temperaturada turatuǵın jaǵday ushın durıs.

Bunday nátiyjege ulıwmalıq termodinamikalıq kóz-qaraslardıń tiykarında da keliwge boladı. Metallar birinshi áwlad ótkizgishlerge kiredi, yaǵnıy olar arqalı elektr toǵı ótkende hesh qanday ximiyalıq ózgerisler júzege kelmeydi. Sonlıqtan, eger birinshi áwlad ótkizgishlerden turatuǵın tuyıq shınjırdı nolge teń bolmaǵan e.q.kúshi payda bolǵan jaǵdayda, usı e.q.kúshi payda etken turaqlı elektr toǵı ótkizgishlerdiń ózlerinde qanday da bir ózgerislerdiń payda bolıwına alıp kelmegen bolar edi. Usınıń menen birge toq belgili bolǵan quwatqa iye bolǵan, al bul quwat bolsa qorshap turǵan deneler tárepinen beriletuǵın jıllılıqtıń esabınan júzege kelgen bolar edi. Biraq, bunday process júzege keliwiniń múmkinshiligi joq ekinshi áwlad perpetuum mobileni payda etken bolar edi.

Biz tek potencíallardıń kontaktlıq ayırmalarınıń bolıwınıń e.q.kúshiniń payda bolıwına alıp kele almaydı degen juwmaqqa kelemiz. Tuyıq konturdaǵı elektr qozǵawshı kúshi (shınjırdıń barlıq bólimleriniń temperaturaları birdey bolǵanda) tek birinshi áwlad ótkizgishleri menen bir qatarda elektr toǵı ótkende ximiyalıq processler júzege keletuǵın ekinshi áwlad ótkizgishleri bar bolǵan jaǵdayda ǵana payda bola aladı.

125-súwret.

Úsh metaldan dúzilgen tuyıq shınjır.



Klassikalıq elektronlıq teoriyanıń usıllarınan paydalanıp metallardaǵı erkin elektronlardıń sanlarınıń hár qıylı bolıwınıń sebebinen payda bolǵan potencíallardıń kontaktlıq ayırmasınıń ekinshi bólimin qarawdı keltiremiz. Metaldaǵı elektronlardıń energiýalarınıń qáddileriniń bir birine júdá jaqın bolǵanlıǵınıń hám tolıǵı menen toltırılmaǵanlıǵınıń sebebinen bul máseleni qarawǵa boladı.

Metallardıń arasında keskin shegara joq, biraq kólem birligindeǵı elektronlardıń sanları n_{0A} shamasınan n_{0B} shamasına shekem úzliksiz ózgeretuǵın ótiw qatlamı bar dep boljaymız. Ótiw qatlamında

bir biri menen tiyisip turgan metallardıń arasındaǵı shegaraǵa perpendikulyar hám ultanları usı shegaraǵa parallel bolǵan cilindrdi bólip alamız (126-súwret). Meyli, cilindrdiń uzınlıǵı dx , al ultanınıń maydanı dS bolsın. Lorenctiń gipotezası boyınsha metaldaǵı erkin elektronlar gazlerdiń kinetikalıq teoriyasınıń tiykarǵı nızamların qanaatlandıratuǵın elektronlıq gazdi payda etedi (161-paragrafta ayılǵanlarǵa qarańız).

Meyli, cilindrdiń ultanı 1 jaylasqan oblasttaǵı kólem birigindegi elektronlardıń sanı $n_0 + dn_0$ shamasına, al cilindrdiń 2 ultanı turgan orındaǵı elektronlardıń sanı n_0 bolsın. Bunday jaǵdayda 2 ultanındaǵı elektronlıq gazdiń basımı

$$p = \frac{2}{3} n_0 \bar{\omega}$$

shamasına teń boladı. Bul teńlikte $\bar{\omega}$ arqalı berilgen temperaturadaǵı elektronlardıń ortasha kinetikalıq energiyası belgilengen.

Joqarıda kórip ótkenimizdey (163-paragraf), berilgen temperaturadaǵı elektronlardıń ortasha kinetikalıq energiyası $\bar{\omega}$ ushın klassikalıq hám kvantlıq teoriyalar hár qıylı mánislerdi beredi. Usınıń menen birge klassikalıq teoriya metallardıń jıllılıq sıyımlıǵı ushın durıs bolmaǵan nátiyjelerge alıp keledi. Biraq, usınday jaǵdayǵa qaramastan, biz ápiwayı bolǵanlıǵı sebepli $(3/2)kT$ klassikalıq shamasınan paydalanamız hám processtiń tiykarǵı belgilerin anıqlaw menen sheklenemiz.

Solay etip, cilindrdiń 2-ultanına elektronlıq gazdiń basımı p ushın $\bar{\omega} = 3/2 kT$ ańlatpasın qoyıp

$$p = n_0 kT$$

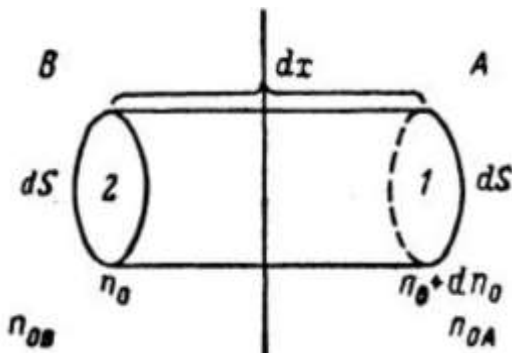
teńligine iye bolamız. Tap sol sıyaqlı cilindrdiń 1-ultanındaǵı elektronlıq gazdiń basımı ushın

$$p + dp = (n_0 + dn_0)kT$$

ańlatpasın alamız. Bunnan cilindrdegi basımlardıń ayırmasınıń

$$dp = kT dn_0 \quad (4)$$

shamasına teń ekenligine kóz jetkeremiz. Basımlardıń usınday ayırmasınıń bar bolıwınıń saldarınan elektronlar 1-ultannan 2-ultanǵan qaray qozǵala baslaydı (eger dn_0 shamasın oń dep esaplasaq). Elektronlardıń usınday qozǵalıǵı zaryadlardıń alıp júriwine, yaǵnıy elektronlardıń bunnan bılay orın almasıwına qarsılıq jasaytuǵın 2 hám 1 ultanlarınırıń arasındaǵı dV potenciallar ayırmasınıń payda bolıwına alıp keledi. Elektr maydanı tárepinen payda etilgen tormozlawshı kúshitiń shaması dp basımlar ayırması payda etken kúsh penen teńleskende dinamikalıq teń salmaqlıq payda boladı.



126-súwret.
Elektronlar gaziniń basımın esaplawǵa.

Biz qarap atırǵan cilindrlik kólemdegi elektronlardıń sanı $n_0 dx dS$ shamasına teń. Bunnan maydan tárepinen barlıq elektronlarǵa tásir etetuǵın kúsh mınaǵan teń:

$$dF = E n_0 dx dS.$$

Bul formulada E - maydanniń kernewligi, e - elektronnıń zaryadı. 131-paragraftaǵı (2a) formula boyınsha maydanniń kernewligi san mánisi boyınsha

$$|E| = \frac{dV}{dx}$$

shamasına teń. Bunnan

$$|dF| = e n_0 \frac{dV}{dx} dx dS$$

teńligine iye bolamız. Demek, $|F| = dp dS$ teńliginiń orınlanıwın talap etetuǵın dinamikalıq teń salmaqlıq shárti

$$e n_0 dV = dp$$

teńligine yamasa, eger (4)-formulanı paydalanatuǵın bolsaq, onda

$$en_0 dV = kT dn_0$$

teńligine alıp keledi. Sońǵı teńlikti bılayınsha jazıwǵa boladı:

$$dV = \frac{kT}{e} \frac{dn_0}{n_0}.$$

Potenciallardıń tolıq ayırması bolǵan V_{AB}'' shamasın alıw ushın bul qatnastı elektronlardıń kólem birligindegi sanı n_{0B} bolǵan metaldıń B oblastındaǵı qatlamınan elektronlardıń kólem birligindegi sanı n_{0A} bolǵan metaldıń A oblastındaǵı qatlamına shekem integrallaw kerek usınday jollar menen

$$V_{AB}'' = \int_{n_{0B}}^{n_{0A}} \frac{kT}{e} \cdot \frac{dn_0}{n_0} = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_{0A}}{n_{0B}}$$

ańlatpasın alamız. Bul ańlatpa 168-paragraftaǵı (3)-formulaǵa sáykes keledi.

Joqarıda kórsetkenimizdey, V_{AB}'' potenciallar ayırmasınıń shaması kishi. Bul hár qıylı metallardaǵı kólem birligindegi erkin elektronlardıń sanlarınıń bir birinen az shamaǵa ayrılatuǵınlıǵı menen baylanıslı. Qanday bolǵanda da n_{0A}/n_{0B} qatnasınıń shamasın 3 ten aspaydı dep esaplaw kerek. Bul $\ln \frac{n_{0A}}{n_{0B}} \cong 1$ teńligin beredi hám, usıǵan sáykes, $T = 300 \text{ K}$ bolǵan jaǵdayda

$$V_{AB}'' \cong \frac{kT}{e} = \frac{1,38 \cdot 10^{-16} \cdot 300}{4,8 \cdot 10^{-10}} \text{ CGSE} \cong 0,03 \text{ v.}$$

shamasına iye bolamız. Joqarıda keltirilgen potenciallar ayırmasınıń ekinshi bólimin klassikalıq kóz-qaraslarda talqılaw tiykarınan illyustraciyalıq xarakterge iye hám qatań teoriyada onıń kvantlıq kóz-qaraslar menen almasırlıwı kerek. Biraq klassikalıq kóz-qaraslarda turıp qaraǵandaǵı processtıń sanlıq mánisleri dál bolmasa da, fizikalıq tárepi ayqın túrde kórinedi.

§ 169. Galvanikalıq elementler. Elektr toǵı ótkende hesh qanday ximiyalıq ózgerisler júzege kelmeytuǵın birinshi áwlad ótkizgishleri (metallar, kómir) menen bir qatarda toq ótkende ximiyalıq ózgerisler bolıp ótetuǵın ekinshi áwlad ótkizgishler de bar. Ekinshi áwlad ótkizgishlerge duzlardıń, kislotalardıń, siltilderdiń eritpeleri kiredi. Joqarıda kórgenimizdey, metallardaǵı elektr toǵı erkin elektronlardıń qozǵalısqına alıp kelinedi. Ekinshi áwlad ótkizgishlerinde ionlar zaryadları alıp júriwshiler bolıp tabıladı. Duzlardı eritkende olardıń molekulları ionlarǵa, yaǵnıy belgileri hár qıylı bolǵan bólimlerge ıdıraydı. Mısalı, suwda as duzın eritkende $NaCl$ molekulları oń zaryadlangan Na^+ hám teris zaryadlangan Cl^- ionlarına ajıraladı. Sırtqı elektr maydanınıń bul ionlardıń qozǵalısqı ekinshi áwlad ótkizgishindegi toqtı payda etedi. *Elektrolitlik dissociaciya* dep atalatuǵın eritpedegi molekullardıń ionlarǵa ajıralıwı processı menen ekinshi áwlad ótkizgishleri arqalı toqtıń ótiwiniń mexanizmin biz elektrizge arnalǵan paragraflarda biz tolıq qaraymız. Al házir ekinshi áwlad ótkizgishleriniń e.q.kúshiniń payda bolıwında tutqan ornın tallaymız.

Biz joqarıda hár qıylı birinshi áwlad ótkizgishlerinen tuyıq konturdı payda etkende onda e.q.kúshlerdiń payda bolmaytuǵınlıǵın kórdik. Eger birinshi hám ekinshi áwlad ótkizgishlerinen tuyıq shınjırdı payda etsek, onda bunday shınjırda nolge teń bolmaǵan $\mathcal{E}$ e.q.kúshleri payda boladı. Birinshi hám ekinshi áwlad ótkizgishleriniń kombinaciyasınıń usınday túri *galvanikalıq elementti* payda etedi.

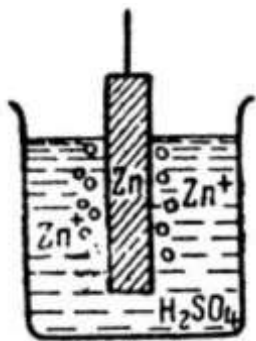
Metall menen (birinshi áwlad ótkizgish) eritpeniń (ekkinshi áwlad ótkizgish) arasındaǵı shegarada potencialdıń sekiriwi orın aladı. Bul sekiriwdi úziksiz túrde qayta tiklew ximiyalıq kúshlerdiń jumısınıń esabınan júzege keledi.

Mısal retinde, kúirt kislotasınıń suwdaǵı eritpesine túsirilgen cink plastinkasın qaraymız (127-súwret). Cink eriy baslaydı; biraq cink atomları eritpege neytral atomlar túrinde emes, al Zn^{2+} oń ionları túrinde ótedi. Usınıń nátiyjesinde eritpe oń zaryad penen, al cink plastinkası bolsa teris zaryad penen zaryadlanadı. Cink penen H_2SO_4 eritpesiniń arasındaǵı shegarada qos elektrlik qatlam payda boladı. Qos elektr qatlamınıń oblastında elektr maydanı payda boladı hám cink ionlarınıń ayırımları cink plastinkasına keri baǵıtta qayta baslaydı. Nátiyjede dinamikalıq teń salmaqlıq ornaydı.

Eritpe menen metaldıń arasındaǵı potenciallar ayırmasınıń belgili bolǵan mánisinde (taza cink

bolğan jaǵdayda $+0,51$ V) elektrlik kúshler ximiyalıq kúshlerdi teńlestiredi hám cinktiń bunnan bılay eriwı toqtaydı.

Biraq, eger H_2SO_4 eritpesine basqa túrdegi metaldan islengen ekinshi metall plastinkasını túsirsek hám onı sımniń járdeminde tutastırsaq, onda bul sım arqalı toq ótedi. Sebebi onıń átirapında birinshi plastinkanıń átirapındaǵıday ionlardıń eritpege ótiw processı júredi, biraq ekinshi plastinka birinshi plastinkaǵa salıstırǵanda basqa potencialǵa iye boladı (128-súwret).



127-súwret.

Cink ionlarınıń kúkirt kislotasınıń eritpesine ótiwi.

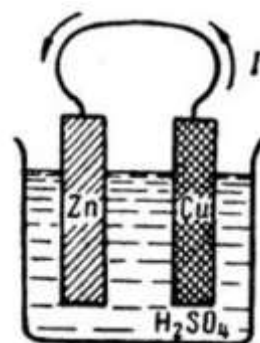
Ximiyalıq kúshlerdiń jumısı eki metaldıń qasındaǵı potencialdıń sekiriwlerin úzliksiz túrde qaytadan tiklep turadı. Ximiyalıq kúshlerdiń esabınan úzliksiz túrde tiklenip turatuǵın potenciallardıń bir birine teń bolmaǵan usınday sekiriwleriniń bolıwı galvanikalıq elementtiń e.q.kúshin payda etedi.

Eritpeden oń zaryadlangan ionlar metalǵa ótetuǵın metall-eritpe jubınıń bolıwı da múmkin. Bunday jaǵdayda metall oń, al eritpe teris zaryadlanadı.

Usınday kóz-qarastan Daniel elementiniń jumıs islewin qaraymız. 104-súwrette sxema túrinde kórsetilgen Daniel elementi, joqarıda atap ótkenimizdey, cink kuporosınıń ($ZnSO_4$) eritpesine túsirilgen cink plastinkasınan hám mis kuporosınıń ($CuSO_4$) eritpesine túsirilgen mis plastinkasınan turadı; eritpeler A diywalı arqalı bólingen. Cink plastikası oń zaryadlangan Zn^{+} ionlarınıń eritpege ótiwiniń saldarınan teris zaryadlanadı; cink penen eritpeniń arasındaǵı shegarada $+0,51$ V ke teń bolğan potencialdıń sekiriwi payda boladı. Mis plastikası bolsa oǵan eritpeden oń zaryadlangan Cu^{+} ionlarınıń kelip birigiwiniń saldarınan oń zaryadlanadı ($CuSO_4$ molekulalarınıń teris zaryadlangan SO_4^{-} ionları menen oń zaryadlangan Cu^{+} ionlarına dissociaciyalanadı. Usınıń saldarınan mis penen shegarada $+0,60$ V bolğan potencialdıń sekiriwi orın aladı.

128-súwret.

Kúkirt kislotasına salınǵan cink penen mis plastinkalarınan turatuǵın galvanikalıq element.



Aqırında, tuyıq kontur boyınsha aylanıp ótiwde mis penen cinktiń arasındaǵı (onıń shaması $+0,006$ ǵa teń) jáne eki eritpeniń bir birine tiyisip turǵan orındaǵı potenciallardıń kontaktlıq ayırmasına diqqat awdarıw kerek. Potenciallardıń soǵı ayırması eritpelerdiń koncentraciyasınan ǵárezli hám volttıń mıńnan birindey shamaǵa teń boladı.

Solay etip, Daniel elementiniń e.q.kúshi tiykarınan metall plastinkalardıń sáykes eritpeler menen tiyisip turǵan shegarada payda bolatuǵın potenciallardıń eki sekiriwiniń sebebinen júzege keledi.

Potenciallardıń bul sekiriwleriniń mánisleri +0,5 V hám +0,6 V shamalarına teń bolǵanlıqtan, Daniel elementiniń e.q.kúshi $\mathcal{E} = 1,1$ V shamasına teń. Bul e.q.kúshitiń shaması elementte ótetuǵın ximiyalıq reakciyalardıń jıllılıqları boyınsha da esaplawǵa boladı.

Termoximiyalıq ólshewler cinktiń $ZnSO_4$ cink kuporosına aylanıwı (aqırǵı esapta elementte usınday qubılıs boladı) $1,06 \cdot 10^5$ kal/mol muǵdarındaǵı energiyanıń bólinip shıǵıwı menen ámelge asadı.

Mıstıń mıs kuporosınan ajralıp shıǵıwı $0,56 \cdot 10^5$ kal/mol muǵdarındaǵı jıllılıqtıń bólinip shıǵıwı menen júredi.

Solay etip, zattıń reakciyaǵa túsken hár bir elementiniń hár bir moli ushın mınaday energiya bólinip shıǵadı:

$$U = (1,06 - 0,56)10^5 \text{ kal/mol} = 5,0 \cdot 10^4 \text{ kal/mol} \cong 2 \cdot 10^{12} \text{ erg/mol.}$$

Bul energiya toqtıń $A = Q\mathcal{E}$ jumısın qollap-quwatlaw ushın jumısaladı. Bul teńlikte $\mathcal{E}$ - elementtiń e.q. kúshi, al Q - alıp ótilgen elektr zaryadlarınń muǵdarı. Bunnan

$$Q\mathcal{E} = U \text{ yamasa } \mathcal{E} = \frac{U}{Q} \quad (1)$$

teńliklerine iye bolamız. Alıp ótilgen zaryadtıń muǵdarı Q dı ańsat esaplawǵa boladı. Eritpedegi cinktiń hár bir oń ionı qos oń zaryadqa (sonday ekenligin keyinirek kóremiz), yaǵnıy san mánisi boyınsha elektronnıń ekiletılgen zaryadı $+2e$ ge iye. Bunnan, cinktiń bir moli erigende elektrodıtan eritpege $Q = 2eN$ muǵdarındaǵı elektr zaryadınıń ótetuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Bul teńlikte N arqalı Avagadro sanı belgilengen. Bunday jaǵdayda (1)-ańlatpa boyınsha

$$\mathcal{E} = \frac{U}{Q} = \frac{U}{2eN}$$

ańlatpasın alamız. U , e hám N shamalarınń san mánislerin qoyıp

$$\mathcal{E} = \frac{2 \cdot 10^{12}}{2 \cdot 4,8 \cdot 10^{-10} \cdot 6 \cdot 10^{22}} \text{ CGSE} \cong 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ CGSE}$$

shamasın yamasa CGSE-birliklerinde alnǵan shamasın voltkege aylandırıp

$$\mathcal{E} = 3,5 \cdot 10^{-8} \cdot 300 \text{ V} = 1,05 \text{ V}$$

shamasına iye bolamız. Bul shama Daniel elementiniń e.q.kúshiniń shamasına jaqın.

Basqa elementlerdiń kópshiliginde bolıp ótetuǵın ximiyalıq processler quramalı xarakterge iye hám, sonlıqtan, e.q.kúshin esaplawdı ápiwayı túrde ámelge asırıw múmkin emes.

§ 170. Termoelektrik qubılıs. 168-paragrafta bizler birinshi áwlad ótkizgishlerinen turatuǵın tuyıq shıńjırda e.q.kúshleriniń payda bolmaytuǵınlıǵın kórsettik. Biraq, e.q.kúshleriniń nolge teń bolıwı hár qıylı ótkizgishlerdiń arasındaǵı kontaktlardıń temperaturaları birdey bolǵan jaǵdayda ǵana orın aladı. Kontaktlardıń temperaturaları hár qıylı bolǵan jaǵdayda nolden ózgeshe bolǵan e.q.kúshi (termoelektrik qozǵawshı kúsh) payda boladı²⁴. Eger eki metaldan tuyıq shıńjırda payda etse hám dánekerlengen orınlardıń birin qızdırsa, al ekinshisin salqın halda uslasa, onda shıńjır arqalı toq ótedi.

Bul effekt *termoelektrik qubılıs* atamasın aldı.

Termoelektrik kúshlerdiń payda bolıwın 168-paragrafta ayılǵan jaǵdaylardı paydalanıp ańsat túsindiriwge boladı. Bizler potencialardıń kontaktlıq ayırmasınıń eki sebep penen baylanıslı ekenligin kórdik: shıǵıw jumıslarınıń hár qıylı bolıwı hám hár qıylı metallardaǵı kólem birligindegi elektronlardıń sanınıń hár qıylı bolıwı. Eger bul eki sebepti de názerde tutsaq, onda 168-paragraftaǵı (2)- hám (3)-formulalar boyınsha A hám B metallarınıń arasındaǵı potencialardıń kontaktlıq ayırması

$$V_{AB} = V_B - V_A + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_{0A}}{n_{0B}} \quad (1)$$

shamasına teń boladı. Eki A hám B metallarınan turatuǵın tuyıq shıńjırda (129-súwret) 1 kontaktı T_1 temperaturada, al 2 kontaktı T_2 temperaturada turatuǵın bolsın. V_A hám V_B shıǵıw jumısları

²⁴ Ádette, hár qıylı bolǵan eki metaldı bir biri menen tutastırıw ushın olardıń ushların qosıp dánekerleydi (Awdariwshılar).

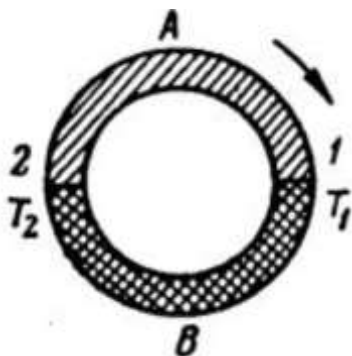
menen erkin elektronlardıń sanları bolǵan n_{0A} hám n_{0B} shamaların temperaturadan ǵárezsiz dep esaplaymız. Eger tuyıq konturdı belgili baǵıtta aylanıp ótkende usharasatuǵın potenciallyardıń barlıq sekiriwleriniń qosındısı tolıq e.q.kúsh $\mathcal{E}$ ǵa teń boladı (mısalı, 129-súwrette kórsetilgen baǵıtta). Bunday jaǵdayda (1)-ańlatpa boyınsha:

$$\mathcal{E} = V_{AB} + V_{BA} = V_B - V_A + \frac{kT_1}{e} \ln \frac{n_{0A}}{n_{0B}} + V_A - V_B + \frac{kT_2}{e} \ln \frac{n_{0B}}{n_{0A}}$$

teńligine iye bolamız hám onnan

$$\mathcal{E} = \frac{k}{e} (T_1 - T_2) \ln \frac{n_{0A}}{n_{0B}} \quad (2)$$

formulasın alamız.



129-súwret.

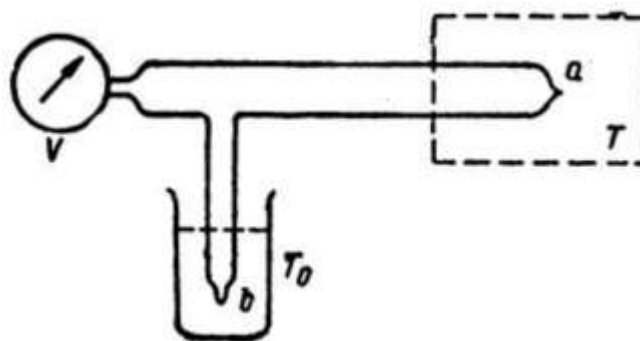
Eger kontaktlardıń temperaturaları T_1 menen T_2 hár qıylı bolsa, onda eki metaldan payda etilgen tuyıq shıńır arqalı toq ótedi.

(2)-formula dánekerlengen orınlardıń temperaturaları hár qıylı bolǵan jaǵdayda $\mathcal{E}$ elektr qozǵawshı kúshiniń payda bolatuǵınlıǵın hám onıń shamasınıń dánekerlengen orınlardıń temperaturalar ayırması bolǵan $T_1 - T_2$ shamasına tuwrı proporcional ekenligin kórsetedi. (2)-formula elektronlardıń n_{0A} hám n_{0B} koncentraciyalarınıń temperaturadan ǵárezli bolıwınıń múmkinshiligini esapqa almaydı.

Teoriya boyınsha termoelektr qozǵawshı kúshiniń shaması hár gradusta volttıń júz mıńnan bir bólegin quraydı. Mısalı: konstantan menen temirden turatuǵın shıńırda dánekerlengen orınlardıń temperaturalarınıń ayırması 1°C bolǵan jaǵdayda $5,2 \cdot 10^{-5} \text{ V}$ shamasına teń e.q.kúshi payda boladı. Bul e.q.kúshiniń shaması dánekerlengen orınlardıń temperaturalarınıń ayırmasına joqarı dálilikte tuwrı proporcional ósedi. Biraq, termoelektr qozǵawshı kúshiniń temperatura menen quramalı xarakterdegi baylanısqa iye bolǵan jaǵdaylar da ushırasadı. Mısalı, cink-gúmis jubı temperaturalıardıń ayırması 0 gradustan 100 gradusqa shekemgi intervalda $+0,5 \text{ mkV/grad}$ shamasın beredi, al 300 den 400°C temperaturaǵa shekemgi intervalda $+4,6 \text{ mkV/grad}$ shamasın beredi. Hátte e.q.kúshiniń belgisiniń de ózgeriwi de múmkin: volfram-molibden jubında temperaturalıardıń ayırması kishi bolǵanda toq qızǵan dánekerlengen orın arqalı molibdennen volframǵa, al temperaturalıardıń ayırması úlken bolǵanda toq volframnan molibdenge qaray júredi.

Termoelektrlik kúshiniń temperaturalıardıń ayırmasınan ǵárezliginiń usınday xakteri temperaturanıń ósiwi menen kólem birligindegi erkin elektronlardıń sanınıń ózgeriwi menen tolıq bolmasa da túsindiriledi. Biraq, termoelektrlik qubılıslardıń tolıq teoriyasınıń tek kvantlıq mexanikanıń tiykarında beriliwi múmkin.

130-súwret.
Temperaturanı termoparanıń
járdeminde ólshewdiń sxeması.



Házirgi waqıtları termoelektrik qubılıslar joqarı temperaturalardı ólshew ushın da, júdá ázzi bolğan qızıwları tabıw ushın da keńnen qollanıladı. Joqarı temperaturalardı ólshew ushın termoelektr qozǵawshı kúshleri aldın ala puqtalıq penen ólshengen belgili bolğan metallardıń sımlarınan soǵılğan termoparalar yamasa termoelementler dep atalatuǵın dúzilisler qollanıladı. Sımlardıń bir biri menen tutasqan orınları dánekerlenedi. Bir kontakt (130-súwrettegi *b* kontaktı) temperaturası belgili T_0 bolğan ortalıqta jaylastırıladı (mısalı, erip atırǵan muzı bar ıdista), al ekinshisi (130-súwrettegi *a* kontaktı) temperaturası T ólshenetuǵın oblastta jaylastırıladı. SHınjırda payda bolatuǵın e.q.kúshiniń shaması V voltmetriniń járdeminde ólshenedi. Ólshengen e.q.kúshiniń shaması boyınsha temperaturalardıń ayırması $T - T_0$ anıqlanadı. T_0 temperaturasınıń mánisi aldın-ala belgili bolǵanlıqtan, temperaturalardıń usı ayırması bizge T nı beredi. Berilgen metallar ushın termopara ushın V volmetrdiń tuwrıdan-tuwrı graduslarda graduırovkalanǵan bolıwı múmkin.

V keste.

Salqın dánekerlengen orınıń temperaturası 0°C bolğan jaǵdaydaǵı termoelektr qozǵawshı kúshleri

$^\circ\text{C}$ lardaǵı $T - T_0$	Termoelektr qozǵawshı kúshi (mV lerdegi)		
	$Pt - Pt + 10\% Rh$	Konstantan-temir	Konstantan-mıs
1	0,00	0,00	0,00
100	0,64	5,2	4,3
200	1,42	10,5	9,3
300	2,29	15,8	14,9
500	4,17	26,6	-
800	7,31	43,4	-
1000	9,56	-	-
1500	15,45	-	-
1700	17,81	-	-

Júdá joqarı bolmaǵan temperaturalardı ólshew ushın konstantan-mıs hám konstantan-temir termoparaları qollanıladı. Zavodlardaǵı hám laboratoriyalardaǵı oshaqlardıń yamasa qızdırgıshlardıń (1700°C shamasına shekemgi) temperaturaların ólshew ushın bir sımı taza platina, al ekinshisi platina menen rodiydiń 10 procentlik quymasınan turatuǵın termopara paydalanıladı.

V kestede kórsetilgen úsh termoparadaǵı kontaktlardıń temperaturalardıń hár qıylı ayırmalarındaǵı termoelektrik qozǵawshı kúshlerdiń mánislerin keltirilgen.

Termoelektrik effektı júdá kishi qızıwları, mısalı, jaqtılıq aǵsınıń jutilıwınıń saldarınan qızıwdı tabıw ushın paydalanıwǵa boladı. Effektı bir biri menen izbe-iz tutastırılǵan bir qatar termoparalardı paydalanıw jolı menen kúsheytiwge boladı. Bunday jaǵdayda barlıq jubınshı dánekerlengen orınlardıń qızıwı, al qatar sanı taq bolğan dánekerlengen orınlardıń salqınlawı múmkin. Usınday túrdegi termoparalardıń sistemasın termobaǵana dep ataydı. 131-súwrette

keltirilgen termobağana konstantan hám mantanin qańıltırlarınıń juqa jolaqlarınan turadı (qalınlıǵı shama menen 0,005 mm). Ortańǵı qaraǵa boyalǵan dánekerlengen orınlar nurlanıwdıń tásirine ushıratıladı, al qaptaldaǵılar úlken massaǵa iye mis qabınıń ishinde jaylasadı. Usınıń saldarınan olardıń temperaurası turaqlı boladı. Bunday termobağanada bir mikrovolt shamasına teń e.q.kúshi 20 erg/sek shamasındaǵı jutılatuǵın nurlanıwdıń quwatına sáykes keledi. Sezgirlikti bunnan da joqarılatıwdıń hám kórsetiwlerdiń úlken turaqlılıǵın vakuumlıq termoelementlerdi paydalanıw jolı menen ámelge asırıw múmkin.

Ádette, vakuumlıq termoelement úlken massaǵa iye A hám B mis sterjenlerine bekitilgen konstantan menen manganinniń júdá juqa jolaqlarınan islengen bir termoparadan turadı (132-súwret). Barlıq sistema ishinen hawası sorıp alınǵan ıdıstır ishinde jaylastırılǵan. Termoparanı vakuumǵa jaylastırıw jıllılıqtıń joǵalıwın azaytadı. Al bul jaǵday jıllılıqtıń burınǵıday aǵsın jutqanda dánekerlengen orınıń kúshlirek qızıwına alıp keledi; nátiyjede termoparanıń sezgirligi 100 esege shekem joqarılaydı. Vakuumlıq termoparalardıń eń jaqsı úlgilerinde bir mikrovoltke teń e.q.kúshi 0,5 erg/sek bolǵan nurlanıwdıń quwatına sáykes keledi.

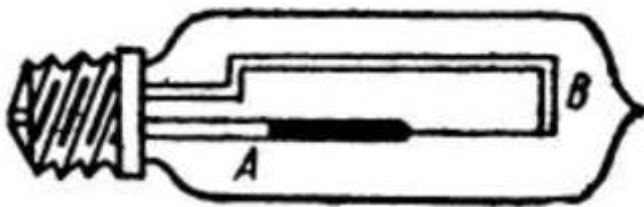
Bir biri menen tutastırılǵan kóp sanlı termoparalardıń jıynaǵı bir neshe voltke teń potenciallar ayırmasın hám bir neshe amper kúshine iye toqtı payda ete alatuǵın batareyanı payda ete aladı. Biraq, usınday termobatareyanıń paydalı tásir koefficienti (p.t.k.) η úlken emes. Termobatareya jutılǵan jıllılıqtıń esabınan elektr toǵın berip, termodinamikanıń ekinshi baslamasın qanaatlandırıwı kerek. Demek onıń p.t.k. sı ideal mashinanıń p.t.k. sınan úlken bola almaydı:

$$\eta = \frac{T - T_0}{T}.$$

Bul teńlikte T - qızǵan dánekerlengen orınıń temperaturası, al T_0 -salkın dánekerlengen orınıń temperaturası.



131-súwret. Termobağana.



132-súwret. Vakuumlıq termoelement.

Solay etip, termobatareyanıń háreketiniń utımlı bolıwı ushın bir dánekerlengen orındı kúshli qızdırıw, al ekinshi dánekerlengen orındı kúshli salqınlatıw kerek. Bunday jaǵdayda zıyanlı joǵaltıwlardan qashıp qutılıwdıń múmkinshiligi kemeyedi hám η paydalı tásir koefficientiniń is júzinde alınatuǵın mánisi teoriyalıq jollar menen alınǵan mánisinen ádewir kishi boladı.

Termoelektrlik effektke kerı bolǵan qubılıs Pelte qubılısı ataması menen belgili. Onıń mánisi mınadan ibarat: hár qıylı eki metaldıń tutasqan ornı arqalı toq ótkende Lenc-Djoul jıllılıǵına qosımsha jıllılıq bólinip shıǵadı yamasa jutıladı. Eger dánekerlengen orın arqalı toq ótkende bul orın qızatuǵın bolsa, onda toqtıń baǵıtın ózgerتكende tap sol orında jıllılıq jutıladı. Bul qubılıstı baqlaw ushın úsh izbe-iz jalǵanǵan ótkizgishlerdiń (A ótkizgishi, B ótkizgishi hám qaytadan A ótkizgishi) 1 hám 2 arqalı belgilengen tutasqan orınların eki kalorimetrge ornalaştıradı (133-súwret). Strelka menen kórsetilgen baǵıtta elektr toǵın ótkizgende 1 dánekerlengen orında toq A metallınan B metallına qaray júredi, al 2 arqalı belgilengen dánekerlengen orında toq B metallınan A metallına qaray júredi. Bunday jaǵdayda 1 orında jıllılıq bólinip shıǵadı, al 2 orında jutıladı. Eger I hám II kalorimetrlerindeki shıńjırdıń kesindileriniń uzınlıqları birdey bolsa, onda olarda bólinip shıǵatuǵın Lenc-Djoul jıllılıqlarınıń mánisleri birdey, al Pelte jıllılıǵı bolsa hár qıylı belgilerge iye boladı.

Solay etip, I kalorimetrde bazı bir waqıttıń ishinde

$$Q_1 = Q + q$$

jıllılıǵı, al II kalorimetrde usınday waqıttıń ishinde

$$Q_2 = Q - q.$$

jıllılıǵı bólinip shıǵadı. Bunnan

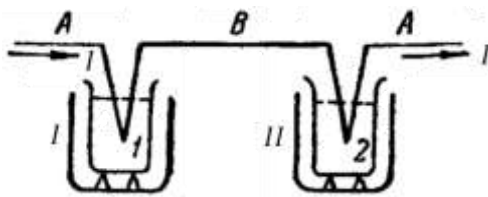
$$Q_1 = Q_2 = 2q$$

yamasa

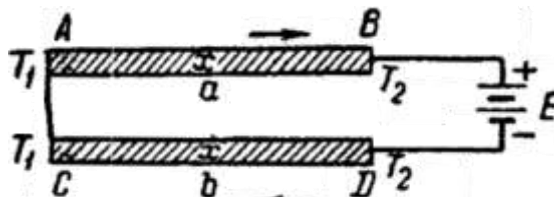
$$q = \frac{Q_1 - Q_2}{2}$$

teńliklerine iye bolamız. Demek, kalorimetrlik ólshewler q jıllılıǵın tikkeley anıqlawǵa múmkinshilik beredi eken. q jıllılıǵı dánekerengen orın arqalı ótetuǵın toqtıń kúshine hám waqıtqa tuwrı proporcional eken.

Sapalıq jaqtan Pelte qubılısı kontaktlıq potenciallar ayırmasınıń bar bolıwı menen túsindiriledi. Eger, dánekerlengen orında potenciallardıń kontaktlıq ayırması tárepinen payda etilgen elektr maydanı elektronlardı tezletetuǵın bolsa, onda bul orında qosımsha jıllılıq bólinip shıǵadı. Eger payda bolǵan maydan elektronlardı irketuǵın bolsa, onda jıllılıq jutıladı.



133-súwret. Pelte qubılısın baqlaw ushın arnalǵan tájiriýbeniń sxeması.



134-súwret. Tomson qubılısın baqlaw usılınıń sxeması.

Tomson tárepinen teoriyalıq jaqtan boljap ayılǵan jáne bir termoelektrik qubılıs bar. Onıń mánisi minadan ibarat: bir tekli ótkizgishte temperaturalar ayırması orın alatuǵın bolsa, onda e.q.kúshiniń payda bolıwı kerek. Usınday e.q.kúshiniń bar bolıwınıń nátiýjesinde Pelte qubılısına usaǵan effekt baqlanadı: bir tekli emes qızdırılǵan ótkizgish arqalı toqtı ótkergende ádettegi Lorenc-Djoul jıllılıǵına qosımsha jıllılıq muǵdarı bólinip shıǵadı yamasa jutıladı. Elektronlar toǵınıń baǵıtı jıllılıq aǵısınıń baǵıtı menen sáykes keletuǵın uchastkalarda qosımsha jıllılıq muǵdarı bólinip shıǵadı. Elektronlar toǵınıń baǵıtı menen jıllılıq aǵısınıń baǵıtı qarama-qarsı bolǵan orınlarda jıllılıq jutıladı.

Tomson qubılısın bilayınsha baqlawǵa boladı: Birdey bolǵan AB hám CD sterjenleri 134-súwrette kórsetilgendey etip tutastırılǵan.

A hám C ushları joqarı bolǵan T_1 temperaturasında, al B hám D ushları tóménirek bolǵan T_2 temperaturada uslap turıladı. Eger sterjenlerdi 134-súwrette kórsetilgendey etip E batareyasınıń shınjırına tutastırsa, onda baǵıtı strelkalar menen kórsetilgen elektrıqlıq toq AB sterjeninde temperaturanıń tóménlew baǵıtında, al CD sterjeninde temperaturanıń joqarılaw baǵıtında júredi. Toq ótpesten burın eki sterjendegi simmetriyalı jaylasqan a hám b noqatları birdey temperaturaǵa iye boladı. Toqtı qosqannan keyin, Tomson qubılısınıń saldarınan a noqatı b noqatına salıstırǵanda ıssıraq boladı. Sebebi AB sterjeninde elektrıqlıq toq baǵıtı boyınsha jıllılıq aǵısınıń baǵıtı menen sáykes keledi, al CD sterjeninde bolsa toqtıń baǵıtı menen jıllılıq aǵısınıń baǵıtları qarama-qarsı.

Jıllılıq qozǵalıslarına qatnasatuǵın elektronlardan turatuǵın "gaz" kóz-qarası tiýkarında turatuǵın joqarıda keltirilgen termoelektronlıq qubılıslardı túsindiriw tek sapalıq xarakterge iye. Sanlıq tárepten teoriyanıń nátiýjeleri tájiriýbede alıńǵan nátiýjeler menen jaman sáykes keledi. Bunday sáykes kelmewlerdiń sebebi metallardaǵı elektronlardıń qásiyetlerin klassikalıq kóz-qaraslardıń tiýkarında túsindiriwge bolmaytuǵınlıǵı menen baylanıslı. Durıs nátiýjelerdi tek kvantlıq mexanikanıń tiýkarında alıw múmkin (163-paragrafqa qarańız).

§ 171. YArım ótkizgishler. Joqarıda qarap ótilgen qubılıslar metall-ótkizgishlerge tiýisli. Olardıń elektr ótkizgishligi erkin elektronlardıń bar bolıwı menen baylanıslı. Házirgi waqıtları fizikada yarım ótkizgishler úlken orınlardı iyeley basladı. Joqarıda ayılıp ótilgenindey (154-paragraf), yarım ótkizgishler metallardan kishi elektr ótkizgishligi menen ayrıladı. Sonıń menen birge yarım ótkizgishlerdiń elektr ótkizgishligi temperaturanıń ósiwi menen

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{b}{T}}$$

nızamı boyınsha úlkeyedi. Bul teńlikte T - absolyut temperatura, al b bolsa hár qıylı yarım ótkizgishler ushın hár qıylı bolǵan turaqlı.

Ádette, yarım ótkizgishlerdiń elektr ótkizgishligi temperaturanıń joqarılawı menen júdá tez ósedi, al olardıń salıstırmalı qarsılıǵı ρ soǵan sáykes kishireydi. Mısalı, yarım ótkizgish bolıp tabılatuǵın taza kremniydiń (*Si*) 20°C temperaturadaǵı salıstırmalı qarsılıǵı $\rho = 6 \cdot 10^4$ om·sm, al 700°C temperaturada onıń salıstırmalı qarsılıǵı $\rho \approx 0,1$ om·sm shamasına, yaǵnıy bir neshe júz mırn ese kishi boladı.

Júdá tómengi temperaturalarda yarım ótkizgishler izolyatorlarǵa aylanadı.

Temperaturanıń joqarılawı menen ótkizgishliktiń úlkeyiwi yarım ótkizgishlerde jıllılıq qozǵalıslarınıń toqtı tasıwshılardı payda etiwı menen túsindiriledi. Yarım ótkizgishlerdiń elektr ótkizgishliginiń úlkeyiwi energıyanı beriw menen baylanıslı bolǵan jaqtılandırıw yamasa basqa da tásirler menen baylanıslı bolıwı múmkin. Yarım ótkizgishlerdiń ayrıqsha áhmiyeti olardıń bir qatar qásiyetleri menen baylanıslı. Mısalı, hár qıylı bolǵan eki yarım ótkizgishten turatuǵın shınjırda eki metall ótkizgishlerden turatuǵın shınjırdaǵıǵa salıstırǵanda ádewir joqarı bolǵan termoelektir qozǵawshı kúshin alıwǵa boladı. Eki kontakttıń temperaturaların T_1 hám T_2 arqalı belgilep, eki yarım ótkizgishtiń shınjırındaǵı e.q.kúshi ushın kontaktlerdiń temperaturalarınıń ayırmasına proporcional ekenligin sáwlelendiretuǵın mınaday ańlatpanı alıwǵa boladı:

$$\mathcal{E} = \alpha(T_1 - T_2).$$

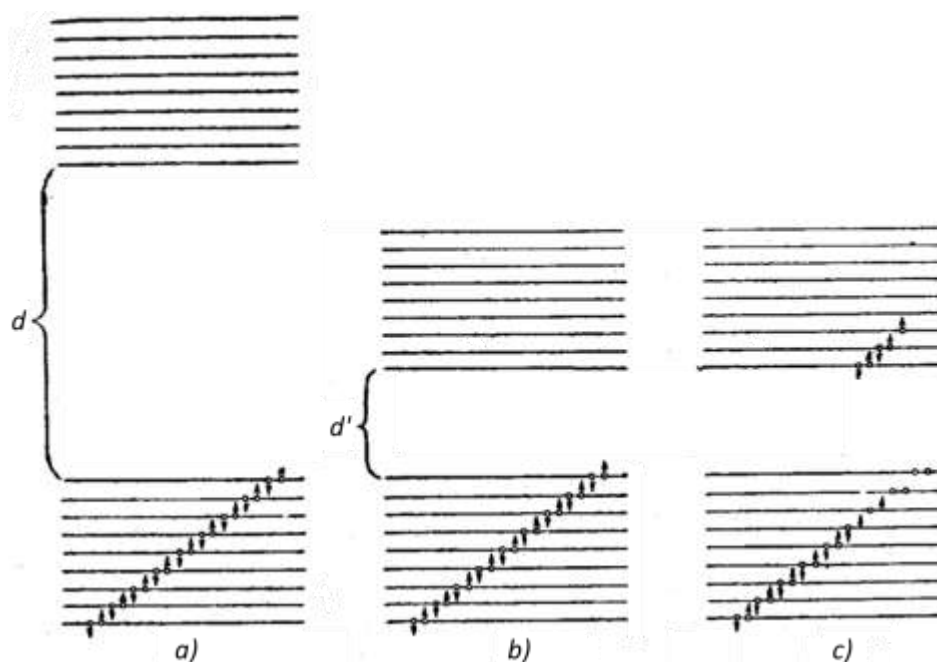
Bul ańlatpadaǵı α nıń mánisi $1,5 \cdot 10^{-3}$ V/grad qa jetedi. Al metallarda bolsa α nıń mánisi 10^{-5} V/grad shamasında.

Eki yarım ótkizgishtiń yamasa yarım ótkizgish penen metaldıń kontaktında ayrıqsha sharayatlar payda boladı. Kontakt bar bolǵan orındaǵı qarsılıqtıń shaması toqtıń baǵıtınan kúshli ǵárezli bolıwı múmkin: toqtıń bir baǵıtında qarsılıqtıń mánisi kishi, al qarama-qarsı baǵıtta - úlken. Bul jaǵday *qattı tuwrılauǵıshlar* dep atalatuǵın dúzilislerde paydalanıladı (237-súwret).

Joqarıda esletilip ótilgenindey, jaqtılandırıwdıń tásirinde yarım ótkizgishlerdiń elektr ótkizgishligi de joqarılaydı. Bul qubılıs jaqtılıq aǵısınıń shamasın ólshew ushın qollanıladı (III tomǵa qarańız).

Yarım ótkizgishlerdiń qásiyetlerin tek qattı denelerdiń kvantlıq teoriyasınıń tiykarında túsindiriwge boladı. 163-paragrafta metall ótkizgishlerde elektronlardıń bir birine júdá jaqın bolǵan energıyanıń kóp sanlı qáddilerinde tarqalǵanlıǵı ayılǵan edi. Energiyanıń hár bir qáddi eki elektron menen toltırıladı. Ótkizgishte elektronlar tómengi qáddilerdi toltıradı, al joqarǵı qáddiler bos boladı. Bul sırtqı elektr maydanınıń tásirinde elektronlardıń joqarıraq jaylasqan bos orınlarǵa óte alatuǵınlıǵın, yaǵnıy ózleriniń energıyaları, sonıń ishinde kinetikalıq energıyasın ózgerte alatuǵınlıǵın ańǵartadı. Basqa sóz benen aytqanda, elektronlar sırtqı elektr maydanınıń tásirinde ózleriniń energıyaların ózgerte aladı. Energiya qáddileri bir birine júdá jaqın jaylasqanlıqtan, energıya derlik úzliksiz ózgeredi. Bul jaǵday klassikalıq elektronlıq teoriyanıń metallardıń elektr ótkizgishligine tiyisli bolǵan kóp sanlı faktlardı túsindire alǵanlıǵınıń sebeplerin kórsetedi.

Kristallıq qattı denelerdiń tolıǵıraq bolǵan teoriyası kristallarda energıya qáddileriniń bir birinen "qadaǵan etilgen" energıyalıq hallar dep atalatuǵın ádewir keń bolǵan oblastı menen ayrılǵan gruppalarınıń ("zonaları" atamasın beriw qabıl etilgen) payda bolatuǵınlıǵın kórsetedi.



135-súwret. Kristallardağı ruqsat etilgen hallar zonası: a) - dielektrik, b) - yarım ótkizgish, c) - "tesikleri" bar yarım ótkizgish.

Ruqsat etilgen energiyalıq hallardıń bir birine salıstırǵanda hár qıylı bolıp jaylasıwları dielektriklerdiń, ótkizgishlerdiń hám yarım ótkizgishlerdiń qásiyetleriniń hár qıylı bolatuǵınlıǵın túsindiredi. Meyli, kristalda bir biri menen keń aralıq penen ajratılǵan zonalar bar hám tómengi zonadağı qáddilerdiń sanı erkin elektronlardıń sanınıń jartısına teń bolsın. Bunday jaǵdayda barlıq tómengi zona elektronlar menen tolǵan, al joqarıdağı zonada elektronlar bolmaydı. Bul jaǵday 135-a súwrette keltirilgen. Bul súwrette elektronlar strelkası bar noqatlar arqalı belgilengen. Sırtqı elektr maydanı (eger ol júdá kúshli bolmasa) elektronlardı tómengi zonadan joqarǵı zonaǵa ótkere almaydı. Sebebi zonalarardıń arasındağı qashıqlıq úlken. Sonlıqtan sırtqı maydan elektronlardıń qozǵalıw halın pútkilley ózgerte, yaǵnıy olarǵa qosımsha tezlik bere almaydı. Kristalda sırtqı maydannıń tásirinde elektr toǵı payda bolmaydı. Bunday kristall dielektrik (izolyator) bolıp tabıladı. Eger tómengi zonanıń barlıǵı elektronlar menen tolmaǵan bolsa, onda hátte hálisiz elektr maydanı elektronlardı jaqın jaylasqan bos qáddilerge ótkere, yaǵnıy qozǵalısqı keltire aladı. Bunday kristall (metall) ótkizgish bolıp tabıladı.

Bul ayılǵanlardan, kvantlıq hám klassikalıq teoriyalardıń dielektrikler menen metallardıń arasındağı ayırmanı pútkilley hár qıylı etip túsindiretuǵınlıǵı kórinip tur. Klassikalıq kóz-qaraslar boyınsha barlıq elektronlar ózleriniń atomlarınıń qasında bekkem uslap turıladı. Metallarda bolsa erkin elektronlar bolıp, olardıń sırtqı maydannıń tásirinde alıp júriwi elektr toǵın payda etedi. Kvantlıq kóz-qaraslardan, dielektriklerde de, metallarda da "erkin", yaǵnıy belgili bir atomlar menen baylanıspaǵan elektronlar bar boladı²⁵. Dielektrikler menen metallar elektronlardıń energiyalıq hallarınıń ruqsat beriletuǵın mánisleriniń zonalarınıń tolıqtırılıwı hám bir birine salıstırǵandağı jaylasıwları boyınsha ayırıldı.

Zonalıq teoriya tek metallardıń elektr ótkizgishligin túsindiriwdegi klassikalıq teoriya ushırasatuǵın qıyınshılıqlardı saplastırıp ǵana qoymay, yarım ótkizgishlerdiń qásiyetlerin de túsindiredi. Yarım ótkizgish dielektrik sıyaqlı tómengi zonanıń elektronlar menen tolıq

²⁵ Biraq, kristallardağı "erkin" elektronlar menen hesh qanday kúshler tásir etpeytuǵın haqıyqıy erkin elektronlardıń arasında úlken ayırma bar. Teoriya bul ayırmanı kristaldıń ishindegi elektronnıń massası menen haqıyqıy erkin elektronnıń massasınıń arasında ayırmanıń bar bolıwı menen baylanıstıradı. Elektronnıń kristaldıń ishindegi massasın "effektivlik" massa dep ataydı.

toltirilganlığı menen táriyiplenedi (135-b súwret), biraq zonalardıń arasındaǵı qashıqlıq d' úlken emes. Jetkilikli dárejede joqarı temperaturalarda tómengi zonadaǵı elektronlardıń bir bólimi joqarı zonaǵa ótedi (tómengi zonadaǵı bosan bos orınlar bolǵan "tesikler" dóńgelekler menen kórsetilgen, 135—c súwretke qarańız). Joqarǵı zonada ele de kóp sanlı toltırılmaǵan orınlar bar bolǵanlıqtan, elektronlar ózleriniń qozǵalıw halların ózgerte aladı hám, usıǵan sáykes olar sırtqı maydanniń tásirinde tezlik aladı. Nátiyjede olar elektr ótkizgishlikni payda etedi. Sonlıqtan, yarım ótkizgishtegi energiyalıq hallardıń joqarǵı zonasın *ótkizgishlik zonası* dep ataydı. Ótkizgishlik zonasına ótken elektronlardıń sanı n' mınaǵan teń:

$$n' = ae^{-\frac{b}{2kT}}.$$

Bul teńlikte a hám b - turaqlı shamalar. Usı ańlatpaǵa sáykes, elektr ótkizgishlikniń temperaturadan ǵárezligi mınaday túrge iye:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{b}{2kT}}.$$

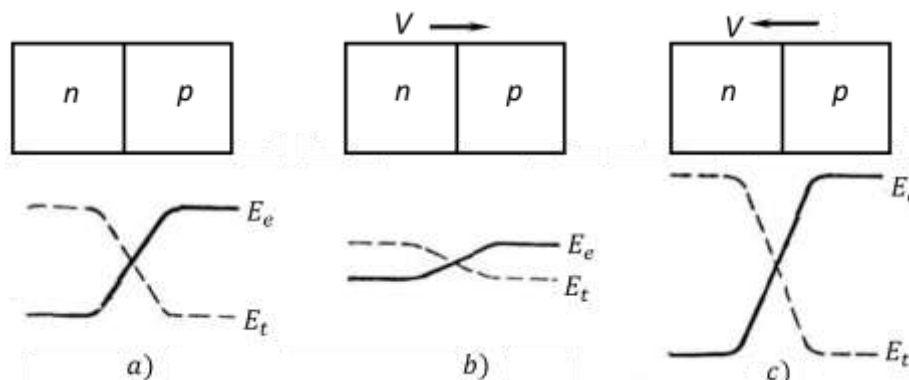
Yarım ótkizgishlerdiń elektr ótkizgishligi jáne de bir ózgeshelikke iye. Elektronlardıń tómengi tolǵan zonadan joqarı zonaǵa ótiwi tómengi zonada erkin orınlar bolǵan "tesiklerdi" payda etedi. Bul tómengi zonadaǵı elektronlardıń elektr ótkizgishlik processine qatnasıwǵa múmkinshilik jaratıp beredi. Sırtqı maydanniń tásirinde elektronlardıń orın almasıwınıń nátiyjesinde "tesik" elektronnıń qozǵalıw baǵıtına qarama-qarsı baǵıtta jılıyadı. Usınday "tesikniń" jılıwı oń zaryadtıń orın almasıwına ekvivalent.

Energiya zonalarınıń kórsetilgen sxeması taza zatlarǵa tiyisli. qosımtalar bar bolǵan jaǵdayda lokallıq xarakterge iye qosımsha energiya qáddileriniń payda bolıwı múmkin. Usınday qáddilerde jaylasqan elektronlar elektr ótkizgishlikke qatnasa almaydı, biraq, bul qáddiler tárepinen elektronlardıń uslap alınıwı yamasa baska zonalarǵa beriliwı qosımsha ótkizgishlik elektronlarınıń yamasa "tesiklerdiń" payda bolıwına alıp kele aladı. Ótkizgishlik elektronlarınıń payda bolıwına alıp keletuǵın qosımtanı *donorlıq* (mısalı kremniydegi mıshyak), al "tesiklerdiń" payda bolıwına alıp keletuǵın qosımtalardı *akceptorlıq* (mısalı kremniydegi bor) qosımta dep ataydı. Berilgen yarım ótkizgishlerdegi kóp bolǵan zaryad tasıwshılardı *tiykarǵı zaryad tasıwshılar*, al salıstırmalı az muǵdardaǵı zaryad tasıwshılardı *tiykarǵı emes zaryad tasıwshılar* dep ataydı. Eger tiykarǵı zaryad tasıwshılar elektronlar bolıp tabılatuǵın bolsa, onda yarım ótkizgishti elektronlıq, al tiykarǵı zaryad tasıwshılar "tesikler" bolatuǵın jaǵdayda yarım ótkizgishti "tesiklik" dep ataydı. Elektronlar menen "tesiklerdiń" sanları salıstırılqıtay bolsa, onda yarım ótkizgishtiń elektr ótkizgishligin aralas elektr ótkizgishlik dep ataydı.

Yarım ótkizgishtiń elektrlik ótkizgishliginiń mexanizminiń elektronlıq yamasa "tesiklik" ekenligi haqqındaǵı másele Xoll effektiniń belgisi boyınsha sheshiliwı múmkin (217-paragraf).

Yarım ótkizgishtiń elektr ótkizgishligi "tesiklerdiń" qozǵalıwınıń saldarınan payda bolǵan jaǵdayda da, haqıyqatında da elektronlardıń qozǵalatuǵınlıǵın názerde tutıw kerek. Másele sonnan ibarat, elektronlar zonanı derlik tolıq toltırıp turatuǵın bolsa, olardıń bir baǵıttaǵı qozǵalıwı bos orın bolǵan "tesikniń" qarama-qarsı baǵıtta qozǵalıwına ekvivalent. Biraq, sonda da, elektronlardıń bos orınlar kóp bolǵan zonadaǵı qozǵalıwı menen derlik tolıq iyelengen zonadaǵı qozǵalıwı bir qatar jaǵdaylarda (mısalı Xoll effektiniń belgileri hár qıylı bolǵan jaǵdayda) hár qıylı boladı. Sonlıqtan, yarım ótkizgishlerdiń elektronlıq hám "tesiklik" ótkizgishliklerin bir birinen ayırıwǵa tuwrı keledi. Bul eki tiptegi ótkizgishlikniń bolıwı eki yarım ótkizgishtiń shegarasındaǵı "jabıwshı qatlamnıń" payda bolıwına alıp keledi²⁶. Al bunday qatlamnıń bolıwı eki yarım ótkizgishtiń yamasa metall menen yarım ótkizgishtiń arasındaǵı tuwrılaw tásiriniń payda bolıwına alıp keledi.

²⁶ Jabıwshı qatlam - rus tilinde "zapornıy sloy" (Awdarıwshılar).



136-súwret. Sırtqı elektr maydanı bar bolğan jaǵdaydaǵı elektronlıq (n) hám tesiklik (p) yarım ótkizgishlerdiń shegaralarındaǵı potenciallıq energiyanıń ózgeriwi.

Bir biri menen tiyisip turǵan yarım ótkizgishlerdegi eki túrli zaryad tasiwshılardıń (elektronlar menen "tesiklerdiń") potenciallıq energiyaları hár qıylı. Nátiyjede shegarada potencialdıń sekiriwi júzege keledi (136-súwretke qarańız). Elektronlar menen "tesikler" eki yarım ótkizgishtiń arasındaǵı shegara arqalı diffuzıyalanadı (168-paragrafta gáp etilgen bir birine tiyip turǵan eki metaldıń arasındaǵı shegara arqalı elektronlardıń diffuzıyası menen salıstırıńız).

Sırtqı maydan bolmaǵan jaǵdayda (136-a súwret) eki baǵıtta alıp ótilgen zaryadlardıń muǵdarı birdey hám qosındı toq nolge teń. Sırtqı elektr maydanı bar bolǵanda eki yarım ótkizgishte de elektronlardıń energiyası ózgeredi. Eger, n -yarım ótkizgishten p -yarım ótkizgishe qaray potencialdıń úlkeyiwi orın alatuǵın bolsa n -yarım ótkizgishtegi elektronlardıń energiyası úlkeyedi. Nátiyjede eki yarım ótkizgishtiń arasındaǵı shegaradaǵı potencialdıń sekiriwiniń shaması kishireyedi (136-b súwret) hám elektronlar bir yarım ótkizgishten ekinshisine ańsat óte alatuǵın boladı, kontakt arqalı toq ótedi. Onıń kúshi potenciallar ayırmasınıń úlkeyiwi menen tez ósedı. Kerisinshe, eger p -yarım ótkizgishinen n -yarım ótkizgishine qaray potencial ósetuǵın bolsa, onda eki yarım ótkizgishtiń arasındaǵı potencialdıń sekiriwi úlkeyedi (137-c súwret) - "jabıwshı qatlam" payda boladı. Endi, eger potenciallar ayırması júdá úlken bolmaǵan jaǵdayda elektronlar kontakt arqalı óte almaydı, yaǵnıy bir yarım ótkizgishten ekinshi yarım ótkizgishe qaray ótetuǵın toqtıń kúshi júdá kishi boladı.

Álbette, tiykarǵı emes zaryad tasiwshılar ushın yarım ótkizgishlerdiń arasındaǵı shegara arqalı ótiw shárti tiykarǵı zaryad tasiwshılardıń ótiw shártine salıstırǵanda keri boladı. Biraq, tiykarǵı emes zaryad tasiwshılardıń sanınıń kishi ekenligine baylanıslı, olar tárepinen payda etiletuǵın toq kishi boladı hám kontakt arqalı ulıwmalıq toqtıń ótiwinde sezilerliktey orındı iyelemeydi.

Tap sonday "jabıwshı qatlamnıń" yarım ótkizgish - metall shegarasında da payda bolıwı mómkin.

Sovetler Soyuzında yarım ótkizgishlerdiń qásiyetlerin eksperimentallıq úyreniw A.F.Ioffe hám onıń xızmetkerleri tárepinen keń masshtablarda ótkerildi. Eki yarım ótkizgishtiń arasındaǵı shegaradaǵı tuwrılawshı qásiyettiń payda bolıwın bir waqıtta hám bir birinen ǵárezsiz B.I.Davidov, SHottki hám Mott anıqladı.

§ 172. Qızdırılǵan ótkizgishler tárepinen elektronlardıń shıǵarılıwı. Bunnan aldırǵı paragraflarda metaldan elektronlardıń sırtqa shıǵarılıwınıń shıǵıw jumısı dep atalatuǵın $A = eV_A$ shamasına teń bolǵan jumıstıń orınlanıwı menen baylanıslı ekenligi kórsetilgen edi. Ójire temperaturalarında metaldıń ishindegi elektronlardıń sanınıń júdá kishi bólegi ǵana metaldan shıǵıw ushın jetkilikli bolǵan energiyaǵa iye bola aladı. Temperaturanıń joqarılawı menen tez qozǵalatuǵın elektronlardıń sanı artadı hám usıǵan baylanıslı metaldan ajırılıp shıǵa alatuǵın elektronlardıń sanınıń kóbeyiwi kerek. Bul process qızdırılatuǵın suyıqlıqtan molekulalardıń puwlanıwına uqsas. Jetkilikli dárejede joqarı bolǵan temperaturada metall tárepinen elektronlardı sezilerliktey shıǵarıwı baslanadı. Bul qubılıstı *termoelektronlıq emissiya* dep ataydı.

Bul qubılıstı klassikalıq elektronlıq teoriyanıń kóz-qaraslarınń tiykarında tallaymız. Meyli, berilgen metaldan elektronnıń shıǵıw jumısı eV_A shamasına teń bolsın. Bunday jaǵdayda metaldı $\frac{1}{2}mv^2$ kinetikalıq energiyası eV_A shamasınan kem bolmaǵan elektronlar taslap shıǵadı, yaǵnıy

$$\frac{1}{2}mv_k^2 = eV_A. \quad (1)$$

shárti orınlanadı. $mv_k^2/2$ energiyasın atomlardıń (yamasa molekulalardıń) jıllılıq qozǵalıslarınıń ortasha energiyası menen salıstıramız. Klassikalıq teoriya boyınsha ortasha energiya $\frac{3}{2}kT$ shamasına teń bolıwı kerek (k arqalı Bolcman turaqlısı belgilengen). Bul energiyanı shıǵıw jumısı bolǵan eV_A shamasına teńlestirip, bólekshelerdiń ortasha energiyası shıǵıw jumısına teń bolatuǵın temperaturanı tabamız:

$$\frac{3}{2}kT_k = eV_A.$$

Bunnan

$$T_k = \frac{2eV_A}{3k} \quad (2)$$

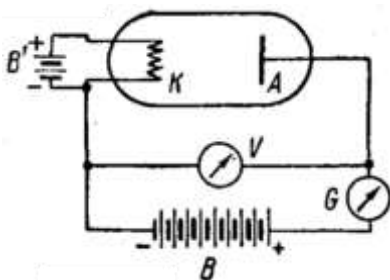
formulasına iye bolamız. Hár qıylı metallar ushın shıǵıw jumısınıń mánisi 1 den 4,5 eV ke shekem ózgeredi. Eger biz $V_A = 2$ V, yaǵnıy potencialdıń $\frac{2}{300}$ CGSE-birligin qabıl etsek, onda

$$T_k = \frac{2 \cdot 4,8 \cdot 10^{-10} \cdot 2}{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-16} \cdot 300} \cong 15000 \text{ K},$$

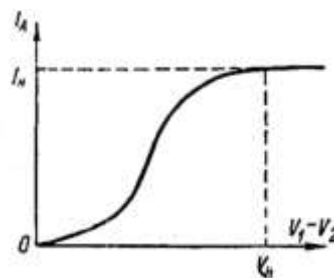
yaǵnıy elektronlardıń metaldan ushın shıǵıwı ushın zárúr bolǵan energiyası salıstırmalı júdá joqarı bolıwı hám onlaǵan mıń gradus temperaturadaǵı atomlardıń jıllılıq qozǵalıslarınıń ortasha energiyasına sáykes keliwı kerek. Biraq, haqıyqatında, sezilerliktey muǵdardaǵı elektronlar 1000 - 3000 K temperaturada, yaǵnıy ádewir tómen bolǵan temperaturalarda ushıp shıǵa aladı.

Bul jaǵday elektronlardıń energiyalar boyınsha belgili túrdegi tarqalıwı menen túsindiriledi. Usıǵan baylanıslı elektronlardıń bir bólimi ortasha energiyaǵa salıstırǵanda úlken energiyalǵa iye boladı. Usınday elektronlardıń esabınan emissiya baslanadı.

Eger qızǵan metall tárepinen shıǵarılǵan elektronlardı sırtqı elektr maydanınıń tásirinde tezletetuǵın bolsaq, onda olar toqtı payda etedi. Bunday elektronlıq toqtı vakuumde alıwǵa boladı. Bunday jaǵdayda molekulalar yamasa atomlar menen soqlıǵısıw elektronlardıń qozǵalıslarına kesent bermeydi. Elektronlıq toqtıń kúshi boyınsha qızǵan metall tárepinen shıǵarılatuǵın elektronlardıń sanı haqqındaǵı juwmaqqa keliwge boladı.



137-súwret. Katodlıq lampanıń járdeminde termoelektronlıq emissiyanı baqlaw.



138-súwret. I_A anod toǵınıń katod penen anodtıń arasındaǵı $V_1 - V_2$ potenciallar ayırmasınan ǵárzligi.

Termoelektronlıq emissiya qubılısın ishinen hawası sorıp alınǵan hám ishinde eki elektrodi bar naydan turatuǵın katod lampasınıń járdeminde úyreniw ańsat. Bul eki elektrodtıń biri sim túrindegi K elektrodi (137-súwret) hám disk yamasa plastinka túrindegi A elektrodi bolıp tabıladı. Katod dep atalatuǵın K elektrodi B batareyasınıń teris polyusı menen tutastırılǵan, al anod dep atalatuǵın A elektrodi sol batareyanıń oń polyusı menen tutastırılǵan. K katodın qosımsha B'

batareyasınıń járdeminde qızdırıwǵa boladı. K katodı hám A anodınıń arasında payda etilgen elektrostatikalıq maydan qızdırılǵan K katodınan shıǵatuǵın elektronlardı tezletedi: usınıń nátiyjesinde K menen A nıń arasında vakuum arqalı ushatuǵın elektronlardıń aǵısı $KAGBK$ shinjirín tuyıqlaydı. Toq shinjirinde payda bolatuǵın toqtıń kúshi G ásbabınıń járdeminde ólshenedi. V voltmetri K katodı hám A anodınıń arasındaǵı potenciallar ayırmasın ólshewge múmkinshilik beredi.

Tájiriybeler lampa arqalı ótetuǵın toqtıń (onı anod toǵı dep ataydı) katodtıń temperaturasınıń hám katod penen anodtıń arasındaǵı potenciallar ayırması bolǵan $V_1 - V_2$ shamasınan ǵárezli ekenligin kórsetedi. Katodtıń temperaturası turaqlı bolǵanda anod toǵınıń kúshi I_A potenciallar ayırması $V_1 - V_2$ nıń ósiwi menen úlkeyedi. Biraq I_A toq kúshi menen $V_1 - V_2$ potenciallar ayırmasınıń arasındaǵı ǵárezlik toq penen potenciallar ayırmasınıń arasında tuwrı proporcionallıq baylanıs bolǵan Om nızamına usaǵan nızam menen ańǵartılmaıdı. Bul ǵárezlik 138-súwrette kórsetilgendey ádewir quramalı xarakterge iye. Dáslep toqtıń shaması $V_1 - V_2$ potenciallar ayırmasınıń shamasına baylanıslı ástelik penen, keyin tezirek, bunnan keyin jáne ástelik penen ósedi hám belgili bolǵan $V_1 - V_2 = V_n$ shamasınan baslap ósiwdi pútkilley toqtatadı. Toqtıń shaması toyınıw shamasına jetedi.

I_A anod toǵı menen $V_1 - V_2$ potenciallar ayırmasınıń arasındaǵı ǵárezliktiń usınday xakteri sapalı túrde bılayınsha túsindiriledi. Elektrodlardıń arasındaǵı qashıqlıq jetkilikli dárejede úlken bolǵanda $V_1 - V_2 = 0$ teńligi orınlangan jaǵdayda anod toǵınıń shaması da nolge teń²⁷. Sebebi, katodtan ushıp shıqqan elektronlar onıń átirapında elektronlıq bulttı payda etedi. Bul bult endi ushıp shıǵatuǵın elektronlar ushın tormozlaytuǵın elektr maydanın payda etedi; usınıń nátiyjesinde elektronlardıń bunnan bılayǵı emissiyası toqtaydı: metaldan neshe dana elektron ushıp shıqsa, tap sonshama dana elektron elektronlıq bulttıń maydanınıń tásirinde metallǵa qaytadı. Elektronlardıń arasında maydandı payda etkende elektronlıq bulttıń elektronları tezleniw aladı hám anod penen katodtıń arasında toq payda boladı. Toqtıń kúshi I_A potenciallar ayırması bolǵan $V_1 - V_2$ shamasına baylanıslı ósedi. Teoriyalıq esaplawlar (186-paragraf) I_A toq kúshiniń $(V_1 - V_2)^{3/2}$ shamasına proporcional ekenligin kórsetedi:

$$I_A = \alpha(V_1 - V_2)^{3/2}. \quad (3)$$

(3)-formula Boguslavskiy-Lengmyur formulası dep ataladı. Bul formuladaǵı α koefficientiniń shaması elektrodlardıń forması menen jaylasıwlarınan ǵárezli. Solay etip, I_A toq kúshi $V_1 - V_2$ shamasına tuwrı proporcionallıqtan tezirek ósedi eken.

Biraq potenciallar ayırması $V_1 - V_2$ nıń bunnan bılay ósiwi menen toqtıń ósiwi irkile baslaydı. Sebebi K katodı tárepinen berilgen temperaturada shıǵarılatuǵın elektronlardıń ulıwmalıq sanı sheklengen. $V_1 - V_2$ potenciallar ayırmasınıń shaması katodtan shıǵatuǵın barlıq elektronlardı sorıp alıwǵa jetkilikli bolǵan V_t shamasına jetkende toqtıń bunnan bılay ósiwi pútkilley toqtaydı. Bunday jaǵdayda toqtıń shaması toyınıw toǵı I_t nıń shamasına jetedi. Bul jaǵdayǵa 138-súwrettegi grafiktiń gorizont baǵıtındaǵı bólimi sáykes keledi.

Joqarıda ayılǵan jaǵdaydıń tiykarında I_t toyınıw toǵınıń san shamasınıń berilgen temperaturadaǵı katodtan waqıt birligi ishinde ushın shıǵatuǵın barlıq elektronlardıń zaryadlarınan shamasına teń ekenligi kelip shıǵadı.

Demek, eger biz katodtan waqıt birliginde ushıp shıǵatuǵın elektronlardıń sanın n arqalı belgilesek, onda toyınıw toǵınıń san shaması ushın

$$I_t = ne$$

teńligine iye bolamız. Bul teńlikte e - elektronnıń zaryadı. Bunnan katodtan waqıt birliginde ushıp shıǵatuǵın elektronlardıń sanı ushın

²⁷ Elektrodlar bir birine jaqın jaylasqan jaǵdayda $V_1 - V_2 = 0$ teńligi orınlangan jaǵdayda da toqtıń shaması nolge teń bolmaydı.

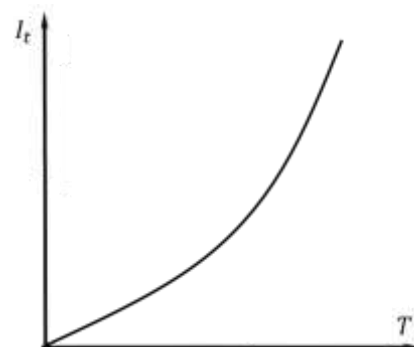
$$n = \frac{I_H}{e} \quad (4)$$

teńligine iye bolamız.

Tájiriybeler toyınıw toǵınıń shamasınıń katodtıń temperaturasınıń joqarılawı menen dim tez ósetuǵınlıǵın kórsetedi. Toyınıw toǵınıń elektronlardı shıǵaratuǵın metaldıń temperaturasınan ǵárezliginiń xarakteri 139-súwrette kórsetilgen.

(4)-formula boyınsha, I_t toyınıw toǵı qızǵan metaldan ushın shıǵatuǵın elektronlardıń sanın ólsheydi. Eger I_t tolıq toǵınıń ornına toyınıw toǵınıń tıǵızlıǵı bolǵan i_t shamasın, yaǵnıy emitterlewshi metaldıń bir birlik betinen berilgen T temperaturadaǵı shıǵatuǵın toqtıń shamasın kirgizsek, onda biz usı T temperaturadaǵı metaldıń betiniń bir birliginen shıǵatuǵın elektronlardıń sanın ólsheymiz.

139-súwret.
 I_t toyınıw toǵınıń katodtıń temperaturası
 T dan ǵárezligi.



Kvantlıq teoriya toyınıw toǵınıń tıǵızlıǵı i_t shamasınıń mánisin esaplawǵa múmkinshilik beredi (mayda shrift penen jazılǵan tekstke qarańız):

$$i_t = BT^2 \cdot e^{-\frac{eV_A}{kT}}. \quad (5)$$

Bul formulada T - metaldıń absolyut temperaturası, eV_A - shıǵıw jumısı, k - Bolcman turaqlısı, B - hár qıylı metall ushın hár qıylı bolǵan konstanta.

VI keste.

Emissiyalıq turaqlı B menen eV_A shıǵıw jumısı

Emitterlewshi bet	$B, a/sm^2 \cdot grad^2$	eV_A, eV
<i>Pt</i>	32	5,3
<i>W</i>	60	4,5
<i>Mo</i>	55	4,2
<i>Th</i>	70	3,4
<i>W + Cs</i>	3,2	1,36
<i>W + Ba</i>	1,5	1,56
<i>W + Th</i>	3,0	2,63
Bariydiń okisi	1,18	1,84

(5)-formula toyınıw toǵınıń tıǵızlıǵı i_t nıń temperaturaǵa baylanıslı júdá tez ósetuǵınlıǵın kórsetedi; ósiw nızamı tiykarınan $e^{-\frac{eV_A}{kT}}$ eksponenciallıq kóbeytiwshisi boyınsha anıqlanadı.

Metaldıń taza beti ushın B shamasınıń teoriyalıq mánisi $120 a/sm^2 \cdot grad^2$ shamasına teń. Haqıyqatında hár qıylı metallar ushın B shaması keń sheklerde variaciyalanadı hám B nıń mánisi metaldıń betiniń halınan hám onıń tazalıǵınıń dárejesinen ǵárezli. Bizlerdiń joqarıda kórsetkerimizdey, tap usınday ǵárezlik shıǵıw jumısı eV_A ushın da orın aladı. Adsorbciyalanǵan *Cs*, *Ba*, *Th*, bariydiń okisleriniń juqa qatlamı shıǵıw jumısınıń shamasın júdá kúshli ózgeritiwge qábiletli. Katodtıń salıstırmalı joqarı bolmaǵan temperaturalarında ádewir úlken bolǵan elektronlıq toqlardı alıw ushın usı jaǵdaydan paydalanadı.

VI keste de hár qıylı taza metallar hám belgili bolğan basqa zattıń juqa plenkası menen jabılğan volfram ushın B menen shıǵıw jumısı eV_A nıń mánisleri keltirilgen.

eV_A shıǵıw jumısı (5)-formulaǵı dárejenıń kórsetkishinde kiretuǵın, al B shaması kóbeytkish bolǵanlıqtan, úlken toqlardı alıwǵa jetiw ushın eV_A shıǵıw jumısı nıń mánisi tiykarǵı orındı iyeleydi. Sonlıqtan, emissiyalıq turaqlı B nıń mánisiniń kishi bolıwına qaramastan, volframnıń betin Cs , Ba h.b. menen qaplaw júdá utımlı bolıp tabıladı.

(5)-formuladaǵı ayırım faktorlardıń tutqan ornın ayqın túrde ańǵarıw ushın tómendegidey sanlı misallardı keltiremiz.

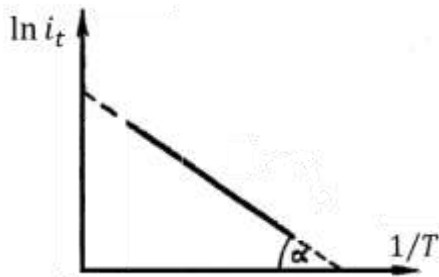
VI keste de keltirilgen maǵlıwmatlar boyınsha, volframnıń taza beti ushın shıǵıw jumısı $eV_A = 4,5$ eV hám emissiyalıq turaqlı $B = 60$ a/sm · grad². Bunnan, $T = 1000$ K temperaturadaǵı toyınıw toǵınıń tıǵızlıǵı i_t mınaǵan teń boladı:

$$i_t = 60 \cdot 1000^2 \cdot e^{-\frac{4,8 \cdot 10^{-10} \cdot 4,5}{1,38 \cdot 10^{-16} \cdot 1000 \cdot 300}} \text{ a/cm}^2 \cong 1,3 \cdot 10^{-15} \text{ a/cm}^2.$$

Volframnıń tap sol beti $T = 1000$ K temperaturada toyınıw toǵınıń tıǵızlıǵı ushın

$$i_t = 60 \cdot 3000^2 \cdot e^{-\frac{4,8 \cdot 10^{-10} \cdot 4,5}{1,38 \cdot 10^{-16} \cdot 3000 \cdot 300}} \text{ a/cm}^2 \cong 11 \text{ a/cm}^2$$

shamasın beredi. Kórinip turǵanıday, T temperaturanıń 1000 nan 3000 K ge kóteriliwı toyınıw toǵınıń shamasınıń 10^{16} ese úlkeydi eken.



140-súwret.

Toyınǵan toqtıń logarifminiń $1/T$ shamasınan sıızqlı ǵárezligi.

Volframnıń ceziy menen qaplangan beti ushın, $eV_A = 1,36$ eV hám $B = 3,2$ a/sm² · grad². Bunnan $T = 1000$ K ushın toyınǵan toqtıń tıǵızlıǵı ushın

$$i_t = 3,2 \cdot 1000^2 \cdot e^{-\frac{4,8 \cdot 10^{-10} \cdot 1,36}{1,38 \cdot 10^{-16} \cdot 1000 \cdot 300}} \text{ a/cm}^2 \cong 0,46 \text{ a/cm}^2$$

shaması alınadı. Solay etip, volframnıń betin ceziy menen qaplaw $T = 1000$ K temperaturada taza volframǵa salıstırǵanda shama menen $3 \cdot 10^{14}$ ese úlken bolǵan toyınıw toǵın alıwǵa múmkinshilik beredi.

I_t toyınıw toǵınıń shamasın ólshew shıǵıw jumısı eV_A nıń mánisin tabıwǵa múmkinshilik beredi. Haqıyatında da, (5)-formulanı logarifmlep

$$\ln i_t = \ln B + 2 \ln T - \frac{eV_A}{kT}$$

ańlatpasın alamız. Birinshi eki aǵzanıń qosındısı bolǵan $\ln B + 2 \ln T$ shamasın juwıq túrde turaqlı dep esaplawǵa boladı, sebebi $\ln T$ nıń mánisi $1/T$ nıń mánisine salıstırǵanda ádewir ástelik penen ózgeredi. Sonlıqtan, juwıq túrde

$$\ln i_t = \text{const} - \frac{eV_A}{k} \cdot \frac{1}{T} \quad (6)$$

teńligin alamız. Eger ordinata kósherine $\ln i_t$ nıń mánislerin, al abscissa kósherine $1/T$ nıń mánislerin qoysaq (140-súwret), onda, (6)-formulaǵa sáykes, $\ln i_t$ shamasınıń $1/T$ shamasınan ǵárezligi tuwrı sıızqlıq penen ańǵartıladı. i_t nıń temperatura T dan ǵárezliginiń usınday xarakterı tájiriyybede jaqsı tastıyıqlanadı. Tuwrınıń abscissa kósheri menen jasaytuǵın múyeshi α nıń tangensi (6)-ańlatpa boyınsha $1/T$ shamasınıń aldında turǵan koefficient penen anıqlanadı, yaǵnıy biz mınaday qatnasqa iye bolamız:

$$\text{tg} \alpha = \frac{eV_A}{k}. \quad (7)$$

Eksperimentallıq maǵlıwmatlar boyınsha $\ln i_t$ shamasınıń $1/T$ shamasınan ǵárezligin tawıp hám usı ǵárezlik boyınsha qıyalıq múyeshi α nı esaplap, biz (7)-ańlatpa boyınsha shıǵıw jumısı nıń

mánisin anıqlay alamız. VI keste de keltirilgen shıǵıw jumıslarınıń mánisleri usınday usıldıń járdeminde anıqlanǵan.

Termoelektronlıq emissiya qubılısı házirgi zaman elektrotexnikası menen radiotexnikasında oǵada áhmiyetli orındı iyeleydi. Kenotronlar, kúsheytkish lamapalar h.t.b. dep atalatuǵın dúzilislerdiń jumıs islewı termoelektronlıq emissiya qubılısına tiykarlanǵan.

Qızdırılǵan betlerdiń zaryadlanǵan bólekleshelerdi shıǵarıwı tek metallarda ǵana emes, al basqa da qattı denelerde baqlanadı. Elektronlıq yarım ótkizgishler tiykarınan elektronlardı emitterleydi. Ionlıq kristallar onı hám teris ionlardı emitterleydi, al ayırım jaǵdaylarda eki belgige iye ionlar da emitterlenedi. $CdJ_2, ZnJ_2, CaF_2, TIJ, TuJ_2$ hám basqa da kóplegen dúzlar 600 – 700 K temperaturada tek onı zaryadlanǵan ionlardı shıǵaradı. Siltili galogenlik dúzlar ($NaCl, KCl$ hám basqalar) 700 – 800 K temperaturalarda tek onı ionlardı, al 900 – 1000 K temperaturalardan joqarı bolǵan temperaturalarda teris ionlardı shıǵaradı.

Siltili metallardıń puwlarında qızdırǵanda onı ionlardı hátte metallar da shıǵaradı.

Elektronlardıń jıllılıqtıń tásirindegi emissiyasınan basqa sırtqı elektr maydanınıń tásirindegi, sonday-aq elektronlar menen ionlardıń kelip urılıwınıń saldarınan júzege keletuǵın emissiya da bar. Keyingi emissiya *ekinshi elektronlıq emissiya* dep ataydı.

Metallardan elektronlardı julıp alıw ushın jetkilikli bolǵan sırtqı elektr maydanın esaplaw betlik qatlamnıń strukturasın dál biliwdi talap etedi. Mikroskopiyalıq gedir-budırılıqlar bettegi elektrónǵa tásir etetuǵın kúshtiń shamasın ádewir ózgeritiwı múmkin. Juwıq esaplawlar boyınsha, elektronlardı julıp alıw ushın ójire temperaturalarında bettiń qasında 10^8 V/sm shamasına barabar maydannıń gradientin payda etiw kerek. Usınday úlken maydanlardı payda etiw ushın cilindrlik kondensatordaǵı maydannıń xarakterinen paydalanıwǵa boladı. 149-paragrafta ayılǵanlar boyınsha kondensatordı payda etetuǵın cilindrlerdiń arasındǵı maydannıń kernewligi

$$E = \frac{2Q}{\epsilon r l}$$

shamasına teń. Bul teńlikte Q - zaryad, l - cilindrdiń uzınlıǵı, ϵ - cilindrlerdiń arasındǵı ortalıqtıń dielektriklik turaqlısı, r - ishki cilindrdiń kósherinen baslap esaplanǵan qashıqlıq. Bunday kondensatordıń sıyımlıǵı mınaǵan teń:

$$C = \frac{\epsilon l}{2 \ln \frac{R_2}{R_1}}.$$

Bul teńlikte R_2 hám R_1 arqalı sáykes sırtqı hám ishki cilindrlerdiń radiusları belgilengen. $C = \frac{Q}{V_1 - V_2}$ qatnasınan paydalanıp ($V_1 - V_2$ arqalı potenciallyar ayırması belgilengen)

$$\frac{Q}{l} = \frac{\epsilon(V_1 - V_2)}{2 \ln \frac{R_2}{R_1}}.$$

qatnasın alamız. Q/l qatnasınıń bul mánisin E ushın jazılǵan ańlatpaǵa qoyıp,

$$E = \frac{V_1 - V_2}{r \ln \frac{R_2}{R_1}}$$

formulasın alamız. Bunnan $r = R_1$ bolǵan ishki cilindrdiń betiniń qasındǵı maydannıń kernewliginiń

$$E = \frac{V_1 - V_2}{R_1 \ln \frac{R_2}{R_1}}$$

shamasına teń bolatuǵınlıǵın kóremiz. R_1 shaması júdá kishi bolǵan jaǵdayda E niń mánisiniń júdá úlken bolıwı múmkin. Tájiriybelerdi ótkergende ishki cilindr sıpatında diametri bir neshe mikron bolǵan jıńışke sabaqtı aladı, bunday jaǵdayda potenciallyardıń $V_1 - V_2$ ayırması júdá úlken bolmasa da sabaqtıń betiniń qasındǵı maydannıń kernewliginiń shaması 10^8 V/sm shamasına shekem jetedi. Tájiriybelerdi vakuumde ótkeriw hám betlerdi puqtalıq penen tegislew kerek. Sebebi, betler tegis bolmaǵan jaǵdayda sabaq penen sırtqı cilindrdiń arasında razryad payda boladı. Betlerdiń júdá tegis bolıwı da shárt. Tap usınday bolǵan qosımsha qubılıslardıń júzege keliwin múmkin bolǵanınsha saplastırıp, elektronlardıń sırtqı elektr maydanı

tárepinen julıp alınatuǵınlıǵın eksperimentte anıqlandı hám elektronlardı julıp alıw ushın zárúrli bolǵan maydannıń kernewliginiń $10^7 - 10^8 \text{ V/sm}$ shamasınan baslanatuǵınlıǵı tabıldı.

Ekinshi elektronlıq emissiya hár qıylı zatlardıń betin elektronlar yamasa ionlar menen bombalawda baqlanadı. Elektronlar menen bombalawdı bet tárepinen shıǵarılgan elektronlardıń bir bólimi shaǵılısqan birinshi elektronlar, al qalǵan bólimi denelerden suwırılıp alıǵan ekinshi elektronlardan turadı. Bet tárepinen shaǵarılgan elektronlardıń ulıwmalıq sanı betke kelip túsken elektronlardıń sanınan kóp bolıwı múmkin. Mısalı, alyuminiy ushın, oǵan kelip túsetuǵın elektronlardıń energiyası 350 eV bolǵan jaǵdayda, betten ushıp shıǵatuǵın elektronlardıń sanı kelip túsetuǵın elektronlardıń sanınan 1,75 ese úlken boladı. Quramalı betlerden elektronlardıń ekinshi emissiyası ayrıqsha úlken boladı. Mısal sıpatında, gúmistıń betindegi okistiń juqa qatlamı bar ceziydiń qatlamın kórsetiwge boladı. Bunday plenkalar ushın ekinshi elektronlardıń sanı birinshi elektronlardıń sanınan onlaǵan ese úlken.

Házirgi waqıtları ekinshi elektronlıq emissiya elektrovakuumlıq ásbaplardıń ishindegi toqlardı kúsheytiw islerinde paydalanılıp atır (Kubeckiydiń fotokóbeytkishleri yamasa nayları).

§ 173. Termoelektronlıq emissianıń teoriyası. Qızǵan metallardıń betinen elektronlardıń shıǵarılıwı olardıń jıllılıq qozǵalıslarınıń esabınan júzege keledi. Elektronnıń metaldan ushın shıǵıwı ushın tek onıń tezliginiń úlken bolıwı ǵana emes, al onıń sáykes baǵıtqa iye bolıwı da zárúr. Sonlıqtan tezliktiń elektron ushıp shıǵatuǵın metaldıń betine perpendikulyar baǵıttaǵı qurawshısınıń mánisi bazı bir shamaǵa teń bolǵan elektronlardı qaraymız. Eger biz tuwrı múyeshli XYZ koordinatalar sistemasın alsaq hám onıń OX kósherin metaldıń betine perpendikulyar etip alsaq, onda bizge tezlikleriniń v_x qurawshıları berilgen $v_x, v_x + dv_x$ intervalında bolǵan dn_{0x} dana elektronlardıń gruppaların qaraymız kerek. Al, tezliktiń basqa eki qurawshılarınıń mánisleri $-\infty$ ten $+\infty$ shamasına shekemgi intervalda bolıwı múmkin.

163-paragrafta aytılıp ótilgenindey, elektronlardıń energiya boyınsha tarqalıwı Fermi nızamına baǵınadı²⁸. Bul nızamnan shamaları $v_x, v_x + dv_x, v_y, v_y + dv_y, v_z, v_z + dv_z$ intervalınıń ishinde jatatuǵın v_x, v_y, v_z qurawshıları iye bolǵan elektronlardıń sanı dn_0 mınaǵan teń:

$$dn_0 = \alpha \frac{1}{1 + e^{\frac{E_k - E'_i}{kT}}} dv_x, dv_y, dv_z. \quad (1)$$

Bul ańlatpada α - konstanta, $E'_i = |E_{pa} - E_i|$, E_i - temperaturanıń mánisi $T = 0$ bolǵandaǵı elektronlardıń maksimalıq energiyası. E_{pa} - potentsiallıq energiya hám E_k arqalı $\frac{1}{2}m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)$ shamasına teń kinetikalıq energiya belgilengen.

OX kósheriniń baǵıtındaǵı qurawshısınıń mánisi $v_x, v_x + dv_x$ intervalında jatatuǵın, al qalǵan qurawshıları tezliktiń iqtıyarlı mánislerine iye bolǵan elektronlardıń sanın esaplaw ushın (1)-formulanıń oń tárepini v_y hám v_z boyınsha $-\infty$ ten $+\infty$ ke shekem integrallaymız:

$$dn_{0x} = \alpha dv_x \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{1 + e^{\frac{E_k - E'_i}{kT}}} dv_y dv_z. \quad (2)$$

Emissiya baqlanatuǵın temperaturalarda metallardan ushın shıǵıwǵa qábiletli bolǵan elektronlar ushın $E_k - E'_i \gg kT$ teńsizligi orınlanatuǵın bolǵanlıqtan, onda $e^{\frac{E_k - E'_i}{kT}}$ shaması birden kóp úlken hám juwıq túrdegi

$$\frac{1}{1 + e^{\frac{E_k - E'_i}{kT}}} \cong e^{-\frac{E_k - E'_i}{kT}} = \frac{E'_i}{kT} \cdot e^{-\frac{m}{2kT}(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)}$$

teńliklerin jaza alamız. Bunnan keyin (2)-ańlatpanı

$$dn_{0x} = \alpha \cdot \frac{E'_i}{kT} \cdot e^{-\frac{mv_x^2}{2kT}} dv_x \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{mv_y^2}{2kT}} dv_y \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{mv_z^2}{2kT}} dv_z$$

túrinde qaytadan jazıwǵa boladı. Usınıń menen birge

$$\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-x^2} dx = \sqrt{\pi}$$

teńliginiń orınlanatuǵınlıǵı belgili. Bunnan

²⁸ Durısıraǵı Fermi-Dirak statistikasına baǵınadı (Awdarıwshılar).

$$dn_{0x} = \alpha \cdot \frac{2\pi kT}{m} \cdot e^{\frac{E'_i}{kT}} \cdot e^{-\frac{mv_x^2}{2kT}} dv_x \quad (3)$$

añlatpasına iye bolamız.

Endi metaldıń betiniń bir birliginen waqıt birliginde uship shıǵatuǵın elektronlardıń sanın esaplaymız. v_x qurawshısınıń mánisi $v_x, v_x + dv_x$ intervalınıń ishinde jatatuǵın elektronlardıń dn_{0x} gruppasını qaraymız. Waqıt birliginde bettiń bir birliginen ultanınıń maydan bir birlikke, al biyikliginiń san mánisi v_x qa teń bolǵan gruppanıń elektronları betten uship shıǵıwǵa úlgeredi (141-súwret, 161-paragraftaǵı tallawdıń usılı menen salıstırıńız). Bunday elektronlardıń sanı mınaǵan teń:

$$dn_x = dn_{0x} \cdot v_x.$$

Waqıt birliginde, bettiń bir birligi arqalı uship shıǵatuǵın elektronlardıń sanı bolǵan n shamasın dv_x tı v_{xa} dan $+\infty$ ke shekem integrallaw jolı menen anıqlaymız. Bul jerde v_{xa} arqalı elektronnıń metaldan uship shıǵıwı ushın jetkilikli bolǵan tezliktiń v_x qurawshısınıń minimallıq mánisi belgilengen. Solay etip,

$$n = \int_{v_{xa}}^{+\infty} v_x dn_{0x}. \quad (4)$$

v_{xa} shamasın minaday pikirlerden anıqlaymız. Metaldıń ishindegi potenciallyq energiya turaqlı hám barlıq orınlarda E_{pa} shamasına teń (101- hám 123-súwretler)²⁹. Demek, elektronnıń metaldan uship shıǵıwı ushın onıń tezliginiń v_x qurawshısı

$$\frac{1}{2}mv_{xa}^2 = |E_{pa}|$$

teńligin qanaatlandıratuǵın v_{xa} shamasınan kishi bolmawı kerek. Bunnan

$$v_{xa} = \sqrt{\frac{2|E_{pa}|}{m}}$$

teńligine iye bolamız. v_{xa} nıń bul mánisin (4)-teńlikke qoyıp hám (3)-teńlikti paydalanıp

$$n = \alpha \frac{2\pi kT}{m} \cdot e^{\frac{E'_i}{kT}} \int_{\sqrt{\frac{2|E_{pa}|}{m}}}^{+\infty} e^{-\frac{mv_x^2}{2kT}} v_x dv_x$$

teńliginiń orınlı ekenligin tabamız. Integrallawdı orınlap

$$n = \alpha \frac{2\pi k^2 T^2}{m^2} \cdot e^{-\frac{|E_{pa}| - E'_i}{kT}}$$

formulasın alamız. Toyınıw toǵınıń tıǵızlıǵı i_t ushın añlatpanı uship shıǵatuǵın elektronlardıń sanı n di elektronlardıń zaryadı e ge kóbeytiw jolı menen alamız:

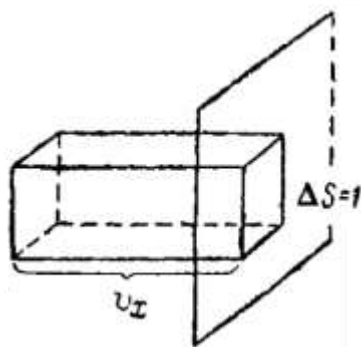
$$i_t = \alpha e \frac{2\pi k^2}{m^2} T^2 e^{-\frac{|E_{pa}| - E'_i}{kT}}.$$

Eń aqırında $|E_{pa}| - E'_i = eV_a$ teńliginiń orınlı ekenligin ańǵarıp (bul teńlikte eV_a arqalı shıǵıw jumısı belgilengen), sońǵı formulanı bilayınsha jazamız:

$$i_t = BT^2 e^{-\frac{eV_a}{kT}}.$$

Bul formulada B arqalı turaqlı shama belgilengen. Solay etip, Fermi tarqalıwı nızamın paydalanıp biz 172-paragrafta berilgen hám durıs ekenligi eksperimentte tastıyqlanatuǵın toyınıw toǵınıń tıǵızlıǵı ushın jazılǵan añlatpaǵa keldik.

²⁹ 101- hám 103-súwretlerdegi energiyalardıń qáddilerin sáwlelendiretuǵın gorizont baǵıtındaǵı sızıqlardıń tolıq energiyaǵa sáykes keletuǵınlıǵın názerde tutıw kerek.



141-súwret.

Bettiń maydan birliginen waqıttır bir birliginde uship shıǵatuǵın elektronlardıń sanın esaplawǵa.

α turaqlısıń teoryalıq mánisi $\frac{2m^3}{h^3}$ shamasına teń. Bul ańlatpada m - elektronńıń massası, h - Plank turaqlısı dep atalatuǵın turaqlı. Onıń mánisi $6,624 \cdot 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{sek}$ shamasına teń.

Bul B nıń mınaday mánisine alıp keledi:

$$B = \frac{4\pi m e k^2}{h^3} = 120 \text{ a/sm}^2 \cdot \text{grad}^2.$$

Eksperimentler bir qatar metallar ushın $B \cong 60 \text{ a/sm}^2 \cdot \text{grad}^2$ shamasın, yaǵnıy eki ese kishi bolǵan shamanı beredi. Bul jaǵdaydı bılayınsha túsindiriwge boladı: $v_x \geq v_{xa}$ teńsizligi orınlanatuǵın elektronlardıń barlıǵı metaldan uship shıqpaydı, olardıń bir bólimi metaldıń betinde shaǵılısadı.

XVII BAP

ELEKTROLITLER MENEN GAZLERDEGI TOQLAR

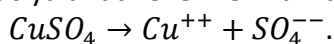
§ 174. Elektrolitlik ótkizgishlik. Taza suyıqlıqlardıń kópshiligi elektr toǵın jaman ótkeredi. Solardıń ishinde, pútkilley taza suw, kerosin, mineral maylar h.t.b. júdá jaman ótkizgishler bolıp tabıladı. Biraq duzlardıń, kislotalardıń hám siltilerdiń suwdagı hám basqa da suyıqlıqlardıǵı eritpeleri toqtı jaqsı ótkeredi. Mısalı, distillyaciyalanǵan suwǵa az ǵana as duzın ($NaCl$) qosıw yamasa oǵan kúkirt kislotasınıń (H_2SO_4) bir neshe tamshısın tamızıw onı jaqsı ótkizgishke aylandırıw ushın jetkilikti.

Biziń kursımızdıń hár qıylı bólimlerinde bizge duzlar menen kislotalardıń eritpeleri arqalı elektr toǵınıń ótiwinde bul zatlardıń quramlıq bólimleriniń elektrodlarda bólinip shıǵatuǵınlıǵın atap ótiwge tuwrı keldi. Toq ótkende quramlıq bóleklerge ıdıraytuǵın ótkizgishlerdiń usınday áwladın biz ekinshi áwlad ótkizgishler yamasa elektrolitler dep, al olardıń ótkizgishligin elektrolitlik ótkizgishlik dep atadıq. Elektrolitlik ótkizgishlik eritpede ionlardıń, yaǵnıy zaryadlanǵan atomlar menen molekularardıń bar bolıwınıń sebebinen júzege keledi. Sırtqı elektr maydanınıń tásirinde ionlardıń qozǵalıǵı elektrolittegi toqtı payda etedi, al birinshi áwlad ótkizgishlerde bolsa (metallardaǵı) toq erkin elektronlardıń qozǵalıǵınıń saldarınan payda boladı.

Bizler joqarıda tolıǵı menen taza suwdıń toqtı júdá ázzi ótkeretuǵınlıǵın kórsetken edik. Bul suwdıń tiykarınan neytral molekularlardan turatuǵınlıǵın hám onda sırtqı elektr maydanınıń tásirinde qozǵalıp, toqtı payda etetuǵın erkin elektronlar menen yamasa qanday da bir erkin zaryadlanǵan bólekshelerdiń joq ekenligin bildiredi. Suwda bir qatar zatlardı, mısalı, qanttı, glicerindi h.t.b. eritkende alınǵan eritpe de toqtı ótkermeydi. I tomnıń 85-paragrafında kórsetilgendey, bul eritpelerde osmoslıq basım boladı, onıń shaması *Vant-Goff* formulasınıń járdeminde jaqsı anıqlanadı. Bul zatlardıń molekuları erigende qanday da bir ózgerislerge ushıramaydı, olar neytral bolıp qala beredi hám dissociıalanbaydı. Duzlar menen kislotalardıń eritpeleri bolsa *Vant-Goff* formulasınıń járdeminde esaplap alınǵan osmoslıq basımǵa sılıstırǵanda úlken basımdı payda etedi. Bizler osmoslıq basımınıń anomal úlken basımınıń payda bolıwın túsindiriw ushın eritilgen zattıń molekularınıń bir bólimin dissociıaciyalanadı, yaǵnıy bóleklerge bólinedi dep esaplaw kerek. Sonıń menen birge eritpeniń ótkizgish bolıwı molekularıń dissociıaciyalanǵan bóliminiń zaryadlanǵan ekenligin, yaǵnıy ionlar bolıp tabılatuǵınlıǵın kórsetedi. Molekularardıń dissociıaciyası suwdagı eritpelerde ayrıqsha úlken. Bul jaǵday suwdıń úlken dielektriklik turaqlıǵa iye bolıwı menen túsindiriledi ($\epsilon = 81$).

Meyli, C ıdısına (142-súwret) mıs kuporosı $CuSO_4$ tiń suwdagı eritpesi kuyılǵan hám oǵan eki elektrod túsirilgen bolsın: K - kómirden hám A - mıstan islengen. Elektrodlarǵa B batareyasınıń polyusları tutastırılǵan hám mıstan islengen A elektrodına batareyanıń oń polyusı, al kómirden soǵılǵan K elektrodına teris polyus tutastırılǵan. Bunday jaǵdayda elektronlar zaryadlanadı hám eritpedegi olardıń arasında elektr maydanı payda boladı. Bul maydanniń tásirinde mıs kuporosınıń molekuları dissociıaciyalanǵın ionlar qozǵala baslaydı hám eritpe arqalı toq ótedi. Oń zaryadlanǵan ionlar K katodqa qaray qozǵaladı hám olar óziniń zaryadın elektrodqa berip, usı elektrodta neytrallanǵan bóleksheler túrinde bólinip shıǵadı. Teris ionlar A anodına qaray qozǵala baslaydı hám sol orında ayrılıp shıǵadı.

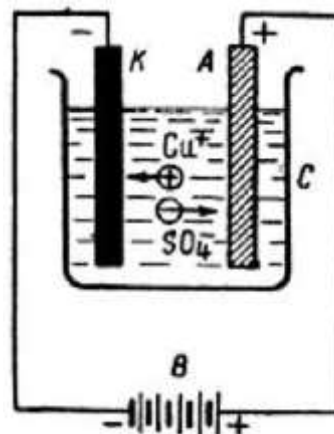
Mıs kuporosınıń eritpesi arqalı bazı bir waqıt ishinde toqtı ótkerip, kómir katodtıń qara bolǵan betinde qızǵısh reńdegi metall mıstıń payda bolǵanlıǵın ańǵarıwǵa boladı. Bul bizde eritpede mıstıń oń zaryadlanǵan ionlar túrinde bolǵanlıǵına isenim payda etedi. $CuSO_4$ molekulasınıń dissociıaciyalanǵan bólimi, yaǵnıy SO_4 gruppasınıń teris ionlardı payda etiwı kerek. Solay etip, biz mınaday nátiyjege kelemiz: mıs kuporosınıń molekuları erigende mıstıń oń ionları menen teris zaryadlanǵan SO_4 ionlarına dissociıaciyalanadı eken. Onı biz bilayınsha jazamız:



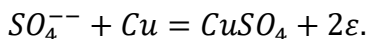
+ + hám — — qos belgileri bul jaǵdayda ionlardıń eki zaryadlıq ekenligin, yaǵnıy eki elektronın joǵaltıwdıń yamasa eki artıq elektrondı qosıp alıwdıń nátiyjesinde payda bolatuǵınlıǵın ańǵartadı.

142-súwret.

Mıs kuporosınıń eritpesindegi elektrolitlik ótkizgishligindegi Cu^{++} hám SO_4^{--} ionlarınıń qozǵalısları.



Mıstıń Cu^{++} oń ionları katodqa qaray qozǵaladı hám sol jerde olar mıs atomları túrinde bóligip shıǵadı. SO_4^{--} teris ionları anodqa qaray qozǵaladı. Eger bul anod mıstan islengen bolsa (biz qarap atırǵan misalda anodtı arnawlı túrde mıstan islengen dep boljadıq), onda anodta neytrallanǵan SO_4^{--} ionları mıs penen ximiyalıq reakciyaǵa kirisedi hám qaytadan mıs kuporosınıń molekulaların payda etedi:

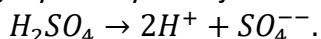


Bul formulada ε arqalı anodqa ótken elektrondı ańǵartadı.

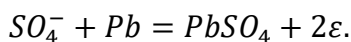
Mıs kuporosınıń qaytadan payda bolǵan molekulaları eritpege ótedi. Nátiyjede mıs kuporosınıń eritpedegi muǵdarı ózgerissiz qaladı; katodta mıs bólinip shıǵadı, al anodtaǵı mıs SO_4^{--} ionları menen reakciyaǵa kirisip, eritpege ótedi.

Bul misaldan tán alıw kerek: ol birinshi tárepten elektrolittiń ótkizgishliginiń erigen zattıń molekulasınıń dissociaciyasınıń saldarınan payda bolǵan ionlardıń qozǵalısların saldarınan payda bolatuǵınlıǵın, ekinshi tárepten elektrodarda erigen zatlardıń quramlıq bólimleriniń bólinip shıǵıwınıń shárt emes ekenligin bildiredi. Elektrizdiń eń aqırǵı nátiyjesi ionlardıń ajralıp shıǵatuǵın orınlarda bolıp ótetuǵın ximiyalıq reakciyalardan ǵárezli. Bul reakciyalardı *ekinshi reakciyalar* dep ataydı hám olardı esapqa almay elektrolitlik dissociaciya processin ayqınlastırıwdıń múmkinshiligi bolmaydı. Kórinip turǵanıday, ekinshi reakciyalardıń xarakterini tek eritpeniń tábiyatı boyınsha ǵana emes, al elektrodlar soǵılǵan materialdan da ǵárezli.

Elektrodardı saylap alıwǵa baylanıslı bir eritpeniń elektroliziniń nátiyjeleriniń hár qıylı bolıwı múmkin. Misal retinde H_2SO_4 kúkert kislotasınıń suwdaǵı eritpesiniń elektrolizin qaraymız. Kúkert kislotasınıń molekulaları vodorodtıń oń ionları H^+ menen teris SO_4^{--} ionlarına dissociyaciyalanadı. SO_4^{--} ionlarınıń zaryadı san mánisi boyınsha bir vodorodtıń ionınıń zaryadınan eki ese úlken. Biz bul jaǵdaydı bılayınsha jazamız:



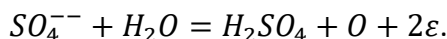
Dáslep kúkert kislotasınıń eritpesine qorǵasın elektrodlar túsirilgen dep boljayıq. Bunday jaǵdayda katod bolıp xızmet etetuǵın elektrodta gaz tárizli vodorod bólinip shıǵadı. Anodta bolsa SO_4^{--} ionı bólinip shıǵa baslaydı hám ol katodtıń materialı menen ximiyalıq reakciyaǵa kirisip qorǵasınıń sulfidin payda etedi:



Eritpedegi kúkert kislotasınıń muǵdarı kemeye baslaydı, elektrolizdiń nátiyjesinde kúkert kislotasınıń ıdırawın alamız.

Endi kúkert kislotasınıń tap sol eritpesin alıp, platinadan soǵılǵan elektrodlar bolǵan jaǵdaydı qaraymız. Bul jaǵdayda burınǵıday, katodta gaz tárizli vodorod bólinip shıǵadı. Anodta bólinip shıǵatuǵın SO_4^{--} ionları bolsa platina menen ximiyalıq reakciyaǵa kirispeydi, al suw menen

reakciyağa kirisedi. Bul reaksiya mına túrde ótedi:

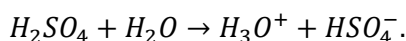


Demek, bul jaǵdayda qaytadan kúkert kislotası payda boladı, al anodtıń qasında gaz tárizli kislorod bólinip shıǵadı. Aqırǵı esapta biz mınaǵan iye bolamız: eritpedegi kúkert kislotasınıń muǵdarı ózgerissiz qaladı; elektrodlardıń qasında gaz tárizli vodorod penen kislorod bólinip shıǵadı. Sonıń menen birge anodta bólinip shıqqan hár bir kislorod atomı ushın katodta eki vodorod atomı bólinip shıǵadı. Demek, suwdıń bir molekulası bir kislorod atomına hám eki vodorod atomına bólinedi eken. Solay etip, kúkert kislotasınıń elektroliziniń barısında júzege keletuǵın ekinshi reakciyalardıń nátiyjesinde suw ıdıraydı, al kúkert kislotasınıń ózi qaytadan tiklengen bolıp shıǵadı.

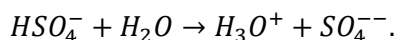
Bul hám basqa da jaǵdaylardı tallap, metallar menen vodorodtıń barlıq waqıtta on ıonlardı payda etetuǵınlıǵın kóremiz. Olardı kationlar dep ataydı. Molekulalardıń baska bólimleri (radikallar, galogenler h.t.b.) teris ıonlardı payda etedi (anionlardı).

Haqıyqatında, dissociaciya processı tekste bayanlangan jaǵdaylarǵa salıstırǵanda quramalı bolǵan xarakterge iye. Sebebi ıonlar suwdıń molekulası menen tásirlesedi. Mısalı, suwdıǵı etitpede vodorodtıń on ıonı H^+ (erkin proton) erkin halda qalmaydı, al suwdıń molekulası menen birigip H_3O^+ ıonın payda etedi (gidroksoniy ıonı). On ıonlar gidraciyaǵa da ushıraydı (suw molekulası menen birikpe), mısalı mistir dúzları erigende $Cu(H_2O)_4^{++}$ gruppaları h.t.b. payda boladı.

Suw eritpelerindegi dissociaciya processiniń ózin dissociyaaciyalanatuǵın molekula menen suwdıń molekulasınıń arasındaǵı óz-ara tásirlesiwdiń nátiyjesi dep qarawǵa boladı. Mısalı, H_2SO_4 kúkert kislotasınıń H_2O suw molekulası menen dissociaciyasınıń nátiyjesinde H_3O^+ hám HSO_4^- ıonları payda boladı:



Bunnan keyin, molekualıq HSO_4^- ıonı suw menen reaksiyaǵa kirisip, eki zaryadlı SO_4^{--} ıonınıń payda bolıwına alıp keledi:



Ádettegi teń salmaqlıq halında eritpede SO_4^{--} ıonları da, HSO_4^- ıonları da bar hám sonıń menen birge ekinshileri birinshilerine salıstırǵanda ádewir kóp ushırasadı. Biraq, elektrolizdiń hám ekinshi reakciyalardıń eń aqırǵı nátiyjesi tiykarǵı tekste kórsetilgendeı boladı.

§ 175. Faradey nızamları. Elektrolitik ótkizgishlik nızamları 1836-jılı eksperimentallıq jollar menen M.Faradey tárepinen ashıldı. Bunday nızamlardıń sanı ekew.

Faradeydiń birinshi nızamı elektrodta bólinip shıqqan zattıń muǵdarı, toqtıń kúshi hám toqtıń elektrolit arqalı ótken waqıtı arasındaǵı baylanısqa tiyisli. Bul nızam mınaday ápiwayı mániske iye: elektrodta bólinip shıqqan zattıń massası M toqtıń kúshi I ge hám toq ótken waqıt t ǵa proporcional:

$$M = kIt. \quad (1)$$

Bul ańlatpada k arqalı bólinip shıqqan zatqa hám elektrolittiń quramına ǵárezli bolǵan proporcionallıq koefficienti belgilengen.

Toqtıń kúshi bolǵan I shamasınıń waqıt t ǵa kóbeymesi elektrolit arqalı ótken elektr zaryadlarınıń muǵdarı Q ǵa teń:

$$It = Q.$$

Bunnan Faradeydiń birinshi nızamına mınaday túr beriwge boladı:

$$M = kQ, \quad (1a)$$

yaǵnıy, *bólinip shıqqan zattıń muǵdarı M elektrolit arqalı ótken elektr zaryadlarınıń muǵdarına tuwrı proporcional. k koefficienti bólinip shıqqan zattıń elektroximiyalıq ekvivalenti dep ataydı.*

$Q = 1$ teńligi orınlanatuǵın jaǵdayda

$$M = k$$

teńligine iye bolamız. Demek, elektroximiyalıq ekvivalent san mánisi boyınsha elektrolit arqalı zaryadtıń bir birliǵı ótkende bólinip shıǵatuǵın zattıń muǵdarına teń.

Faradeydiń ekinshi nızamı elektroximiyalıq ekvivalent k nıń ańıqlaydı.

Faradeydiń ekinshi nızamın keltirip shıǵarmastın burın zatlardıń bazı bir ximiyalıq xarakteristikaların eske túsiremez. Elementtiń *ximiyalıq ekvivalenti* dep san mánisi boyınsha ximiyalıq birikpelerde vodorodtıń 1,0078 grammin almasıratuǵın grammlarda ańlatılauı berilgen elementtiń massasına teń ólshem birligine iye bolmaǵan shamaǵa aytadı.

Elementtiń valentligi dep ximiyalıq birikpede berilgen elementtiń bir atomın almasıratuǵın vodorod atomlarınń sanına aytadı. A arqalı elementtiń atomlıq salmaǵın, al n arqalı onıń valentligin belgilep, ximiyalıq ekvivalenttiń A/n shamasına teń ekenligin kóremiz. Eger biz elementtiń A/n grammin alatuǵın bolsaq, onda bul elementtiń muǵdarı bir gramm-ekvivalentti quraydı.

Faradeydiń ekinshi nızamınıń mánisi *elementlerdiń k elektroximiyalıq ekvivalentiniń olardıń ximiyalıq ekvivalentlerine proporcional* ekenliginen ibarat:

$$k = C \frac{A}{n}. \quad (2)$$

Bul ańlatpada C - barlıq elementler ushın birdey bolǵan proporcionallıq koefficienti. Ádette C koefficientiniń ornına oǵan kerı bolǵan

$$\frac{1}{F} = C$$

shamasın alatuǵın bolsaq, onda Faradeydiń ekinshi nızamı mınaday túrge iye boladı:

$$k = \frac{1}{F} \cdot \frac{A}{n}. \quad (2a)$$

F shamasın *Faradey sanı* dep ataydı. (2a) formuladaǵı elektroximiyalıq ekvivalent k nıń mánisin Faradeydiń birinshi nızamınıń ańlatpasın (1)-teńlikke qoysaq, Faradeydiń eki nızamın biriktiretuǵın formulanı alamız:

$$M = \frac{1}{F} \cdot \frac{A}{n} Q. \quad (3a)$$

Bunnan, eger zattıń bir gramm-ekvivalenti bólinip shıǵatuǵın bolsa, yaǵnıy san mánisi boyınsha A/n shamasına teń bolǵan zattıń massası M bólinip shıǵatuǵın bolsa, onda Q shamasınıń san mánisi F ke teń bolıwı kerek.

Solay etip, *Faradey sanı F san mánisi boyınsha zattıń bir gramm-ekvivalentiniń bólinip shıǵıwı ushın kerek bolǵan elektr zaryadınıń muǵdarı Q ǵa teń.*

Elektroximiyalıq ekvivalentlerdi ólshew Faradey sanı F ushın mınaday mánisti beredi:

$$F = 96494 \frac{\text{kulon}}{\text{gramm} \cdot \text{ekvivalent}}.$$

Elektronlıq teoriyanı dóretkende Faradeydiń nızamları ayırıqsha orındı iyeledi. (3)-formuladan qálegen zattıń bir gramm-ekvivalentin ajıratıp alıw ushın elektrolit arqalı belgili muǵdardaǵı elektr zaryadınıń, atap aytqanda san mánisi Faradey sanı F ke teń bolǵan elektr zaryadlarınń ótiwi kerek. Gramm-ekvivalenttegi atomlardıń sanı N' elementtiń valentligi n nen ǵárezli hám

$$N' = \frac{N}{n}$$

shamasına teń bolatuǵınlıǵı kórinip tur. Bul teńlikte N - Avogadro sanı. Solay etip, hár bir grammnıń bólinip shıǵıwı element arqalı

$$q = \frac{F}{N'} = \frac{F}{N} \cdot n \quad (4)$$

muǵdarındaǵı elektr zaryadınıń ótiwi menen baylanıslı. Elektrolitlerdiń ótkizgishliginiń ionlıq teoriyası boyınsha elektrolit arqalı toqtıń ótiwi ionlardıń orın almasırwına alıp kelinedi. Bunnan (4)-formuladan hár bir elementtiń ionınıń elementtiń valentligi n ge proporcional bolǵan q zaryadına iye bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı.

Ionnıń eń kishi zaryadı e bir valentli ionnıń ($n = 1$) zaryadına sáykes keledi:

$$e = \frac{F}{N}. \quad (5)$$

Elementtiń valentligi pútin n sanı menen ańǵartılatuǵın bolǵanlıqtan, qálegen ion tárepinen alıp júreletuǵın zaryadtıń muǵdarı q dıń

$$q = ne$$

teńliginiń járdeminde anıqlanatuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Demek, ionnıń zaryadı pútin san eselengen eń kishi bolǵan e shamasına teń boladı eken. Solay etip, Faradeydiń nızamı zattıń atomlıq teoriyası menen birgelikte elektrdiń atomlıq qurılısı haqqındaǵı kóz-qarasqa alıp keledi. Bunday juwmaq 1881-jılı Gelmgolc hám Stoney menen bir waqıtta hám bir birinen ǵárezsiz túrde islendi. Zattıń hár bir atomı e elementar zaryadına pútin san eselengen zaryadtı joǵalta yamasa qosıp ala aladı. Bunday elementar e zaryadınıń elektronnıń zaryadı ekenligi ayqın kórinip tur. Eger atom (yamasa molekula) bir yamasa bir neshe elektronın joǵaltatuǵın bolsa, onda oń zaryadlangan ion payda boladı. Eger atom (yamasa molekula) ózine bir yamasa bir neshe artıq elektrondı qosıp alatuǵın bolsa, onda teris ion payda boladı.

Elektrolitlik dissociaciya da vodorod hám siltili metallar (litiy, natriy, kaliy h.t.b.) bir valentli oń ionlardı payda etetuǵın bolǵanlıqtan, olar bir elektronın joǵaltqan atomlar bolıp tabıladı. Cink penen mis ózleriniń sulfatlarınıń ($ZnSO_4$ hám $CuSO_4$) dissociaciyasında eki valentli oń ionlardı payda etedi, yaǵnıy olar eki elektron jetpeytuǵın atomlar bolıp tabıladı.

Cl, Br, J bir valentli teris ionlardı payda etedi - olardıń atomları bir birden artıq elektrondı tutıp aladı.

Bir elementtiń ózi hár qıylı valentlikke iye bola aladı. Usıǵan sáykes hár qıylı zaryadlarǵa iye ionlar da payda boladı. Mısalı, eki valentli temirdiń duzlarınń dissociaciyasında payda bolatuǵın temirdiń oń ionı eki elektronın joǵaltqan temir atomı, al, temirdiń úsh valentli duzlarınń dissociaciyasınıń saldarınan payda bolǵan temirdiń oń ionı úsh elektronın joǵaltqan temir atomı bolıp tabıladı.

(5)-qatnas Faradey sını F hám Avagadro sanı N boyınsha elektronnıń zaryadın anıqlawǵa múmkinshilik beredi. Avagadro sanı N di $N = 6,023 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ shamasına teń dep boljap,

$$e = \frac{F}{N} = \frac{96494}{6,023 \cdot 10^{23}} k = 1,601 \cdot 10^{-19} k = 4,803 \cdot 10^{-10} CGSE$$

shamasın alamız. Bul elektronnıń zaryadınıń waqıtları qabıl etilgen mánisi bolıp tabıladı. Biraq Avagadro sanı N di eksperimentallıq anıqlaw usıllarınıń elektronnıń zaryadın tikkeley ólshew usıllarına salıstırǵanda dálliginiń tómekenligine baylanıslı (5)-terlik Faradey sanı F penen elektronnıń zaryadı e boyınsha Avagadro sanı N di anıqlaw ushın qollanıladı.

§ 176. Elektrolitlik dissociaciya. 174-paragrafta kórsetilip ótilgenindey, elektrolitlik ótkizgishlik eriytuǵın zatlardıń molekularınıń dissociaciyasınıń saldarınan eritpedegi ionlardıń bar bolıwınıń saldarınan júzege keledi. Molekular eritpede eritkishtiń molekuları menen óz-ara tásirlesiwdiń tásirinde dissociaciyalanadı. Dissociaciyanıń dárejesi erigen zattıń molekularınıń tábiyatınan da, eritkishtiń molekularınıń tábiyatınan da ǵárezli. Eger zat eritkish sıpatında paydalanılatuǵın bolsa, onda usı zattıń dielektriklik turaqlısı menen onıń dissociaciyanı payda ete alıw qábiletligi arasında parallelizm bar: eritkishtiń dielektriklik turaqlısı qanshama úlken bolsa, onda ol joqarı dárejeli dissociaciyanı payda ete aladı.

Dissociaciyanıń dárejesiniń xarakteristikası ushın dissociaciya koefficienti α shamasın qaraw ushın kirgizedi. Eritpeniń kóleminiń bir birliginde erigen zattıń n_0 dana molekulası bar bolsın. Olardıń ishinde

$$n'_0 = \alpha n_0$$

molekula ionlarǵa dissociaciyalanǵan, al

$$n''_0 = n_0 - \alpha n_0 = (1 - \alpha)n_0$$

molekula dissociaciyalanbaǵan. Dissociaciya koefficienti α eritpedegi molekularlardıń dissociaciyalanıw dárejesin kórsetedi, eger

$$\alpha = 1$$

teńligi orınlanatuǵın bolsa, onda molekulardıń barlıǵı dissociaciyalangan, al eger

$$\alpha = 0,$$

teńligi orınlatatuǵın bolsa, onda dissociaciya bolmaǵan.

Dissociaciyanıń berilgen dárejesinde biz molekulardıń ionlasıwı menen ionlardıń neytral atomlarǵa aylanıwı (*molizaciya*) processı arasındaǵı teń salmaqlıq penen is alıp baramız. Waqıt birligindegi dissociaciyalanatuǵın molekulardıń sanı bar bolǵan molekulardıń sanına proporcional. Demek, waqıt birliginde kólem birliginde payda bolatuǵın ionlardıń juplarıńnıń sanın

$$\Delta n'_0 = \beta \cdot (1 - \alpha)n_0 \quad (1)$$

shamasına teń dep boljawǵa boladı. Bul teńlikte β - proporcionallıq koefficienti. Molekulanıń payda bolıwı ushın eki belgige iye ionlardıń kerek bolatuǵınlıǵına baylanıslı, qaytadan tiklenetuǵın molekulardıń sanı oń ionlardıń sanına da, teris ionlardıń sanına da proporcional. Hár bir belgige iye ionlardıń kólem birligindegi sanı αn_0 shamasına teń bolǵanlıqtan, kólem birliginde waqıttır bir birligindegi qaytadan tiklenetuǵın ionlardıń juplarıńnıń sanın

$$\Delta n''_0 = \gamma \cdot \alpha n_0 \cdot \alpha n_0 = \gamma \alpha^2 n_0^2 \quad (2)$$

shamasına teń dep esaplawǵa boladı. Bul teńlikte γ - proporcionallıq koefficienti. Ionizaciya processı menen molizaciya processiniń arasındaǵı teń salmaqlıq shártiniń jańadan payda bolatuǵın ionlardıń sanınıń qaytadan qosılatuǵın ionlardıń jubınıń sanına teń bolıwı kerek ekenligi óz-ózin túsiniwli, yaǵnıy

$$\Delta n'_0 = \Delta n''_0$$

teńliginiń orınlı bolıwı kerek. Bunnan, (1)- hám (2)-teńlikler boyınsha

$$\Delta n'_0 = \gamma \cdot \alpha n_0 \cdot \alpha n_0 = \gamma \alpha^2 n_0^2$$

teńliklerine iye bolamız hám usı teńliklerdiń tiykarında

$$\frac{1 - \alpha}{\alpha^2} = \frac{\gamma}{\beta} \cdot n_0 \quad (3)$$

formulasın alamız. Bul formula dissociaciya koefficienti α nı kólem birligindegi erigen molekulardıń sanı n_0 menen baylanıstıradı.

Koefficientlerdiń γ/β qatnası n_0 den ǵárezli emes, al eritpeniń tábiyatınan hám usı eritpe turǵan sharayatlardan (temperaturadan) ǵárezli.

(3)-formula eritpedegi molekulardıń dissociaciyasınıń dárejesi haqqında bazı bir juwmaqlarǵa keliwge múmkinshilik beredi. Dáslep, eritpeni júdá ázzi (suyıq) dep boljaymız, yaǵnıy kólem birligindegi erigen zattır molekularınıń sanı nolge jaqın: $n_0 \cong 0$, bunday jaǵdayda juwıq túrdegi

$$\alpha \cong 1$$

teńligin alamız, yaǵnıy ázzi eritpelerde α nıń mánisi birge jaqın. Bul barlıq molekulardıń dissociaciyalanǵanlıǵın bildiredi.

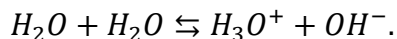
Kerisinshe, eger bir dissociaciyanıń dárejesi kishi dep boljasaq, onda (3)-teńliktegi bólimdegi α koefficientin birge salıstırǵanda esapqa almawǵa boladı. Bunday jaǵdayda

$$\alpha = \sqrt{\frac{\gamma}{\beta} \cdot \frac{1}{\sqrt{n_0}}} \quad (3a)$$

teńligine iye bolamız hám dissociaciyanıń dárejesiniń kólem birligindegi erigen zattır molekularınıń sanınıń kvadrat korenine keri proporcional ekenligin kóremiz yamasa, basqa sózler menen aytqanda, eritpeniń koncentraciyasınıń kvadrat korenine keri proporcional.

Dissociaciya koefficientiniń mánisin eritpeniń elektr ótkizgishligi boyınsha anıqlawǵa boladı (178-paragrafqa qarańız); α shaması eritpeniń tábiyatı menen koncentraciyasına baylanıslı birden kishi bolǵan hár qıylı mánislerge iye boladı. Mısalı, *KCl* ushın 0,0001 mol/l shamasına teń koncentraciyada $\alpha = 0,993$ shaması alınadı, al koncentraciya 1 mol/l shamasına teń bolsa, onda $\alpha = 0,757$ teńligi alınadı. Taza suw da dissociaciyalanǵan, biraq júdá tómén dárejede. Suw oń H^+

ionlarına jáne gidroskildiń teris OH^- ionlarına dissociaciyalanadı. H^+ oń ionları suw menen birigip H_3O^+ ionlarınıń payda bolıwına alıp keledi. Sonlıqtan dissociaciya processiniń barlıǵı mınaday xarakterge iye boladı:



Júdá taza suw ushın α nıń mánisi juwıq túrde $1,7 \cdot 10^9$ shamasına teń hám α nıń usı mánisine H^+ ionlarınıń shama menen 1 litrge 10^{-7} moli sáykes keledi. Bunday jaǵdayda 1 sm³ suwdı shama menen $6 \cdot 10^{12}$ dana H^+ ionlarınıń hám tap sonday shamadaǵı OH^- gidroksildiń ionlarınıń bar bolatuǵınlıǵın ańsat esaplap shıǵarıwǵa boladı.

Elektroximiyada hár qıylı eritpelerdegi H^+ ionlarınıń koncentraciyaların anıqlaw áhmiyetli orındı iyeleydi. 1 litrdegi mollerde ańǵartılatuǵın bul koncentraciya $[H^+]$ arqalı belgilenedi. Usı $[H^+]$ shamasınan alınǵan onlıq logarifmde pH simbolınıń járdeminde belgilenedi:

$$pH = \lg[H^+].$$

Suw ushın $[H^+] = 10^{-7}$ hám, usıǵan sáykes, $pH = -\lg 10^{-7} = 7$. $pH < 7$ teńsizligi orınlanatuǵın ortalıqtı ashshı, al, $pH > 7$ teńsizligi orınlanatuǵın ortalıqlardı siltili dep ataydı.

§ 177. Eritpedegi ionlardıń energiyası. Potenciallardıń kontaktlıq ayırması qubılısın qarap, biz elektronlardıń metaldıń ishinde sırtındaǵı erki elektrongá salıstırǵanda kishi potenciallıq energiyaǵa iye bolatuǵınlıǵın kórdik. Metaldan elektrondı ayırıp alıw ushın belgili bir jumıstıń isleniwi kerek. Tap sol sıyaqlı, eritpeniń ishindegi ion bazı bir belgili potenciallıq energiyaǵa iye boladı. Eritpedegi ionnıń energiyası haqqındaǵı mäseleni biz dáslep makroskopiyalıq kóz-qarastan qaraymız. Biz boslıqta jaylasqan radiusı r bolǵan q shamasındaǵı zaryad penen zaryadlanǵan sharǵa iyemiz dep boljayıq. Onıń energiyasın mınaǵan teń (138-paragrafqa qarańız):

$$E_p = \frac{q^2}{2r}.$$

Dielektriklik turaqlısı ϵ ge teń bolǵan dielektriktiń ishinde ornılastırılǵan tap sonday shar

$$E'_p = \frac{q^2}{2\epsilon r} \quad (1)$$

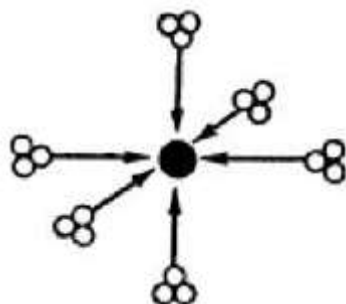
energiyasına iye boladı.

Eger eritpedegi iondı dielektrik ortalıqqa jaylastırılǵan zaryadı q ǵa teń bolǵan tap sonday shar dep qarasaq, onda onıń potenciallıq energiyası (1)-formula menen ańǵartıladı. Bul iondı eritpeden boslıqqa alıp shıǵıw ushın potenciallıq energiyalardıń ayırmasına teń bolǵan jumıstı islew kerek:

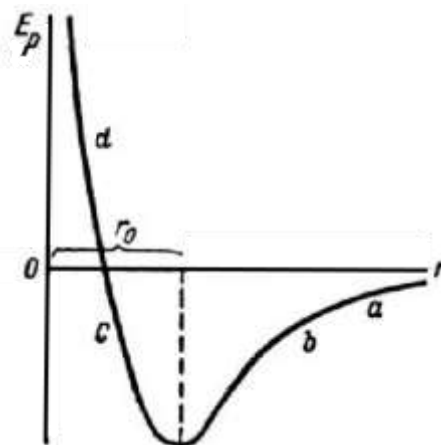
$$A = E_p - E'_p = \frac{q^2}{2r} \left(1 - \frac{1}{\epsilon}\right). \quad (2)$$

Ionnıń radiusı shama menen $2 \cdot 10^{-8}$ sm ge teń dep esaplap, A jumısınıń juwıq túrde 3 ev shamasına teń ekenligine kóz jetkeremiz.

Eritpedegi ionnıń energiyasın dálirek anıqlaw ushın onıń ózin qorshap turǵan molekular menen óz-ara tásirlesiwın qaraw kerek.



143-súwret. Ionı qorshap turǵan suw molekuları.



144-súwret. E_p potenciallıq energiyanıń r qashıqlıǵınan ǵárezligi.

Eritkish sıpatında eń kóp ushırasatúǵın suw polyar úsh atomlı molekulalardan turadı. Basqalardan alısta turǵan iondı alamız hám oǵan simmetriyalı túrde altı tárepten suwdıń neytral atomın jaqınlastıramız (143-súwret). Elektr maydanınıń tásirinde ionnıń zaryadınıń belgisinen ǵárezsiz oǵan suwdıń polyar molekulaları tartıladı. Sebebi olar barlıq waqıtta ionnıń zaryadına óziniń qarama-qarsı belgige iye zaryadı menen burıladı. Ion menen molekulanıń bir biri menen tásirlesiwine sáykes keletuǵın potenciallıq energiyanıń shaması molekulalardıń ionlarǵa jaqınlasıwı menen kemeyedi hám 144-súwrettegi *db* iymekliginiń tómenge qaraǵan bólimi menen kórsetiledi. Polyar molekulalar menen ionnıń arasındadı qashıqlıq *r* kishi bolǵanda tartısıw kúshi iyterisiw kúshi menen almasadı hám potenciallıq energiyanıń shaması úlkeye baslaydı (144-súwrettegi *cd* iymekliginiń bir bólimi). Ion menen molekulanıń arasındadı qashıqlıqtıń belgili bolǵan mánisine potenciallıq energiyanıń minimumı hám ionnıń dógeresindegi molekulalardıń ornıqlı awhalı sáykes keledi. Ionǵa altı molekulanı jaqınlastırıwdıń ornına onıń átirapında qalınlıǵı eki-úsh molekulanıń sıızqlı ólshemlerindey bolǵan qabıqtıń payda bolıwı ushın jetkilikli bolǵan molekulalardıń altı gruppasın jaqınlastırıwǵa boladı. Bunday jaǵdaydadı potenciallıq energiyanıń iymekligi de 144-súwrette kórsetilgen, biraq tereńirek minimumlı iymekliktey boladı. Molekulalardı bunnan keyin de qosıw potenciallıq iymeklikte kúshli ózgertpeydi, sebebi ionnıń dógeresindegi maydannıń kernewligi qashıqlıqqa baylanıslı tez kemeyedi. Jetkilikli sandadı molekulalardı qosıw jolı menen biz suyıqlıqtıń ishinde tamshını alamız. Solay etip, iondı eritpege kirgizgendegi energiyasınıń ózgerisi 144-súwrette kórsetilgen potenciallıq energiyanıń iymekliginiń tereńligi menen beriledi. Eritkishtiń ishindegi ionnıń potenciallıq energiyasın (1)-formulanıń járdeminde kórsetiwge boladı. Tek ǵana ϵ niń mánisi eritkishtiń makroskopiyalıq jollar menen anıqlanǵan dielektriklik turaqlıasınıń mánisinen bir qansha ózgeshe boladı.

Júdá ázzi eritkishte ionlardıń óz-ara tásirlesiwine esapqa alıwdıń keregi bolmaydı (bizler onı esapqa almadıq). Hár bir ion eritkishtiń qońsılas molekulaları menen ǵana tásirlesedi. Nátiyjede ion menen eritkishtiń molekulalarınıń arasındadı óz-ara tásirlesiwdiń saldarınan solvat dep atalatuǵın kompleks payda boladı hám bunday kompleksler taza eritkishte qozǵaladı.

Júdá ázzi bolmaǵan eritpelerde ionlardıń óz-ara tásirlesiwine esapqa alıw kerek. Barlıq ionlar san mánisi boyınsha birdey zaryadlarǵa iye dep boljayıq. Belgili bir iondı qarayıq. Onıń menen onnan r_i qashıqlıǵında jaylasqan ion menen tásirlesiwge sáykes keletuǵın potenciallıq energiya $q_i^2/\epsilon r_i$ shamasına teń. Eger ionlardıń ekewiniń belgileri birdey bolsa, onda potenciallıq energiyanıń belgisi onı, al ionlardıń zaryadları hár qıylı belgilerge iye bolsa, onda potenciallıq energiyanıń mánisi teris. Bir ionnıń onı qorshap turǵan barlıq ionlar menen óz-ara tásirlesiwine sáykes keletuǵın potenciallıq energiya $q_i \sum \frac{q_l}{\epsilon r_{li}}$ shamasına teń. Hár qıylı belgige iye bolǵan q_i zaryadları bar bolǵan jaǵdayda bul summanıń aǵzaları da hár qıylı belgilerge iye boladı hám summanıń shaması úlken bolmaydı. Eger berilgen ionnıń átirapında birdey sandadı onı hám teris ionlar bar bolsa, onda potenciallıq energiyanıń shaması nolge teń bolǵan hám olar bir birinen ortasha birdey qashıqlıqlarda jaylasqan bolar edi. Bunday jaǵdayda ionnıń potenciallıq energiyası onıń átirapında basqa ionlar bolmaǵan jaǵdaydadı mánislerge iye boladı. Biraq, shın mánisinde basqasharaq jaǵday orın aladı. Jıllılıq qozǵalıslarınıń saldarınan hár bir ion eritpeniń ózin qorshaǵan molekulaları menen soqlıǵıadı hám, geypara jaǵdaylarda basqa ionlarǵa jaqınlasadı. Zaryadları birdey belgige iye bolǵan ionlardıń iyterisiwi olardıń jaqınlasıwına qarsılıq jasaydı, al belgileri hár qıylı bolǵan ionlardıń arasındadı tartılıs kúshleri olardıń bir biri menen jaqınlasıwına alıp keledi. Usınıń saldarınan onı ionǵa jaqın orınlarda teris ionlar, al teris ionlardıń átirapında onı ionlar jaylasadı. Hár bir ion qarama-qarsı belgige iye bolǵan ionlardıń bultı menen qorshalǵanday awhalda boladı.

Ionlıq kristallardıń pánjeresinde (misalı as duzi kristallında) hám bir onı ion altı teris ion, al hár bir teris ion altı onı ion menen qorshalǵan. Solay etip, eritpedegi ionlardıń tarqalıwı suyıqlıqtaǵı neytral atomlardıń tarqalıwı menen kristallıq pánjeredegi ionlardıń tártiplesken tarqalıwınıń aralıǵında boladı. Bunnan eritpedegi ionlardıń jıynaǵınıń ionlıq kristallıq pánjeredegi jaǵdayǵa uqsas energiyanıń zapasına iye bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Demek, basqa da ionları bar eritpeden iondı alıp shıǵıw ushın islengen jumıstıń shaması taza eritpeden sol iondı alıp shıǵıw ushın islengen jumıstan úlken boladı. Biraq bul qosımsha jumıstıń shaması (2)-formulanıń járdeminde alınatuǵın energiyanıń shamasınan júdá úlken emes.

Ionnıń qorshaǵan ortalıq penen tásirlesiw kúshleri tek elektrostatalıq xarakterge iye bolmaydı. Bul jaǵday hár qıylı zatlardıń arasındadı (misalı, eki metaldıń arasındadı yamasa metall menen elektrolittiń arasındadı) potenciallardıń sekiriwlerin anıqlaǵanda júdá abaylı bolıwdı talap etedi. Misalı, eger biz metall menen elektrolittiń arasındadı bir ret metaldan elektrolitke bir elektrondı, ekinshi ret iondı alıp ótkendegi

potencialdın sekiriwin anıqlaytuǵın bolsaq, onda potencialdın sekiriwi ushın hár qıylı mánislerdi alamız. Bir birlik zaryadtı bir noqattan ekinshi noqatqa kóshirgende elektrostatikalıq potenciallardıń ayırmasın jumıstıń anlatpası boyınsha tek qorshaǵan ortalıq penen elektrostatikalıq tásirlesiw kúshlerinen basqa hesh qanday kúshler menen tásir etpeytuǵın bir birlik ideal noqatlıq zaryadtı kóshirgen jaǵday ushın ǵana anıqlanıwı múmkin. Qanday da bir haqıyqıy zaryadtı kóshirgende (elektrondı, iondı) elektrostatikalıq óz-ara tásirlesiw kúshleri menen bir qatarda alıp ótiletuǵın bólekshelerdiń áwladına hám bir biri menen shegaralasatuǵın zatlardıń túrlerine baylanıslı kúshlirek yamasa ázzirek kúshlerdiń de payda bolıwı múmkin (mısalı, kvantlıq mexanikada qaratıluǵın "almasıw kúshleri"). Bunday jaǵdayda haqıyqıy zaryadlangan bóleksheniń ornın almasıwda islengen jumıstıń shaması boyınsha potenciallar ayırmasınıń shamasın anıqlaw tek potencialları anıqlanatuǵın eki noqat bir ortalıqta jaylasqan jaǵdayda ǵana ámelge asırıladı. Eger noqatlar hár qıylı ortalıqlarda jatqan bolsa, qanday bóleksheniń ornın almasıwı boyınsha baylanıslı hár qıylı mánislerdiń alınıwı múmkin.

§ 178. Elektrolitlik ótkizgishlik teoriyası. Sırtqı elektr maydanı bolmaǵan jaǵdayda elektrolitte ionlar jıllılıq qozǵalıslarına qatnasadı hám usıǵan baylanıslı, qosındı toqtıń shaması nolge teń. Maydan bar bolǵan jaǵdayda oń ionlar u_+ qosımsha tezligine, al teris ionlar oǵan qarama-qarsı baǵıtta u_- qosımsha tezligine iye boladı. Tártipsiz bolǵan jıllılıq qozǵalıslarına ionlardıń kóshirmeli tezligi qosıladı hám eritpede belgili baǵıttaǵı zaryadlardıń alıp júriwı, yaǵnıy elektr toǵı payda boladı.

Metallardıń elektr ótkizgishligin qaraǵanımda (161-paragraf) bizler elektronga maydannıń onıń erkin júriw jolınıń uzınlıǵındaǵı tásin qaradıq. Usınıń menen birge biz metaldıń kristallıq pánjeresiniń tulǵasın payda etetuǵın ionlar menen soqlıǵısqanda sırtqı maydannıń tásirinde alınatuǵın qosımsha tezlikti tolıq joǵaltadı dep esapladıq. Al elektrolittegi ionlardıń qozǵalısların biz makroskopiyalıq jaqtan qaraymız; biz elektrolittegi ionǵa eki kúsh tásir etedi dep esaplaymız: birinshisi elektrlik qE kúshi (q arqalı ionnıń zaryadı, E arqalı elektr maydanınıń kernewligi belgilengen) hám ortalıqtıń qarsılıq kúshi. Bunday kóz-qarastıń durıs ekenligi ionlardıń elektronlarǵa salıstırǵanda iri hám eritkishtiń molekulaları menen tıǵız qorshalǵanlıǵı menen dálillenedi. Kópshilik jaǵdaylarda ionlarǵa "neytral molekulalar jabısqan", sonlıqtan sırtqı E maydanınıń tásirinde solvat dep atalatuǵın tolıq kompleks qozǵaladı.

Ionlardıń qozǵalıslarınıń tezliklerinde súykeli kúshleriniń shaması tezlikke proporcional hám sol súykeli kúshleriniń baǵıtı ionnıń qozǵalıw baǵıtına qarama-qarsı dep esaplawǵa boladı. Solay etip, oń ionǵa tásir etetuǵın súykeli kúshin $-k_+u_+$ shamasına teń dep esaplawǵa boladı, bul jerde k_+ arqalı súykeli koefficienti belgilengen. Oń ionnıń massasın m_+ arqalı, al onıń tezleniwini ω_+ arqalı belgilep oń ionnıń baǵıtlangan qozǵalısların ushın mınaday túrdegi teńleme jaza alamız:

$$m_+\omega_+ = qE - k_+u_+. \quad (1)$$

Bul teńleme kishi tezliklerde qE elektr kúshleriniń úlken orındı iyeletuǵınlıǵın, solardıń tásirinde ionnıń u_+ tezliginiń úlkeyetuǵınlıǵın kórsetedi. Biraq, u_+ tezliginiń úlkeyiwini menen k_+u_+ súykeli kúshi de úlkeyedi hám waqıttıń bazı bir momentinde (1)-teńliktiń oń tárepi nolge teń bolatuǵın shamaǵa jetedi:

$$qE - k_+u_+ = 0;$$

bunday jaǵdayda ω_+ tezleniwini de nolge aylanadı hám tezlik

$$u_+ = \frac{qE}{k_+} \quad (2)$$

shamasına teń turaqlı mániske iye boladı.

Bunnan biz ionnıń qalıplesken baǵıtlangan qozǵalıslarınıń tezligi bolǵan u_+ shamasınıń elektr maydanınıń kernewligi E ge tuwrı proporcional ekenligin kóremiz.

Tap sonday qatnastı teris ionnıń tezligi u_- ushın da alamız:

$$u_- = \frac{qE}{k_-}. \quad (2a)$$

Bul teńlikte k_- — teris ion ushın súykelis koefficienti.

Elektrolittegi toq eki belgige iye ionlardıń qozǵalısanın payda boladı; hár bir belgige iye bolǵan ionlardıń kólem birligindegi sanı an_0 ; demek, oń ionlardıń maydannıń baǵıtında, al teris ionlardıń maydanǵa qarama-qarsı baǵıttaǵı qozǵalıslarınan payda bolǵan toqlardıń qosındısı mınaǵan teń:

$$i = i_+ + i_- = qan_0u_+ + qan_0u_- = qan_0(u_+ + u_-). \quad (3)$$

Bul teńlikte q arqalı ionlardıń hár qaysısı tárepinen alıp júritetuǵın zaryad belgilengen.

η ekvivalent koncentraciya dep eritpeniń kóleminiń bir birligine sáykes keletuǵın erigen zattır gramm-ekvivalentiniń sanın ataymız. Bunday jaǵdayda $\eta = \frac{n_0}{N'}$. Bul qatnasta n_0 - bir birlik kólemdegi erigen zattır molekularınıń sanı, al N' - gramm-ekvivalenttegi molekularlardıń sanı. qn_0 kóbeymesin N' shamasına kóbeytip hám bólip, $qn_0 = qN' \cdot \frac{n_0}{N'}$ teńligine iye bolamız. Biraq, ayılǵanlar boyınsha, $\frac{n_0}{N'} = \eta$, al $qN' = F$. Bul teńlikte F - Faradey sanı. Bunnan

$$qn_0 = \eta F$$

teńligine iye bolamız. qn_0 dıń tul mánisin (3)-ańlatpaǵa qoyıp

$$i = F\eta\alpha(u_+ + u_-)$$

teńligin yamasa bul ańlatpaǵa ionlardıń u_+ hám u_- tezlikleriniń ornına olardıń (2)- hám (2a)- teńlikleri boyınsha mánislerin qoysaq

$$i = F\eta\alpha\left(\frac{q}{k_+} + \frac{q}{k_-}\right)E \quad (4)$$

formulasına iye bolamız.

Maydannıń kernewligi $E = 1$ bolǵan jaǵday ushın san mánisi boyınsha ionlardıń tezliklerine tań bolǵan q/k_+ hám q/k_- qatnasları *ionlardıń qozǵalǵıshlıǵı* dep ataladı. Olardı u_+^0 hám u_-^0 arqalı belgileybiz. Bunday jaǵdayda (4)-teńlikti bılayınsha kóshirip jazıwǵa boladı:

$$i = F\eta\alpha(u_+^0 + u_-^0)E. \quad (4a)$$

Berilgen eritpe ushın $F\eta\alpha(u_+^0 + u_-^0)$ shaması turaqlı. Om nızamı boyınsha toqtır tıǵızlıǵı $i = \sigma E$ shamasına teń bolǵanlıqtan, (4a) teńligi elektrolitlik ótkizgishlik ushın Om nızamın ańǵartadı. Elektrolit ushın elektr ótkizgishlik koefficientiniń mánisi

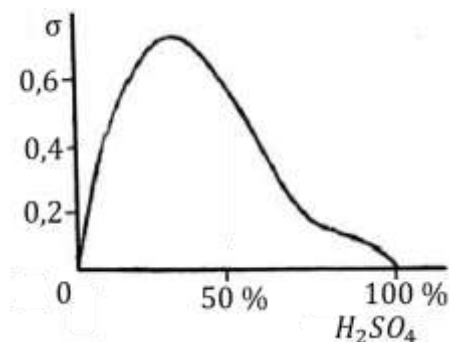
$$\sigma = F\eta\alpha(u_+^0 + u_-^0) \quad (5)$$

shamasına teń bolıp shıǵadı. (5)-qatnas elektrolittiń elektr ótkizgishliginiń dissociaciya koefficienti α ǵa hám ionlardıń qozǵalılılıqlarınıń qosındısı bolǵan $(u_+^0 + u_-^0)$ shamasına proporcional eken.

Dissociaciya koefficienti α eritpeniń koncentraciyasınan ǵárezli. Sonlıqtan, (5)-formula menen ańǵartılatuǵın α nıń η dan ǵárezligi quramalı xarakterge iye boladı. Taza eritkish ushın elektr ótkizgishlik nolge teń ($\sigma = 0$), sebebi koncentraciya η nolge teń. Bunnan keyin, η nıń úlkeyiwi menen elektr ótkizgishlik úlkeyedi hám bazı bir maksimumǵa jetedi. Koncentraciya úlken eritpeler ushın σ qaytadan kishireyedi, sebebi dissociaciya dárejesi α kishireyedi. 145-súwrette σ nıń kúirt kislotasınıń suwdaǵı eritpesiniń koncentraciyasınan ǵárezligi keltirilgen.

145-súwret.

Kúirt kislotasınıń suwdaǵı eritpesi ushın elektr ótkizgishlik σ nıń eritpeniń koncentraciyasınan ǵárezligi.



σ/η shaması *ekvivalent elektr ótkizgishlik* dep ataladı. Onı Λ arqalı ańlatamız. Bunday jaǵdayda (5)-ańlatpa boyınsha

$$\Lambda = F\alpha(u_+^0 + u_-^0). \quad (6)$$

teńligine iye bolamız. Faradey sanı F turaqlı shama bolıp tabıladı, berilgen elektrolit ushın ionlardıń qozǵalgıshlarınń qosındısı bolǵan $u_+^0 + u_-^0$ shaması da turaqlı shama. Sonlıqtan, (6)-formula boyınsha

$$\Lambda = C\alpha. \quad (6a)$$

teńligine alamız. Bul teńlikte C - turaqlı san. Solay etip, ekvivalent elektr ótkizgishlik dissociaciya koefficienti α ǵa proporcional. Júdá ázzi eritpe ushın $\alpha = 1$ hám bunday jaǵdayda $\Lambda = C$, yaǵnıy júdá ázzi eritpe ushın ekvivalent elektr ótkizgishlik koncentraciyadan ǵárezli bolmay qaladı. Ekvivalent elektr ótkizgishliktiń bul turaqlı mánisin Λ_∞ arqalı belgileymiz. Bunday jaǵdayda (6a) formuladan

$$\alpha = \frac{\Lambda}{\Lambda_\infty}$$

qatnasına iye bolamız. Bunnan dissociaciya koefficienti α nıń berilgen koncentraciyadaǵı hám júdá ázzi koncentraciyadaǵı ekvivalent elektr ótkizgishliklerdiń qatnası boyınsha anıqlanatuǵınlıǵı kelip shıǵadı.

Λ_∞ shamasınıń mánisi ionlardıń qozǵalmalılıqlarınıń qosındısı menen tikkeley baylanıslı. Haqıyqatında da, (6)-teńlemeden

$$\Lambda_\infty = F(u_+^0 + u_-^0)$$

teńligin alamız. Bunnan júdá ázzi koncentraciyadaǵı ekvivalent koncentracıyanı anıqlap ionlardıń qozǵalmalılıqlarınıń qosındısı tabıwǵa boladı.

Ionlardıń qozǵalmalılıqlarınıń ózlerin anıqlaw ushın u_+^0/u_-^0 qatnasın da anıqlaw jetkilikli. Bul qatnastı tómendegidey esaplawdıń járdeminde anıqlawǵa boladı. Kólem birligindegi hár bir belgige iye ionlardıń sanı n_0 di elektrolittiń barlıq bólimleri ushın birdey dep esapladıq. Biraq, ionlardıń hár qıylı qozǵalmalılıqlarınıń bolıwınan olardıń sanı katodtıń qasında hám anodtıń qasında waqıttıń ótiwi menen ózgeredi.

Meyli, dissociaciya tolıq bolatuǵınday dárejede ($\alpha = 1$) eritpe sonshama ázzi bolsın. Bunday jaǵdayda kólem birligindegi jup ionlardıń sanı n'_0 kólem birligindegi erigen zattıń molekularınıń sanı n_0 ge teń. Bunday jaǵdayda katodtıń qasında kólem birliginde n_0 oń ion boldı (hám sonshama teris ionlar boldı). Toqtıń ótiwi menen oń ionlar katodqa kele baslaydı, al teris ionlar onnan kete baslaydı. Katodqa jańadan kelip atırǵan oń ionlar onda bólinip shıǵadı hám olardı esapqa alıwdıń keregi bolmaydı. Al teris zaryadlangan ionlarǵa kelsek, onda t waqıtınıń ishinde katodqa tiyip turǵan kólemniń hár bir birliginen $n_0 u_- t$ dana ion ketedi. Usınıń saldarınan tap sonshama oń ionlar juptıń ishine kirmey qaladı hám katodta bólinip shıǵadı.

Solay etip, t waqıtınıń ishinde katodtıń qasındaǵı ionlardıń juplarınıń sanı $n_0 u_- t$ shamasına kishireydi hám

$$n_{0t}^{(K)} = n_0 - n_0 u_- t = n_0 (1 - u_- t)$$

shamasına teń boladı. Demek, t waqıtı ishinde katodtıń qasındaǵı ionlardıń juplarınıń sanı mınaday qatnasta ózgeredi:

$$\frac{n_{0t}^{(K)}}{n_0} = 1 - u_- t. \quad (7)$$

Tap usınday jollar menen t waqıtınıń ishinde anodtıń qasındaǵı ionlardıń jupları mınaday qatnasta ózgeriske ushıraydı

$$\frac{n_{0t}^{(A)}}{n_0} = 1 - u_+ t. \quad (7a)$$

Biziń boljawımız boyınsha dissociaciya tolıq, sonlıqtan kólem birligindegi ionlardıń jubınıń sanı kólem birligindegi erigen molekularlardıń sanına teń, al bul san ekvivalent koncentraciya η ǵa teń. Bunnan (7)-teńlik boyınsha

$$\frac{\eta_t^{(K)}}{\eta_0} = 1 - u_- t \quad (8)$$

teńligine iye bolamız. Bul teńlikte $\eta_t^{(K)}$ arqalı elektroliz baslanǵannan keyin t waqıt ótkennen keyingi katodtıń qasındaǵı ekvivalentlik koncentracıyanıń mánisi, al η_0 arqalı ekvivalentlik koncentracıyanıń baslanǵısh mánisi. Sonıń menen bir qatarda (7a) dan

$$\frac{\eta_t^{(A)}}{\eta_0} = 1 - u_+ t \quad (8a)$$

teńligi kelip shıǵadı. Bul teńlikte $\eta_t^{(A)}$ — elektroliz baslanǵannan t waqıt ótkennen keyingi anodtıń qasındaǵı ekvivalentlik koncentracıyanıń mánisi.

(8)- hám (8a)-qatnaslarınan mınanı alamız

$$\frac{u_+}{u_-} = \frac{\eta_0 - \eta_t^{(A)}}{\eta_0 - \eta_t^{(K)}}$$

Ionlardıń qozǵalǵıshlıqları u_+^0 hám u_-^0 olardıń tezliklerine propoprional, sonlıqtan

$$\frac{u_+}{u_-} = \frac{\eta_0 - \eta_t^{(A)}}{\eta_0 - \eta_t^{(K)}} \quad (9)$$

qatnasına iye bolamız. (9)-teńlikten elektrolizdiń saldarınan elektrodlardıń qasındaǵı eritpelerdiń koncentracıyasınıń tómenlew dárejesin izertlep, ionlardıń qozǵalǵıshlıqlarınıń qatnasların tabıwǵa boladı eken. (5)- hám (9)-formulalardı paydalanıp, ionlardıń qozǵalǵıshlıqlarınıń ózleriniń mánislerin de tabıwǵa boladı.

Bazı bir ionlar ushın u_+^0 hám u_-^0 qozǵalǵıshlıqlarınıń mánisleri VII kestede keltirilgen.

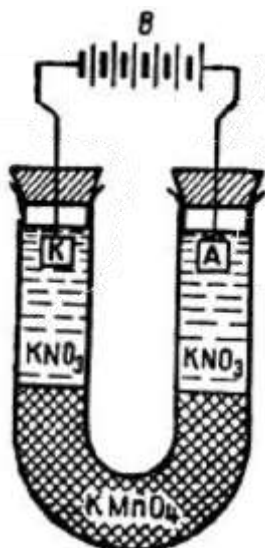
VII kestede keltirilgen maǵlıwmatlardan maydannıń kernewliginiń jetisiw múmkin bolǵan mánislerinde (E niń shaması 1 sm de bir neshe volt) ionlardıń tezlikleriniń júdá kishi ekenligi hám bir sekundaǵı santimetrdiń bir neshe mırnan birinen aspaytuǵınlıǵı kórinip tur. Koncentracıyalanǵan eritpelerdegi ionlardıń qozǵalǵıshlıǵınıń suyıq eritpelelerdege salıstırǵanda kishi. Koncentracıyalanǵan eritpelerdegi sırtqı maydanǵa salıstırǵanda basqa ionlardıń payda etken maydanların esapqa almawǵa bolmaydı.

VII keste

Ionlardıń qozǵalǵıshlıqları
($\text{cm}^2/\text{sek} \cdot V$ lerdegi)

Ionlar	u^0
<i>H</i>	0,003263
<i>K</i>	0,000669
<i>Na</i>	0,000450
<i>OH</i>	0,001802
<i>Cl</i>	0,000677
<i>NO₃</i>	0,000639

Ionlardıń qozǵalısların boyalǵan eritpelerdi payda etetuǵın ionlardı paydalanıw jolı menen tikkeley baqlawǵa boladı. *K* hám *A* arqalı belgilengen platina elektrodları ornastırılǵan *U*-tárizli trubkaǵa birdey bolǵan tıǵızlıqtaǵı hár qıylı bolǵan eki eritpeni quyadi: tómenine intensivli fiolet reńge iye kaliy permanganatı ($KMnO_4$), al joqarısına reńsiz kaliy nitratı (KNO_3) eritpesi. Trubka arqalı toq ótkerilgende MnO_4 ionınıń boyalǵan eritpesiniń shegarası anodqa qaray sezilerliktey jılısadı.



146-súwret.

Ionlardıń qozǵalǵıshlıǵın úyreniwdiń usılı.

§ 179. Elektrodlardıń polarizaciyası. Qanday da bir elektrolitke birdey bolǵan eki metall elektrod túsirilgen bolsın (mısalı, mıs kuporosınıń suwdaǵı eritpesine eki platina elektrod túsirilgen). Bunday kombinacıyanıń nolden ózgeshe bolǵan e.q.kúshin bermeytuǵınlıǵın biz joqarıda ayttıq; nolge teń bolmaǵan e.q.kúshi elektrodqa *hár qıylı* bolǵan birinshi áwlad ótkizgishlerin salǵanda orın aladı.

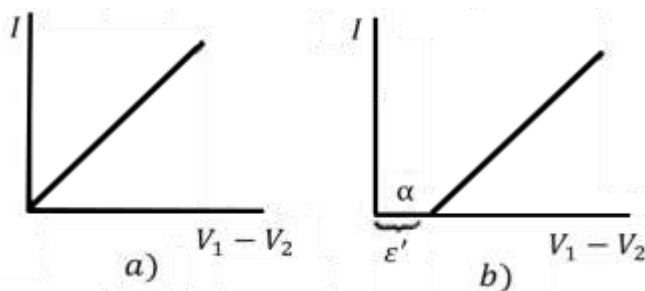
Biraq, biz platina elektrodlar orналаstırılǵan mıs kuporosınıń eritpesinen toq ótkeremiz. Onıń ushın elektrodlardı e.q.kúshiniń qanday da bir sırtqı deregine, mısalı, galvanikalıq elementke tutastırıwımız kerek. Bunday jaǵdayda katodtıń xızmetin atqaratuǵın plastinka elektrodta mıs, al anodta bolsa SO_4^{--} ionları bólinip shıǵadı; bul ion suw menen ximiyalıq reaksiyaǵa kirisedi hám usı reaksiyanıń saldarınan kúkert kislotası (H_2SO_4) payda boladı hám elektrodtıń qasında kislorod bólinip shıǵadı.

Nátıyjede elektrodlardıń simmetriyası buzıladı: olardıń biri mıstıń qatlamı, al ekinshisi kislorod plenkası menen qaplangan bolıp shıǵadı. Endi eritpegen batırılǵan elektrodlar birdey bolmaydı hám óziniń e.q.kúshine iye bolǵan galvanikalıq elementti payda etedi. Bunday elemnetti *polyarizaciyalanǵan element* dep ataydı.

Eger onı sırtqı derekten ajıratsaq hám qanday da bir qarsılıq penen tuyıqlasaq, onda jańadan payda bolǵan element toqtı beredi. Keri tártipte ótetuǵın ximiyalıq reaksiyalardıń saldarınan elektrodlardıń simmetriyası tiklengenshe (yaǵnıy element razrayadlangansha) toqtıń ótiwi dawam etedi.

Elektrodlardıń materialları birdey bolǵan jaǵdayda eritpelerdiń elektroliziniń saldarınan dáslepki simmetriyanıń buzılıwı barlıq waqıtta da orın aladı. Bunday jaǵdaydaǵı elektrodlardıń ózgerisin *elektrodlardıń polarizaciyası*, al payda bolǵan e.q.kúshin *polyarizaciyalıq e.q.kúshi* dep ataydı. Haqıyqatında, polarizaciya barlıq waqıtta joqarıda kórsetilgendey bolıp qaytımlı túrde óte bermeydi: elementtiń razryadınan keyin dáslepki haldıń tolıq qayta tiklenbegen bolıwı múmkin.

Polyarizaciyalıq e.q.kúshiniń bar bolıwı bir qatar áhmiyetli juwmaqlarǵa alıp keledi.



147-súwret.

I toq kúshiniń potentsiallar ayırmasınan gárezligi: a – birinshi áwlad ótkizgishi ushın, b – ekinshi áwlad ótkizgishi ushın (elektrolit ushın).

Birinshiden, biz elektrolitler ushın Om nızamın qanday túrde paydalanıwǵa bolatuǵınlıǵı haqqındaǵı máseleni qaray alamız.

Birinshi áwlad ótkizgishi arqalı I toǵı ótkende ótkizgishtiń ushlarındaǵı $V_1 - V_2$ potentsiallar ayırması hám onıń qarsılıǵı R Om nızamı boyınsha bılayınsha baylanısqa:

$$I = \frac{V_1 - V_2}{R}. \quad (1)$$

Sonlıqtan, toq kúshiniń potentsiallar ayırmasınan gárezligi grafikte koordinatalardıń basınan ótetuǵın tuwrınıń járdeminde súwretlenedi (147a súwret).

Elektrolit arqalı toq ótkende elektrodlardıń arasındaǵı potentsiallar ayırması $V_1 - V_2$ (bizler olardı birdey zattan islengen dep boljaymız) tek birinshi momentte IR kóbeymesine teń boladı, elektrodlardıń polarizaciyasınıń nátiyjesinde bazı bir waqıt ótkennen keyin burınǵı I toǵın uslap turıw ushın

$$V_1 - V_2 = IR + \varepsilon' \quad (2)$$

potentsiallar ayırmasın túsiriwge tuwrı keledi. Usı jaǵdayǵa sáykes, I toq kúshiniń $V_1 - V_2$ potentsiallar ayırmasınan gárezligi

$$I = \frac{V_1 - V_2}{R} = \frac{\varepsilon'}{R} \quad (3)$$

qatnasınıń járdeminde beriledi, yaǵnıy bul gárezlik (1)-Om nızamındaǵıday koordinata bası arqalı ótetuǵın emes, al abscissa kósherin koordinatası ε' shamasına teń bolǵan noqat arqalı ótetuǵın tuwrı sızıqlıq járdeminde kórsetiledi (147b súwret).

(2)-teńlikke sáykes, elektrolit arqalı t waqıtı ishinde ótken toq

$$A = I(V_1 - V_2)t = I^2Rt + \varepsilon'It \quad (4)$$

jumısın isleydi. Biraq I^2Rt elektrolitte bólinip shıqqan jıllılıq Q bolıp tabıladı. Bunnan

$$A = Q + \varepsilon'It \quad (5)$$

teńligin alamız, yaǵnıy jıllılıq ushın ketetuǵın Q jıllılıǵı menen bir *qatarda elektrolizde jáne $A' = \varepsilon'It$ shamasına teń qosımsha jumıs ta orınlanadı eken.*

Elektr toǵı elektrolittiń ıdırawına alıp kelmeydi. Eriytuǵın zat eriw processinde ionlarǵa dissociaciyalanadı. Toq ótkende tek elektrodtaǵı ionlardıń ajralıp shıǵıwı ǵana júzege keledi. Biraq, biz 164-paragrafta elektrolitke batırılǵan ótkizgish penen elektrolittiń arasında potentsiallar ayırmasınıń payda bolatuǵınlıǵın kórdik. Usınıń nátiyjesinde elektrolittiń qasındaǵı ionlarǵa elektr kúshleri tásir etedi. Elektrodta ajralıp shıǵıw ushın, ionlardıń bazı bir potentsiallıq barer arqalı ótiwi kerek. $A' = \varepsilon'It$ jumısı usı potentsiallıq barer arqalı ótiw ushın jumısaladı. Qarsılıq R diń shaması dım kishi etip alsa, onda Lenc-Djoullıq $Q = I^2Rt$ jıllılıǵınıń bólinip shıǵıwı ushın islenetuǵın jumıstıń shamasın qálegenshe kishi etip alıwǵa boladı (onıń ushın úlken elektrodlardı alıw hám olardı bir birine júdá jaqın jaylastırıw kerek). Biraq, A' jumısınan qashıp qutılıwǵa bolmaydı: onıń mánisi elektrolittiń quramı hám elektrodlar islengen zattan gárezli. Eger elektrodlardıń polarizaciya qaytımlı bolatuǵın bolsa, onda ε' shamasınıń mánisi polarizaciyalıq e.q.kúshiniń shamasınıń mánisine teń boladı. Biraq, kópshilik jaǵdaylarda onıń mánisi úlken. Elektrodta berilgen ionlardıń ajralıp shıǵıwı processiniń baslanıwı ushın "artıq kernewdiń" bolıwı kerek. Bul artıq kernewdiń mánisi volttıń bir neshe onnan birine jetedi. Mısalı,, kúkirt kislotasınıń suwdaǵı eritpesiniń elektroliziniń baslanıwı ushın elektrodtaǵı potentsiallar ayırmasınıń 1,22

voltke teń bolıwı talap etiledi; al, haqıyqatında, taza platina elektrodların paydalanǵanda (bul jaǵdayda suwdıń ıdırawına alıp keletuǵın) elektroliz processı tek 1,64 volt bolǵan jaǵdayda ǵana baslanadı.

Berilgen ionlardıń ajırılıp shıǵıwı baslanatuǵın elektrodlardıǵı potenciallar ayırması ajırılıp shıǵıwı potencialı dep ataladı. Hár qıylı ionlar ushın ajırılıp shıǵıwı potencialınıń hár qıylı bolıwı birdey belgige iye bolǵan ionlar bar eritpeden (mısalı, Cu^{+} hám Zn^{+} ionları) bir sorttaǵı ionlardı ajratıp alıwǵa múmkinshilik beredi. Bul jaǵday elektrolizdiń texnikalıq qollanılıwında taza metallardı alıw ushın áhmiyetli orındı iyeleydi.

Bul paragrafta qaralatuǵın elektrodlardıń polarizaciyasınan júzege keletuǵın ekinshi nátiyje galvanikalıq elementlerdiń e.q.kushiniń olardıń jumısı baslanǵannan keyingi tómennlewı bolıp tabıladı. Galvanikalıq elementti sırtqı qarsılıq penen tuyıqlaǵanda usı qarsılıq arqalı toq ótedi hám elektrolittiń ıdırawı orın aladı. Usınıń nátiyjesinde elektrodlar polarizaciyalanadı hám elementtiń eń dáslepki $\mathcal{E}$ e.q.kúshin kishireytetuǵın polarizaciyalıq e.q.kúshi payda boladı. Usınıń menen birge, elementte bolıp ótetuǵın ózgerisler onıń ishki qarsılıǵın arttıradı. Mısalı, elektrodlardıń birinde vodorodtıń kóbikleri payda bolǵanda elementtiń ishki qarsılıǵı kúshli úlkeyedi.

Polarizaciyalıq e.q.kúshiniń zıyanlı tásirinen qutılıw ushın galvanikalıq element aqırǵı esapta elektrodlardıń polarizaciyası bolmaytuǵın birinshi hám ekinshi áwlad ótkizgishleriniń kombinaciyasınan turıwı kerek. Daniel elementinde bul jaǵday mis hám cink plastinkalarınıń bir birinen ishinde geweklikler bar diywal menen ajratılǵan hár qıylı eritpelerde jaylastırıw jolı menen ámelge asırıladı (104-súwret). Usınıń nátiyjesinde, element jumıs islep turǵan waqıtta tek cink plastinkasınıń eriwi hám mıstıń mis plastinkasınıń ústine barıp otırıwı ǵana orın aladı. Al bunday ózgerisler plastinkalardıń ózlerinde ózgerislerdiń bolıwına alıp kelmeydi. Biraq, ishinde gewek orınlar bar diywal arqalı eritpelerdiń saplastırıw múmkin bolmaǵan diffuziyası Daniel elementiniń jumıs islew waqtın shekleydi hám onı ámeliy jaqtan utımlı emes dúziliske aylandıradı.

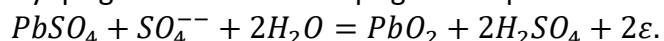
Leklanshe elementinde katodtıń qasında bólinip shıǵatuǵın vodorod marganec perekisi menen reakciyaǵa kirisedi. Usınıń saldarınan kómir elektrodtıń polarizaciyası orın almaydı.

Normal elementtiń salıstırmalı quramalı dúzilisi (167-paragraf), ondaǵı elektrodlar menen elektrolitlerdiń kombinaciyasında polarizaciya is júzinde orın almaydı. Normal elementtiń jumıs islewiniń barısında elektr qozǵawshı kúshi waqıttıń ótiwi menen ózgeriske ushıramaydı.

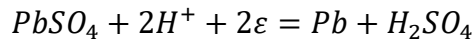
§ 180. Elektrolizdiń texnikalıq qollanılıwı. 1. Akkumulyatorlar. 179-paragrafta kórgenimizdey, toqtıń ótiwiniń saldarınan elektrolitke túsirilgen eki birdey metall elektrodtıń polarizaciyalanatuǵınlıǵın hám galvanikalıq elementti payda etetuǵınlıǵın kórdik. Payda bolǵan galvanikalıq elementtiń ózi bazı bir waqıttıń ishinde toqtıń deregi bolıp xızmet ete aladı. Solay etip, birdey bolǵan eki birinshi áwlad ótkizgishten hám ekinshi áwlad ótkizgishten (elektrolitten) sistemanı payda etiw jolı menen biz akkumulyatordı, yaǵnıy elektr energiyasın toplay alatuǵın ásbaptı ala alamız.

Biraq, akkumulyatordıń bahalı bolıp shıǵıwı ushın onıń eki shártti qanaatlandırıwı kerek: a) elektrodlardıń polarizaciyasınıń ornıqlı bolıwı kerek, b) akkumulyatorda bolıp ótetuǵın processlerdiń qaytımlı bolıwı kerek. Birinshi shárt toq alınbaǵan waqıtta akkumulyatordıń ózinen ózi razryadlanbawı ushın zárúrli; ekinshisi onıń bunnan bılay islewı ushın jaramsız bolıp qalıwına alıp keletuǵın ózgerislerdiń bolmawı ushın kerek.

Birinshi texnikalıq akkumulyator kúkert kislotasınıń (H_2SO_4) suwdıǵı eritpesindegi eki qorǵasın plastinkadan ibarat. Qorǵasın plastinkalar kúkert kislotası menen ximiyalıq reakciyaǵa kirisip, olardıń beti qorǵasın sulfatınıń ($PbSO_4$) qatlamaı menen qaplanadı. Akkumulyator arqalı sırtqı derekten toqtı ótkergende (*akkumulyatordıń zaryadlanıwı*) mına formula boyınsha SO_4^{--} teris ionları anodqa qaray qozǵaladı hám sulfattı qorǵasınıń perekisine aylandıradı:



Onı vodorod ionları katodqa qaray qozǵaladı hám



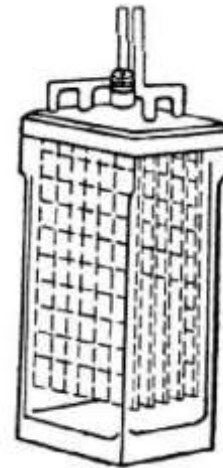
formulası boyınsha sulfattı qaytadan tikleydi.

Solay etip, elektrodlardıń arasındaǵı simmetriya buzıladı: birewi qorǵasınnan, al ekinshisi qorǵasınnıń perekisinen turadı. Bunday akkumulyator "zaryadlanǵan", ol toqtırń dereǵı bolıp xızmet ete alatuǵın galvanikalıq elementtiń xızmetin atqara aladı.

Sırtqı shınjırǵa "toq berip", *akkumulyator razryadlanadı*, ondaǵı processler kerı baǵıtta ótedi. Razryadlanıwdıń aqırında plastinkalardıń ekewi de qorǵasın sulfatınıń birdey qatlamı menen qaplanadı hám akkumulyatordıń e.q.kúshi nolǵe shekem tómeydi.

Biz joqarıda táriyiplegen akkumulyatordaǵı bolıp ótetuǵın ximiyalıq reakciyalar tek plastinkalardıń betlerin ǵana óz ishine alatuǵın bolǵanlıqtan, onda toplanǵan energiyanıń muǵdarı kóp emes hám sonlıqtan bunday akkumulyator utımlı emes. Akkumulyator tez razryadlanadı. *Akkumulyatordıń sıyımlıǵın*, yaǵnıy onda toplanǵan energiyanıń muǵdarın úlkeytiw ushın hár qıylı usıllar qollanıladı. Házirgi zaman qorǵasın akkumulyatorlarında (148-súwret) onı elektrodtıń beti bir neshe ret aldın-ala zaryadlaw hám razryadlaw jolı menen jumsartilǵan (qalıplestirilgen) qabırǵa tárizli qorǵasın plastinkasınan tıradı. Teris elektrod bólimleri qorǵasınnıń okisi pastası menen toltırılǵan tor túrine iye. Zaryadlaw processinde qorǵasınnıń okisi qorǵasınǵa ótedi. Bunday akkumulyatordıń e.q.kúshi dáslep 2,1 voltke shekem kóteriledi, keyin uzaq waqıt dawamında turaqlı bolıp qaladı hám zaryadlawdıń aqırında 2,7 voltke shekem tez kóteriledi. Bunnan keyin elektrodardaǵı ximiyalıq reakciyalar toqtaydı, olarda gaz kóbikleriniń kóp sandaǵı ajralıp shıǵıwı baslanadı: akkumulyatordı "qaynap atır" dep aytadı. Usınday jaǵdayda akkumulyatordı zaryadlawdı toqtatadı. Razryadlanıwda processler kerı baǵıtta ótedi: dáslep e.q.kúshiniń shaması 2,7 voltten 2,1 voltke shekem tez tómeydi hám bunnan keyin uzaq waqıt turaqlı bolıp qaladı. Razryadlanıwdıń aqırında e.q.kúshiniń shaması jáne tómeydi. Ádette razryadlanıwdı 1,85 voltten tómenge túsirmeydi, sebebi kúshli razryadlanıwdıń aqıbetinde qaytımlı bolmaǵan qorǵasın sulfatınıń payda bolıwı processı júredi. Usınıń nátiyjesinde akkumulyator buzıladı.

148-súwret.
Qorǵasın akkumulyator.



Akkumulyatordıń sıyımlıǵı dep onıń e.q.kúshiniń 2,7 voltten 1,85 voltke shekem kemeyiw barısındaǵı razryadlanıwında beretuǵın elektr zaryadlarınń muǵdarına aytadı. Bul sıyımlıq ádette *amper-saatlardı* ólshenedi (1 amper-saat = 3600 kulon).

Akkumulyatordıń paydalı tásir koefficienti dep onıń razryadlanıwında qaytıp beretuǵın energiyanıń muǵdarınıń zaryadlawda jumsalǵan energiyaǵa qatnasına teń. Házirgi waqıtlardaǵı qorǵasın akkumulyatorlarınń paydalı tásir koefficienti 80% ke jetedi³⁰.

³⁰ Házirgi waqıtları paydalanılıp atırǵan qorǵasın akkumulyatorlarınń paydalı tásir koefficientiniń shaması 80-90 (zaryadlaw-razryadlaw toǵı boyınsha procentke, al energiyası boyınsha 70-80 procentke

Texnikalıq talaplarǵa muwapıq, akkumulyatorlardı anaw yamasa mınaw ólshemlerdegi batareyalarǵa tutastıradı. Úlken akkumulyatorlardıń sıyımlıǵı júzlegen hám mıńlaǵan amper-saatlardıǵa, al e.q.kúshiniń shaması júzlegen voltke jetedi. Akkumulyatorlardıń texnikada qollanılıwınıń túrleri júdá kóp.

Házirgi waqıtları qorǵasınlı akkumulyatorlar menen bir qatarda siltili *temir-nikel akkumulatorları* da qollanıladı. Olardıń katodı bolıp ishinde mayda kuwıslıqları bar temir plastinka xızmet etedi. Anod nikel okisiniń gidratınan $[Ni(OH)_3]$ turadı. Siltiniń (KOH) eritpesi elektrolit bolıp tabıladı. Temir-nikel akkumulyatorlardıń e.q.kúshi $\mathcal{E} = 1,45$ v; olardıń paydalı tásir koefficienti qorǵasınlı akkumulyatorlardıń paydalı tasir koefficientinen kishi hám 60 procentten artpaydı. Biraq, olar qorǵasın akkumulatorlardan jeńil, olardı ekspluataciyalaw ańsat hám qısqa waqıtlardıń ishinde úlken toqlarǵa shıdam bere aladı (razryadka toqlarınıń úlken mánislerinde qorǵasın akkumulatorlar buzıladı).

2. Elektrometallurgiya. Metallurgiyada elektrolizdi hár qıylı maqsetlerde paydalanadı. Alyuminiy menen taza mıstı elektrolitlik alıw keń túrde tarqalǵan.

Rudanı balqıtqanda alınatuǵın mıs ádette kúirtli CuS hám Cu_2S birikpelerine iye boladı. Bunday mıstan anodlardı soǵadı, al elektrolit xızmetin kúirt kislotasınıń eritpesi atqaradı. Bunday jaǵdayda elektrolitte júdá taza mıs bólinip shıǵadı (bunday mıstı "elektrolitlik mıs" dep ataydı).

Házirgi zaman texnikasında paydalanılatuǵın alyuminiydi onıń balqıtılǵan duzlarınan tolıǵı menen elektrolizdiń járdeminde aladı. Elektrolit sıpatında balqıtılǵan ftorlı alyuminiydiń qos duzi hám glinozëm qosılǵan natriy xızmet etedi³¹. Elektrodlar sıpatında kómirden islengen plastinalardı qollanadı. Duz toq ótkende bólinip shıǵatuǵın jıllılıqtıń esabınan balqıǵan halda boladı. Alyuminiy shıǵaratuǵın zavodlar arzan elektr energiyasınıń derekleri bolǵan gidroelektrostanciyalardıń qasında jaylasadı. Alyuminiydiń duzlarınıń elektrolizi bolıp ótetuǵın vannalar arqalı onlaǵan mıń amper toqtı ótkeredi.

Elektrolitlik jollar menen magniy, natriy hám basqa da siltili metallar óndiriledi.

3. Galvanoplastika. 1837-jılı Peterburg ilimler akademiyasınıń akademigi B.S.YAkobi mıstan jasalǵan releflik juqa qatlamlı predmetlerdi alıw ushın birinshi bolıp elektrolizdi paydalandı; YAkobi tárepinen oylap atılǵan process galvanoplastinka atamasına iye boldı. Dáslep bul obekttiń mumnan yamasa basqa túrdegi plastik materialdan tayarlanǵan hám oǵan elektr ótkizgishlik qásiyetin payda etiw ushın grafit qatlamı menen qaplanǵan modelin tayarlap aladı. Bul model mıs kuporosınıń elektrolizindegi katodtıń xızmetin atqaradı. Al anod sıpatında mıs plastinka qollanıladı. Bunday jaǵdayda modelde qalıńlıǵı elektrolizdiń qansha waqıt dawam etkenligine ǵárezli bolǵan mıs plastinkası otıradı. Payda bolǵan planka keyin modelden ayırıp alınadı.

Elektrolizdi bir materialdan islengen predmettiń betine basqa materialdıń (metaldıń) qatlamın otırǵızıw ushın da paydalanıladı. Mısalı, elektrolitlik usıldıń járdeminde nikellew keńnen qollanıladı Galvanoplastika kitaplar menen basqa da baspa basılımlarındaǵı súwretlerdi payda etiw ushın klishe tayarlaw texnikasında úlken áhmiyetke iye.

4. Juqa izolyaciyalawshı betlerdi alıw. Alyuminiy katod sıpatında xızmet etetuǵın jaǵdayda bor siltisiniń eritpesindegi alyuminiy hám qorǵasın elektrodları arqalı toq ótedi. Eger alyuminiy anod bolsa, onda ol okistiń júdá juqa bolǵan qatlamı menen qaplanadı hám ótip atırǵan toqtıń shaması nolge shekem tómendeydi. Payda bolǵan plenca 40 V potencıallar ayırmasına tótepkı bere aladı.

Bunday izolyaciyalawshı plenkalardı alıwdıń múmkinshiligi ámelde eki baǵdarda

jetedi (Awdarıwshılar).

³¹ Kópshilik jaǵdaylarda alyuminiydi alıw ushın eń dáslepki shiyki zat sıpatında quramında 50 – 60% glinozëm bolǵan boksit (Al_2O_3) xızmet etedi.

paydalanıladı: birinshiden ózgermeli toqlardı tuwrılaw (237-paragrafqa qarańız) hám, ekinshiden, úlken sıyımlıqqa iye bolǵan kondensatorlardı alıw ushın. Sońǵı jaǵdayda alyuminiydiń juqa japıraqlarınıń arasına aldın-ala elektrolit sińdirilgen qaǵazdı qoyadı. Toqtıń ótiwiniń barısında alyuminiy japıraqlardıń biri juqa izolyaciyalawshı plenka menen qaplanadı hám sonıń nátiyjesinde japıraq elektrolit penen birgelikte kondensatordı payda etedi. Izolyaciyalaytuǵın plenkanıń qalıńlıǵınıń júdá kishi bolıwına baylanıslı kondensatordıń sıyımlıǵı júdá úlken boladı. Usınday elektrolitlik kondensatorlardıń sıyımlıǵı úlken bolmaǵan ólshemlerde de 10^{-2} f shamasına jetedi.

§ 181. Qattı denelerdiń elektrolitlik ótkizgishligi. Duzlardıń molekulları tek erigende ǵana emes, al balqıǵanda da dissociaciyalanadı. Bunnan aldınǵı paragrafta alyuminiydiń, magniydiń, natriydiń hám basqa da metallardıń balqıtılǵan duzlarınń sanaatta úlken masshtablarda qollanılauıǵınıń kórdik. Usınday balqıtılǵan duzlardıń elektrolitlik ótkizgishligi eritpelerdiń ótkizgishliginen hesh qanday ayırmaǵa iye emes. Biraq, qattı haldaǵı duzlar da elektrolitlik ótkizgishlikke iye. Bunday jaǵdayda elektrolitlik ótkizgishli tán bolǵan misal sıpatında tas duzın kórsetiwge boladı.

Tas duzınıń kristalları ionlıq kristallıq pánjereniń úlgisi bolıp tabılauıǵını belgili (I tomdaǵı 87-paragrafqa qarańız). Natriydiń oń ionları menen xlorıń teris ionları kublıq pánjereniń túyinlerinde jaylasqan. Ádettegi temperaturalarda tas duzı jaqsı izolyator bolıp tabıladı. Biraq, joqarı temperaturalarda, 600°C temperaturadan baslap ol ele qattı bolıp qalıp, sezilerliktey elektr ótkizgishlikke iye boladı (tas duzınıń balqıw temperaturası 780°C). Tas duzınıń kristallınıń qarama-qarsı qaptallarınan ótkizituǵın metall plastinkaları menen qaplap, olarǵa potenciallar ayırmasın túsirip hám kristaldı qızdırǵıstıń járdeminde qızdırıp, kristall arqalı toqtıń ótiwin baqlawǵa boladı. Tap sonday ótkizgishlikke galogenlik-gúmislik duzlar, xlorlı qorǵasın hám basqa da kristallar iye.

P. I. Lukirskiy, S. A. Shukarev hám O. N. Trapeznikovalar tas duzınıń qattı kristalları arqalı toq ótkende Faradey nızamınıń orınlanauıǵını kórsetti. Bul ótkizgishliktiń elektrolitlik xarakterge iye ekenliginiń tuwrıdan-tuwrı dálili bolıp tabıladı.

Qattı kristaldıń elektrolitlik ótkizgishligi ádette onıń qıyrawına alıp keledi. Mısalı, qızǵan tas duzınıń elektrolizinde katodtıń qasında kózge fiolet reńli sabaqlarday (dendritler dep atalauıǵın) bolıp kórinetuǵın hám kristalǵa tereń kiretuǵın natriy ajralıp shıǵadı.

Kristallardıń elektr ótkizgishligi temperatura menen ósedı. Potenciallar ayırması úlken bolǵanda toqtıń keskin túrde ósiwine alıp keletuǵın *tesiw* orın aladı³². Tesiw kristalǵa tikkeley kúshli elektr maydanınıń tásirinde (shama menen 10^6 v/sm bolǵan), sonıń menen birge kristaldıń ishindegi jergilikli qızıwdıń esabınan júzege keliwi múmkin; sońǵı jaǵdayda jıllılıq tesiwı atamasına iye. Jıllılıq tesiwı qubılısınıń teoriyası sovet alımları N.N.Semenov hám V.A.Fok tárepinen dóretildi.

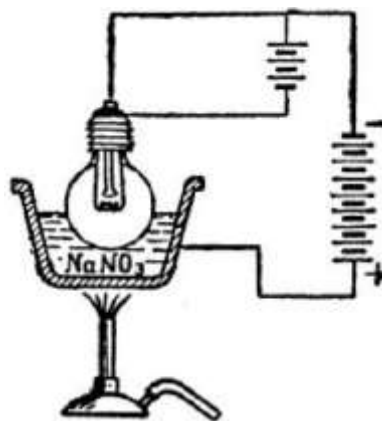
Sırtqı elektr maydanınıń tásirinde kristallıq pánjere arqalı ionlardıń qozǵalısinıń mexanizmi usı waqıtlıǵa shekem tolıq anıqlanbaǵan. Eń ápiwayı gipotezanıń mánisi mınadan ibarat: joqarı temperaturalarda ionlardıń teń salmaqlıq ornınıń átirapındaǵı terbelisleriniń amplitudaları sonshama úlken bolıp, sırtqı maydannıń elektrlik kúshleri tárepinen payda etilgen kúshlerdiń tásirinde ayırım ionlar geypara waqıtları óziniń qońsıları menen orın almastıra aladı. Biraq, ekinshi tárepten qálegen haqıyqıy kristaldıń ideallıq úziksiz pánjereden ádewir ayırmasınıń bar ekenligin názerde tutıw kerek. Kristaldıń ishinde kóp sanlı mikroskopiyaqlı jariqlar hám pánjereniń basqa da buzaqlıqları bar hám olar kristaldıń ózgesheliginiń qalıplesiwinde úlken orındı iyeley aladı.

SHiyshe sıyaqlı qattı denelerdiń ótkizgishliginiń elektrolitlik xarakterge iye ekenligi jaqsı anıqlanǵan. Olar kristallıq strukturaǵa iye emes hám olardı qattı deneler menen emes, al jabısqaqlıǵı júdá úlken sıyıqlıq penen salıstırǵan durıs boladı. Ádettegi shiyshe ójire temperaturalarında toqtı júdá jaman ótkeredi, biraq olardı qızdırǵanda olar jaqsı ótkizgishke aylanadı hám bul ótkizgishlik elektrolitlik xarakterge iye boladı.

³² Rus tilindegi "proboy" sózi "tesiw" sózi menen almasırlıǵan (Awdarıwshılar).

Qızdırılğan shiysheniń ótkizgishliginiń elektrolitlik xarakterin ańsat demonstraciyalawğa boladı. Volfram sımğa iye bolğan elektr lampasınıń tómengi tárepin 300°C temperaturadağı balqıtılğan natriy silitrasına (NaNO_3) túsiredi (149-súwret). Bunday temperaturada shiyshe ele qattı halda boladı hám atmosferalıq basımınıń tásirinde qısılmaydı. Temir ıdısı oń polyus penen, al lampanıń volfram sımın teris polyus penen tutastıradı; lampanıń spiralı toqtıń basqa dereginen qızdırıladı. Bunday jaǵdayda spiral elektronlardıń deregi bolıp tabıladı. Elektr maydanı tárepinen tezletilgen bul elektronlar spiral menen lampanıń shiyshesiniń arasındağı elektr toǵın payda etedi. Bunnan keyin qızǵan shiysheniń elektrolitlik ótkizgishligi orın aladı hám, eń aqırında, balqıtılğan shiyshe menen temir ıdıs arqalı ótip toq tutasadı. SHiyshe kátod tárepke qaray natriydiń ionları qozǵaladı; baǵı bir waqıttan keyin lampa ishki tárepten metall natriydiń jıltıraǵan aynası menen jabıladı.

149-súwret.
SHiyshe niń elektrolitlik ótkizgishligin baqlaw usılı.



Kristallardıń elektrolitlik ótkizgishligin baqlaw arqalı ionlardıń qozǵalǵıshlıǵın anıqlawğa múmkınshilik beredi. Gúmistiń qattı galogenlik duzlarınıń elektrolizinde (AgCl , AgBr , AgI) tek gúmistiń oń ionı qozǵaladı eken, al galogenlerdiń ionları qozǵalıssız qaladı. Tap usınday qubılıs tas duzınıń (NaCl) elektrolizinde de orın aladı. Bul birikpede júdá joqarı bolmaǵan temperaturalarda tek Na^+ ionları qozǵaladı; al joqarıraq bolğan temperaturalarda Cl^- ionları qozǵala baslaydı. Xlorlı qorǵasınıń (PbCl_2) elektrizinde tek xlorıń ionları ǵana qozǵaladı, al kristallıq pánjeredegi metaldıń ionları qozǵalmaydı. 154-paragrafta bizler baǵı bir birikpelerdiń, mısalı Cu_2O nıń (yarım ótkizgishler), elektronlıq ótkizgishlikke iye bolatuǵınıń kórsetken edik. Al, endi qattı duzlardıń (NaCl , AgCl h.t.b.) ionlıq ótkizgishlikke iye ekenligin atap ótemiz. Biraq, CuJ , Ag_2S sıyaqlı birikpeler de bolıp, olar aralas ótkizgishlikke iye boladı; olardağı toq ionlardıń da, elektronlardıń da qozǵalıslarınıń bar bolıwınıń saldarınan payda boladı.

§ 182. Gazlerdegi elektr toǵı. Atmosferalıq basımǵa jaqın hám onnan úlken bolğan basımlarda gazler jaqsı izolyatorlar bolıp tabıladı. Bul olardıń molekularınıń neytral hám gazlerde erkin elektronlardıń yamasa qanday da bir basqa túrdegi zaryad tasiwshılardıń joq ekenligin ańǵartadı.

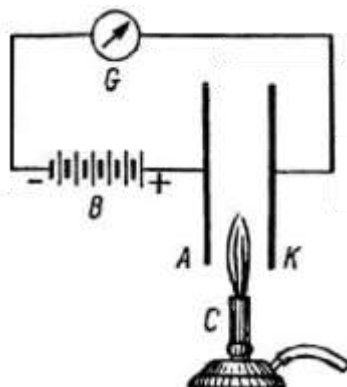
Biraq, eger gazdiń massasında qanday da bir jollar menen ionlar payda etilse (gazdi ionlastırsa), onda ol ótkizgishke aylanadı.

Gazdi ionlastırıwdı qızdırıw jolı menen onıń molekuların jalınında, rentgen yamasa ultrafiolet nurlar yamasa radioaktiv zatlardıń nurlarında dissociaciyalaw arqalı ámelge asırıwǵa boladı. Usınday ótkizgishlikti gazdiń óz betinshe emes ótkizgishligi dep ataydı.

Usınıń menen bir qatarda gazlerde (ayırıqsha siyrekletilgen) toqtıń ótip turıwına sebepshi bolğan elektr maydanınıń tásirinde tezletilgen bólekshelerdiń soqlıǵısıwlarınń saldarınan payda bolğan ionlardıń esabınan da ótkizgishliktiń júzege keliwi múmkın. Bunday ótkizgishlikti óz betinshe ótkizgishlik dep ataydı.

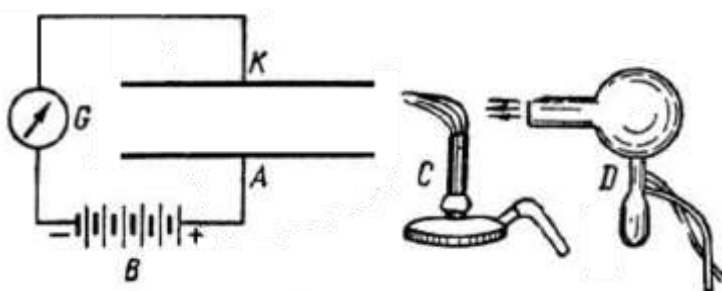
Óz betinshe emes ótkizgishlikti júdá ápiwayı túrde demonstraciyalawǵa boladı. A hám K

plastinkaların arasına (150-súwret) B batareyasınıń járdeminde kernewligi E bolǵan elektr maydanı túsiriledi. Hawanıń jaqsı izolyaciyalıq qásiyetlerge iye bolǵanlıǵınıń sebebinen $ABGKA$ shınjırında toq payda bolmaydı hám G galvanometriniń strelkası burılmaıdı.



150-súwret.
Jalınıń qasındaǵı hawanıń ótkizgishligi.

Eger plastinkalardıń arasına C gorelkasınıń jalınıń jaylastırsaq, onda jalında hawanıń ionların payda bolıwınıń sebebinen A hám K plastinkaların arasındaǵı hawa ótkizgishlik qásiyetke iye boladı hám G galvanometr shınjırda toqtır payda bolǵanlıǵın kórsetedi.



151-súwret. Ionlardıń hawanıń aǵısı menen alıp júriliwi.

Jalında payda bolǵan ionlardıń qanday da bir waqıttır ishinde (júdá kishi bolmaǵan) saqlanatuǵınlıǵın kórsetiwge boladı. Onıń ushın A hám K elektrodların gorizont baǵıtında jaylastıramız hám C gorelkasın bazı bir qashıqlıqta jaylastıramız (151-súwret). Bul jaǵdayda jalında payda bolǵan ionlar elektrodlardıń arasındaǵı keńislikke kelip túspeydi hám olardıń arasındaǵı hawa ótkizgishlik qásiyetke iye emes. Biraq, eger biz úlken bolmaǵan D ventilyatorınıń járdeminde hawanı jalın arqalı úrleseq hám onı elektrodlardıń arasındaǵı keńislikke baǵdarlasaқ, onda olardıń arasında toq payda boladı. Bul eń bolmaǵanda ionlardıń bir bóliminiń hawanıń aǵısı menen gorelkadan elektrodqa baraman degenshe ózleriniń zaryadların saqlaytuǵınlıǵın kórsetedi. Gorelka menen elektrodlardıń arasındaǵı qashıqlıqtıń shaması hám hawanıń aǵısınıń tezligi boyınsha ionlardıń ómiriniń uzınlıǵınıń sekundtır onnan bir bólegindey bolatuǵınlıǵı anıqlawǵa boladı.

Óz betinshe emes razryadta payda bolatuǵın toqlardıń shaması júdá kishi, shama menen $10^{-6} - 10^{-12} a$. Usınday ázzi toqlardı ólshew kópshilik jaǵdaylarda tarlı yamasa kvadrantlıq elektrometrlerdi paydalanıp, janapay usıllardıń járdeminde ámelge asırıladı. Bunday jaǵdaylarda eki usıl qullanıladı. Olardıń biri *soqqı usılı* dep ataladı³³. Bul usıldıń sxeması 152-súwrette kórsetilgen edi. A hám K plastinkaların arasındaǵı hawa qanday da bir jollar menen ionlastırıladı hám olardıń arasında toq payda boladı. Plastinkalardıń arasındaǵı ionlardı tezletetuǵın maydandı B batareyası payda etedi; C hám D lar tarlı elektrometrdiń pıshaqları; G onıń sabaǵı, usı sabaqtıń awısıwı boyınsha oǵan berilgen potencialdıń mánisi ólshenedi; B' -elektrometrdiń pıshaqlarınıń

³³ Rus tilindegi "metod natekaniya" sózi "soqqı usılı" túrinde awdarıldı (Awdarıwshılar).

arasında potenciallyar ayırmassın payda etetuğın batareya. Eger a pereklyuchateli 152-súwrette punktir menen kórsetilgenday awhalda turğın bolsa, onda elektrometrдің sabağı Z jer menen tutasqan boladı hám, sonlıqtan, onıń potencialı nolge teń: sabaq awıspağan halda qaladı. a pereklyuchatelinıń járdeminde sabaqtı jerden ajıratısaq (152-súwrette pereklyuchateldiń awhalı tutas sızıqtıń járdeminde kórsetilgen) sabaqqa K plastinasınan zaryadlar ağa baslaydı hám sabaq awısağı. Meyli, sekundomer menen ólshengen t waqtınıń ishinde sabaqtıń potencialı V shamasına jetken bolsın; bunday jağdayda oğan berilgen zaryadtıń muğdarı Q

$$Q = CV$$

shamasına teń boladı. Bul teńlikte C - elektrometr, A hám K plastinaları jáne tutastırıwshi sımlardan turatuğın barlıq sistemanıń sıyımlıǵı. A hám K plastinkalarınıń arasında t waqtı ishinde ótetuğın toqtıń ortasha mánisi I mınağan teń:

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{CV}{t}.$$

C nıń mánisin bilip hám V menen t lardıń shamaların ólshep, usınday jollar menen toqtıń kúshi bolğan I di anıqlaymız. Mısalı, eger sıyımlıq $C = 50 \text{ sm} \cong 5,5 \cdot 10^{-11} \text{ f}$ hám elektrometrдің sabağı 27,5 sek ishinde 0,05 voltke shekem zaryadlangan bolsa, onda

$$I = \frac{5,5 \cdot 10^{-11} \cdot 0,05}{27,5} a = 10^{-13} a$$

shamasına iye bolamız. Kórinip turğanınday, biz táriyiplegen usıl júdá kishi toqlardı ólshey aladı eken. Biraq onıń kemshiligi t baqlaw waqtı ishindegi toqtıń tek ortasha mánisin ğana anıqlawınan ibarat.

Ekinshi usıl turaqlı awısıw usılı dep ataladı. Bul usılda A hám K plastinkaların (153-súwret) tuyıqlaytuğın júdá úlken bolğan R qarsılıǵınıń ushlarındaǵı potenciallyar ayırmassın elektrometrдің járdeminde ólshewge alıp klinedi (qalğan belgilewler 152-súwrettegi belgilewlerge sáykes keledi). Ólshengen $V_1 - V_2$ potenciallyar ayırmassınıń hám R qarsılıǵınıń mánisleri boyınsha toqtıń kúshi Om nızamı boyınsha esaplanadı:

$$I = \frac{V_1 - V_2}{R}.$$

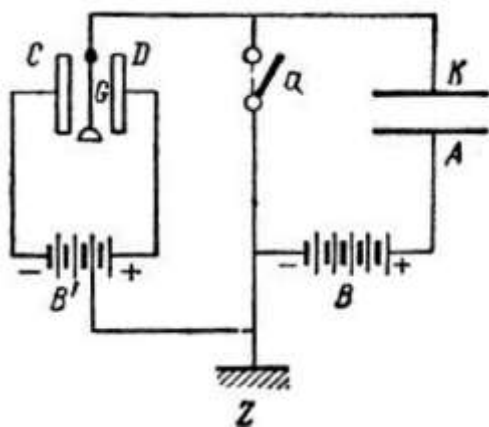
Mısalı, $R = 100 \text{ mom} = 10^8 \text{ om}$ qarsılıǵı hám $V_1 - V_2 = 0,01 \text{ v}$ potenciallyar ayırması bolğan jağdayda toqtıń kúshi

$$I = \frac{0,01}{10^8} a = 10^{-10} a$$

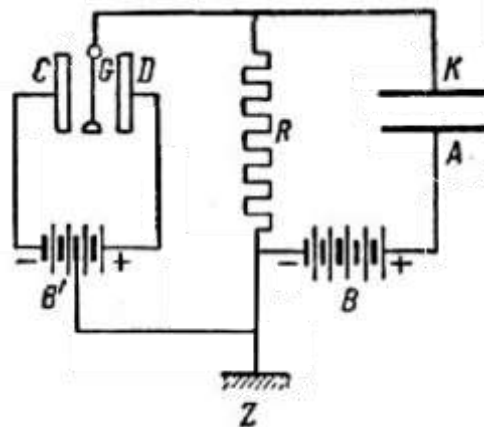
shamasına teń bolıp shıǵadı.

Sabaqtıń inerciyasınıń kishi bolatuǵınlıǵına baylanıslı bul usıl berilgen waqt momentindegi toqtıń kúshin ólshewge múmkinshilik beredi. Usıldıń kemshiligi júdá úlken qarsılıqtıń shamasın dál ólshewdiń qıyın ekenligi menen baylanıslı.

Atmosferalıq basımlardaǵı hám onnan úlken bolğan basımlardaǵı gazlerdegi óz betinshe emes ótkizgishlik ionlıq ótkizgishlik bolıp tabıladı.



152-сúwret. Soqqı usılınıń járdeminde kishi toqlardı ólshew.



153-сúwret. Turaqlı awısıw usılınıń járdeminde kishi toqlardı ólshew.

Eger ionizaciya processiniń nátiyjesinde molekulalardan elektronlar julıp alınatuǵın bolsa, onda olar molekulalarǵa birden tartıladı hám sonlıqtan olar erkin bolıp qalmaydı, al molekulalıq teris ionlardı payda etedi.

Tómengi basımlarda elektronlar erkin bolıp qaladı hám bunday jaǵdaylarda ótkizgishlik elektronlıq xarakterge iye boladı.

§ 183. Gazlerdiń óz betinshe emes ótkizgishliginiń teoriiyası. Gazlerdiń óz betinshe bolmaǵan ótkizgishliginiń teoriiyası elektrolitlerdiń teoriiyasına uqsas (178-paragraf).

Meyli, ionizator waqıttır bir birligi ishinde gazdiń kóleminiń bir birliginde hár bir belgige iye bolǵan Δn_0 dana iondı payda etsin. Keri process bolǵan ionlardıń molizaciyası (yamasa onı geypara jaǵdaylarda rekombinaciya dep te ataydı) kólem birligindegi on zaryadlangan ionlardıń sanına da, teris zaryadlangan ionlardıń sanına da tuwrı propoprional.

Berilgen momentte gazdiń kólem birliginde n_0 dana on zaryadlangan ionlar menen tap sonshama teris zaryadlangan ionlar bar dep boljaymız. Bunday jaǵdayda kólem birligindegi waqıt birliginde molizaciyalanatuǵın (rekombinaciyalanatuǵın) ionlardıń sanı mınaǵan teń boladı:

$$\Delta n'_0 = \gamma n_0^2.$$

Bul teńlikte γ arqalı molizaciya koefficienti belgilengen.

Teń salmaqlıq shárti qaytadan payda bolǵan ionlar Δn_0 menen $\Delta n'_0$ joǵalatuǵın ionlardıń teńligi túrinde jazıladı:

$$\Delta n_0 = \gamma n_0^2. \quad (1)$$

Bunnan berilgen sharayatta gazdiń kólem birligindegi (birdey belgidegi) ionlardıń sanı n_0 ushın

$$n_0 = \sqrt{\frac{\Delta n_0}{\gamma}} \quad (2)$$

ańlatpasına iye bolamız.

Ionlastırılǵan gaz tegis parallel bolǵan eki elektrodtır arasında jaylasqan hám plastinkalardıń arasında kernewligi E bolǵan elektr maydanı payda etilgen dep boljaymız. Bunday jaǵdayda ionlar maydannıń tásirinde qozǵala baslaydı hám toq payda boladı. Elektrodlarǵa jetip barǵan ionlar olarǵa ózleriniń zaryadların beredi. Solay etip, ionlardıń joǵalıwı gazdiń kóleminiń ishindegi molizaciyanıń esabınan ǵana emes, al ionlardıń elektrodlardıń qasındaǵı neytrallasıwınıń esabınan da boladı eken. Ionlar elektrodlarǵa diffuziyanıń esabınan da jetip bara aladı, biraq biz bunnan bilay bul effektı esapqa almaymız.

Meyli, elektrodlardıń arasındaǵı toqtır kúshi I bolsın. Bunday jaǵdayda t waqıtınıń ishinde $Q = It$ muǵdarındaǵı zaryad alıp ótilgen boladı hám, soǵan baylanıslı, t waqıtınıń ishinde elektrodqa jetip barǵan hám oǵan óziniń zaryadın bergен ionlardıń sanı It/q shamasına teń

boladı (yaǵnıy waqıt birliginde I/q muǵdarındaǵı zaryad jetip baradı). Bul ańlatpalarda q arqalı bir ionnıń zaryadı belgilengen. Meyli, S - elektrodlardı payda etetuǵın hár bir plastinkanıń betiniń maydanı, al l - olardıń arasındaǵı qashıqlıq bolsın. Bunday jaǵdayda plastinkalardıń arasındaǵı gazdıń kólemi Sl shamasına teń hám, usıǵan sáykes, gazdıń kólem birliginde waqıttıń bir birliginde ótken toqtıń nátiyjesinde

$$\Delta n'_0 = \frac{I}{qSl}$$

shamasına teń sandaǵı ionlar ketedi. I/S shamasınıń toqtıń tıǵızlıǵı i ekenligin ańǵarıp, sońǵı teńlikti bılayınsha kóshirip jazamız:

$$\Delta n''_0 = \frac{i}{ql}.$$

Toq bolǵan waqıttaǵı teń salmaqlıq shárti (1)-teńlik boyınsha emes, al jańadan payda bolǵan ionlardıń sanı Δn_0 joǵalatuǵın ionlardıń sanı bolǵan $\Delta n'_0 + \Delta n''_0$ shamasına teń bolıwı kerek. Bunnan mınaday teńlik kelip shıǵadı:

$$\Delta n_0 = \gamma n_0^2 + \frac{i}{ql}. \quad (3)$$

Eki sheklik jaǵdaydı qaraymız. Birinshiden, toqtıń tıǵızlıǵı i sonshama kishi hám usıǵan sáykes

$$\frac{i}{ql} \ll \gamma n_0^2 \quad (4)$$

shárti orınlanadı, yaǵnıy toqtıń bar bolıwınıń sebebinen alıp ketiletuǵın ionlardıń sanın molizaciyanıń saldarınan joǵalatuǵın ionlardıń sanına salıstırǵanda esapqa almaytuǵınday dárejede kishi dep boljaymız. Bunday jaǵdayda biz qaytadan (1)-teńlikke hám onnan kelip shıǵatuǵın kólem birligindegi ionlardıń sanı n_0 turaqlı bolatuǵın (2)-teńlikke qaytadan qaytıp kelemiz Meyli, oń zaryadlangan ionlardıń tezligi u_+ shamasına hám teris zaryadlangan ionlardıń tezligi u_- bolsın. Bunday jaǵdayda biz katodqa waqıt birliginde $n_0 u_+ S$ dana oń ionnıń kelip jetetuǵınlıǵın alamız. Usınıń menen bir waqıtta katodtan $n_0 u_- S$ dana teris ion ketedi hám nátiyjede katodtıń qasında ele juplaspaǵan $n_0 u_- S$ dana oń ion qaladı. Demek, usı jaǵdayǵa sáykes, katodtaǵı bir birlik waqıttıń ishinde bólinip shıǵatuǵın ionlardıń sanı $n_0(u_+ + u_-)S$ shamasına teń boladı; al anodta bolsa waqıt birliginde tap sonday sandaǵı teris ionlar bólinip shıǵadı. Sonlıqtan, toqtıń tıǵızlıǵı i ushın mınaday teńlikti alamız:

$$i = qn_0(u_+ + u_-). \quad (5)$$

Elektrolittegi ionlardıń qozǵalısnı tallaǵanıımızday (178-paragrafta) tallaw jolı menen biz ionlardıń teńlesken tezligi maydannıń kernewligi E ge proporcional dep boljay alamız:

$$u_+ = u_+^0 E, u_- = u_-^0 E;$$

u_+^0 hám u_-^0 shamaları gaz ionlarınń qozǵalǵıshlıqları bolıp tabıladı hám olardıń san mánisleri kernewlik birge teń bolǵandaǵı ionlardıń tezligine teń (5)-teńlikke ionlardıń u_+ hám u_- tezlikleriniń ornına qozǵalǵıshlıq arqalı alınǵan ańlatpalardı qoyıp, mınanı alamız:

$$i = qn_0(u_+^0 + u_-^0)E. \quad (6)$$

Tájiriybeniń berilgen sharayatlarında q , u_+^0 hám u_-^0 shamaları turaqlı bolǵanlıqtan, sonıń menen birge toqtıń kishi tıǵızlıqlarında n_0 shamasın da turaqlı bolıp qaladı dep boljap $\sigma = qn_0(u_+^0 + u_-^0)$ shamasınıń da turaqlı ekenligine kóz jetkeremiz. Demek, (6)-ańlatpa Om nızamın ańǵartadı eken:

$$i = \sigma E.$$

Bul teńlikte σ - gazdıń ótkizgishligi. Tek toqtıń i tıǵızlıǵınıń júdá kishi mánisleri ushın ǵana Om nızamınıń orınlı ekenligin jáne bir ret atap ótemiz; toqtıń i tıǵızlıǵınıń qanday mánisiniń jetkilikli dárejede kishi ekenliginiń kriteriyi (4)-teńlik penen beriledi. Biz tómende bul teńlikke basqa formulirovkanı beremiz.

Endi ekinshi sheklik jaǵdayda qaraymız. Bul jaǵdayda toqtıń kúshi i ionlardıń joǵalıwı olardıń elektrodlardaǵı neytrallasıwı boyınsha anıqlanatuǵınday dárejede úlken bolıwı kerek. Sonlıqtan

molizaciyanıń saldarınan olardıń sanınıń kemeyiwın esapqa almawǵa boladı, yaǵnıy

$$\gamma n_0^2 \ll \frac{i}{ql}$$

teńsizliginiń orınlanıwı kerek. Bunday jaǵdayda (3)-teńlik mınaday túrge iye boladı:

$$\Delta n_0 = \frac{i}{ql}. \quad (7)$$

(7)-teńlikti qanaatlandıratuǵın toqtıń tıǵızlıǵın i_t arqalı belgilep,

$$i_t = \Delta n_0 ql. \quad (8)$$

teńligin alamız. Bul (8)-teńlikten toqtıń kúshiniń tıǵızlıǵı bolǵan i_t shamasınıń maydanniń kernewligi E den, soǵan sáykes elektrodlardıń arasındaqı potenciallar ayırması $V_1 - V_2$ den ǵárezsiz ekenligin kórsetedi. Toqtıń tıǵızlıǵı i_t berilgen sharayatlardaǵı múmkin bolǵan maksimalıq toq bolıp tabıladı (berilgen Δn_0 , q hám l shamaları ushın) hám *toyınıw toǵınıń tıǵızlıǵı* dep ataladı. (8)-teńlikten kútilmegen nátiye kelip shıǵadı. Atap aytqanda, I toq kúshi qanshama úlken bolsa toqtıń tıǵızlıǵı bolǵan i_t shaması da úlken bolıwı kerek (yaǵnıy elektrodlar bir birinen qanshama alıs jaylastırılǵan bolsa). Bul juwmaq tek ionizaciyanıń elektrodlardıń arasındaqı barlıq keńislikte júzege keletuǵın, yaǵnıy elektrodlardıń arasındaqı qashıqlıq l úlken bolǵan uchastka ushın durıs. Solay etip, úlken l shaması orın alǵanda payda bolatuǵın ionlardıń ulıwmalıq sanı úlken boladı, al bul jaǵday toyınıw toǵınıń tıǵızlıǵı bolǵan i_t shamasınıń ósiwine alıp keledi.

Joqarıda kórip ótilgen eki sheklik jaǵdaylardıń ortasındaǵı jaǵdaylarda I toqtıń kúshi potenciallar ayırmasınıń shamasınıń Om nızamı boyınsha ósiwine salıstırǵanda ásterek ósedi. Joqarıda ayılǵanlardı juwmaqlap, biz mınalardı ayta alamız: *toyınıw toǵı I_t ǵa salıstırǵanda kóp kishi bolǵan I toqlarında Om nızamı orınlanadı: I toqtıń kúshi elektrodlardıń arasındaqı $V_1 - V_2$ potenciallar ayırmasına proporcional ózgeredi, yaǵnıy Om nızamı orınlanadı. Úlken $V_1 - V_2$ potenciallar ayırmasında Om nızamı orınlanbaydı - toqtıń shaması toyınıw toǵınıń mánisine jetedi. I toq kúshiniń elektrodlarǵa túsirilgen $V_1 - V_2$ potenciallar ayırmasınan ǵárezliginiń ulıwmalıq xarakteri 154-súwrette abc iymekligi menen berilgen. $V_1 - V_2$ potenciallar ayırmasınıń júdá joqarı bolǵan mánislerinde "tesiw" (proboy) orın aladı hám toqtıń kúshi keskin ósedi (cd iymekliginiń punktir sızıq penen sızılǵan bólimi). Gazlerdiń óz betinshe emes ótkizgishligindegi toqtıń toyınıwınıń bolatuǵınlıǵı A.G.Stoletov tárepinen tabıldı. Ol tómengi basımlardaǵı gaz arqalı razryadtıń katodtı ultrafiolet nurlar menen jaqtılandırǵanda payda bolatuǵın elektronlardıń esabınan júzege keletuǵınlıǵın baqladı.*

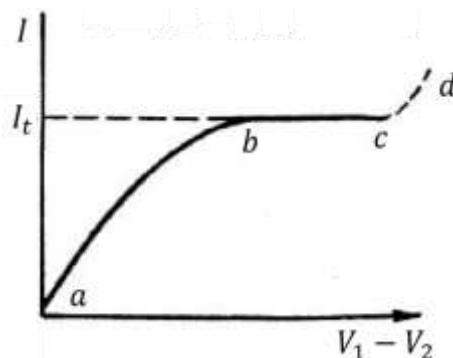
Tegis parallel plastinkalar bar bolǵan jaǵdaydaǵı olardıń arasında ionlastırılǵan gaz bolǵan jaǵdaydaǵı potencialdıń túsiwiniń tarqalıwı haqqındaǵı mäseleni qaraymız.

128-paragrafta aytılıp ótilgenindey, ionizaciya bolmaǵan jaǵdayda maydanniń kernewligi E elektrodlardıń arasındaqı barlıq noqatlarda turaqlı hám oń elektrodta teris elektrodqa qaray jılısqanda potencial V teń ólshewli kemeyedi. OX kósherin elektrodlarǵa perpendikulyar etip túsirip hám koordinatalar basın oń elektrodtıń tegisliginde ornalastırıp, elektrodlardıń arasındaqı potencial V nıń tarqalıwınıń $V_1 V_2$ tuwrısı menen súwretlenetuǵınlıǵın kórsetiwge boladı (155-súwret).

Elektrodlardıń arasındaqı barlıq keńislikte teń ólshewli ionizaciya orın alǵanda, yaǵnıy qálegen kólemniń hár bir birligindegi oń hám teris ionlardıń sanları birdey bolǵan jaǵdayda gaz molekualıq ólshemlerge salıstırǵandaǵı úlken kólemlerde neytral bolıp tabıladı hám potencialdıń makroskopiyalıq tarqalıwı tuwrı sızıqlı bolıp qala beredi. Al, toq bolǵan jaǵdayda awhal ózgeredi. Bunday jaǵdayda anodtıń qasında teris zaryadlangan ionlardıń artıqmaslıǵı, al katodtıń qasında oń zaryadlangan ionlardıń artıqmaslıǵı payda boladı. Elektrodlardıń qasında tarqalıwı I iymekligi menen súwretlenetuǵın kólemlik ρ zaryadları payda boladı. Kólemlik zaryadlardıń bar bolıwı maydanniń kernewligi E ni ózgertedi: elektrodlardıń arasındaqı keńislikte kernewlik turaqlı bolmaydı.

154-súwret.

Óz betinshe emes ótkizgishlik orın alğan jaǵday ushın toqtır kúshi I diń potenciallar ayırması $V_1 - V_2$ den ǵárezligi.



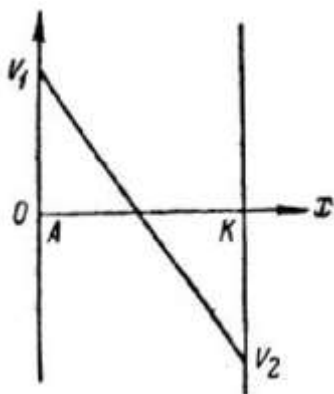
132-paragrafta ayılıp ótilgenindey, maydannıń kernewligi E zaryadlardıń tıǵızlıǵı ρ menen bılayınsha baylanısqa:

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = 4\pi\rho.$$

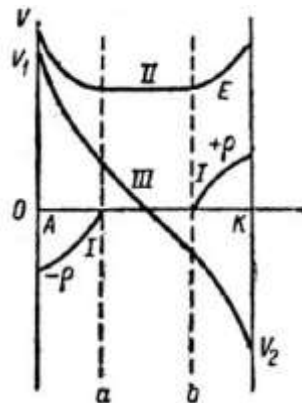
E maydanı biz qarap atırǵan jaǵdayda tek x_1 koordinatasına ǵárezli. Sonlıqtan joqarıda jazılǵan ańlatpa mınaday túrge enedi:

$$\frac{dE}{dx} = 4\pi\rho. \quad (9)$$

Elektrodlardan úlken qashıqlıqlardaǵı keńislikte $\rho = 0$ (156-súwrettegi ab oblastı)- hám (9)-ańlatpa boyınsha E den koordinata boyınsha alınǵan tuwındı nolge teń, yaǵnıy kernewlik E niń ózi turaqlı. Elektrodlarǵa jakın orınlarda ρ niń mánisi nolge teń emes hám soǵan sáykes dE/dx tuwındısı da nolge teń emes. Bunnan E niń x qa baylanıslı ózgeretuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Anodtıń qasında ρ niń mánisi teris, sonlıqtan, (9)-teńlik boyınsha dE/dx tuwındısı da teris mániske iye, yaǵnıy E niń mánisi anodtan uzaqlasqa sayın kishireydi. Katodtıń qasında ρ oń hám bul orında E úlkeydi. Usı jaǵdaylardıń barlıǵın esapqa alǵanda elektrodlardıń arasındǵı kernewlik E niń tarqalıwı ushın 156-súwrettegi II menen kórsetilgen iymeklikti alamız.



155-súwret. Ionizaciya bolmaǵan jaǵdaydaǵı potencial V niń elektrodlardıń aralıǵındǵı tarqalıwı.



156-súwret. Elektrodlardıń arasındǵı I - kólemlik zaryad ρ niń, II - maydannıń kernewligi E niń, III - potencialdıń tarqalıwı.

Aqırında potencial V niń tarqalıwın qaraymız. V potencialı maydannıń kernewligi menen 131-paragraftaǵı $E = -\frac{dV}{dx}$ qatnası arqalı baylanısqa. Biz qarap atırǵan jaǵdayda n normalı OX kósheri menen baǵıtlas bolǵanlıqtan

$$-\frac{dV}{dx} = E$$

teńligine iye bolamız hám bunnan mınaday jaǵdaydı alamız: kólemlik zaryadlar bolmaytuǵın ab oblastında E shaması da, dV/dx tuwındısı da turaqlı, yaǵnıy potencialdıń teń ólshewli tómewlewı orın aladı. E shaması úlken bolǵan elektrodlardıń qasında potencialdıń tómewlewı elektrodlardan alıstaǵı orınlarǵa salıstırǵanda tezirek tómewlewı. Elektrodlardıń arasındǵı keńisliktegi potencialdıń ózgerisiniń ulıwmalıq jolı 156-súwrettegi III iymeklik penen berilgen.

§ 184. Molizaciya koefficientlerin hám gaz ionlarınıń qozǵalǵıshlıqların eksperimentallıq anıqlaw. Molizaciya koefficienti γ menen ionlardıń qozǵalǵıshlıqları u^0 di anıqlawdıń bir neshe eksperimentallıq usılları bar.

Olardıń ishindegi eń tuwrıdan-tuwrı anıqlaytuǵın usıllardı qaraymız.

Birinshi ret hár qıylı gazler ushın molizaciya koefficientleri γ lardıń mánisleri ionizaciya processı bolıp ótetuǵın oblasttan hár qıylı qashıqlıqlardaǵı gazdıń aǵısındaǵı ionlardıń sanın anıqlaw jolı menen ámelge asırıldı.

Ionizatordıń tásiiri toqtaǵannan keyin kólem birligindegi ionlardıń sanı n_0 molizaciyanıń saldarınan kemeye baslaydı. Waqıttıń berilgen t momentindegi kólem birligindegi ionlardıń sanın n arqalı belgileybiz. Bunday jaǵdayda kishi dt waqıtı ishindegi molizaciyanıń saldarınan joǵalatuǵın ionlardıń sanın dn arqalı belgilesek, onda waqıt birligi ishinde joǵalatuǵın ionlardıń sanı $-\frac{dn}{dt}$ shamasına teń boladı. Anıqlaması boyınsha molizaciya koefficienti γn^2 shamasına teń bolıwı kerek (γ arqalı molizaciya koefficienti belgilengen): Sonlıqtan

$$\frac{dn}{dt} = -\gamma n^2$$

yamasa

$$\gamma dt = -\frac{dn}{n^2} \quad (1)$$

teńliklerine iye bolamız. Waqıt t nı ionizator toqtatılǵan waqıttan baslap esaplaymız. Bunday jaǵdayda ionlardıń sanı n niń waqıt t dan gárezlikti anıq túrde alıw ushın (1)-ańlatpanı $t = 0$ den waqıttıń bazı bir t momentine shekem integrallawımız kerek:

$$\int_0^t \gamma dt = - \int_{n_0}^n \frac{dn}{n^2}.$$

Bul teńlikte n_0 arqalı ionizatordıń jumısı toqtatılǵan momenttegi ionlardı sanı, al n arqalı t waqıt momentindegi ionlardıń sanı belgilengen. Integrallawdı orınlıp mınaday teńlikke iye bolamız:

$$\gamma t = \frac{1}{n} - \frac{1}{n_0}. \quad (2)$$

Bunnan n ushın mınaday ańlattpanı alamız:

$$n = \frac{n_0}{1 + \gamma n_0 t}. \quad (3)$$

(3)-ańlatpa ionizatordıń tásiiri toqtaǵannan keyin ionlardıń sanı bolǵan n shamasınıń waqıtqa baylanıslı ózgeriwın beredi.

Gazdıń aǵısındaǵı ionizaciya júzege keletuǵın oblasttan hár qıylı qashıqlıqlardaǵı ionlardıń sanın anıqlaw boyınsha eksperimentallıq ólshewler (2)-qatnasqa tiykarlangan. Bazı bir sheklengen kólemde ionizaciyanı payda etedi. Usı kólem arqalı gazdıń aǵısı úrlenedi. Ionizaciya bolıp ótken orınnan d qashıqlıǵında batareyanıń bir polyusına tutastırılǵan elektrod jaylastırıladı, batareyanıń ekinshi polyusi jerge tutasqan. Bunday jaǵdayda elektrodtıń átirapında payda bolǵan elektr maydanınıń tásirinde oǵan bir belgige iye ionlar kelip túsedı. Jetkilikli dárejede kúshli bolǵan maydanda waqıt birliginde elektrodqa kelip túsetuǵın ionlardıń sanı waqıt birligindegi elektrodtıń qasında ótetuǵın gazdıń kólemindegi ionlardıń sanına, yaǵnıy nSv shamasına teń. Bul kóbeymedegi S - elektrodtıń maydanı, al v -aǵıstıń tezligi. Usınıń nátiyjesinde elektrodqa $Q = nSvq$ zaryadı beriledi (q arqalı bir ionnıń zaryadı belgilengen).

Ólshewler hár qıylı bolǵan eki d_1 hám d_2 qashıqlıqları ushın ótkeriledi. Meyli, d_1 qashıqlıǵında

$$Q_1 = n_1 S v q$$

zaryadı, al d_2 qashıqlıǵında

$$Q_2 = n_2 S v q$$

zaryadı ólshengen bolsın. (2)-formula boyınsha mınaday teńlikler alınadı:

$$\frac{1}{n_1} - \frac{1}{n_0} = \gamma t_1 \text{ hám } \frac{1}{n_2} - \frac{1}{n_0} = \gamma t_2.$$

Bul teńliklerde t_1 menen t_2 arqalı gazdıń aǵısınıń ionizaciya oblastınan elektrodtıń sáykes birinshi hám ekinshi orınlarına jetip barıwı ushın ketken waqıtlar belgilengen.

Bunnan mınaday teńlikke iye bolamız:

$$\frac{1}{n_2} - \frac{1}{n_1} = \gamma(t_2 - t_1).$$

Biraq $t_2 - t_1 = \frac{d_2 - d_1}{v}$ teńliginiń orınlı ekenligin esapqa alıwımız kerek (v arqalı aǵıstır tezligi belgilengen). Demek, mına teńliktiń orınlanatuǵınlıǵına kóz jetkeremiz:

$$\frac{1}{n_2} - \frac{1}{n_1} = \gamma \frac{d_2 - d_1}{v}.$$

Bul teńlikke n_2 menen n_1 lerdiń olardıń Q_1 hám Q_2 ler arqalı ańlatılǵan mánislerin qoyıp mınaday formulanı alamız:

$$\left(\frac{1}{Q_2} - \frac{1}{Q_1}\right) S v q = \gamma \frac{d_2 - d_1}{v}.$$

Bunnan molizaciya coefficienti ushın

$$\gamma = S q \left(\frac{1}{Q_2} - \frac{1}{Q_1}\right) \frac{v^2}{d_2 - d_1} \quad (4)$$

formulasına iye bolamız.

Q_1, Q_2 hám v shamaların ólshep jáne S, q hám $d_2 - d_1$ shamaların bilip, (4)-formula boyınsha molizaciya coefficienti γ nı tabamız.

Molizaciya coefficienti γ nıń shaması $\gamma = \frac{\Delta n'_0}{n_0^2}$ qatnası boyınsha anıqlanadı, bul teńlikte $\Delta n'_0$ - kólem birligindegi waqıt birliginde joǵalatuǵın ionlardıń sanı, al n_0 - kólem birligindegi ionlardıń sanı. Demek, γ nıń ólshemi $L^3 T^{-1}$ túrinde jazıladı hám $\text{sm}^3 \cdot \text{sek}^{-1}$ larda ólsheniwi múmkin. Hár qıylı gazler ushın γ nıń mánisleri VIII kestede keltirilgen.

γ coefficientiniń shaması basımnan ázzi ǵárezli. Tek júdá kishi bolǵan basımlarda sezilerliktey kishireydi. Temperaturanıń joqarılawı menen γ kishireydi.

VIII keste.

**1 atm basımdaǵı hám 18°C temperaturadaǵı
molizaciya coefficientleri ($\text{sm}^3 \cdot \text{sm}^{-1}$)**

Gaz	$\gamma \cdot 10^6$
Hawa	1,67
Kislorod	1,61
Vodorod	1,44
Uglerod okisi	0,87

Gazlerdiń óz betinshe emes ótkizgishliginde hám olardıń ionlasıwında paydalanılatuǵın shamalardıń muǵdarı menen tanısıw ushın bir neshe misallardı keltiremiz.

1-mısal. Hár qaysısınıń betiniń maydanı $S = 100 \text{ sm}^2$ shamasına teń hám bir birinen $l = 5 \text{ sm}$ qashıqlıqta turǵan tegis elektrodlardıń arasında rentgen nurları menen ionlastırǵanda $I_t = 10^{-7} \text{ a}$ shamasındaǵı toyınıw toǵı baqlanadı.

1 sek waqıttıń ishinde 1 sm^3 kólemniń ishinde rentgen nurlarınıń tásirinde payda bolatuǵın ionlardıń juplarınıń sanı Δn_0 di hám 1 sm^3 kólemde bar bolıwı múmkin bolǵan ionlardıń sanı n_0 di anıqlańız. Payda bolatuǵın ionlardı bir valentli dep esaplaw kerek.

Sheshimi. Toyınıw toǵınıń tıǵızlıǵı bolǵan i_t shamasınıń mánisi mınaǵan teń:

$$i_H = \frac{I_H}{S} = \frac{10^{-7}}{10^2} \text{ a/cm}^2 = 10^{-9} \text{ a/cm}^2.$$

Bir (bir valentli) ionnıń zaryadı q dıń shaması $1,6 \cdot 10^{-19}$ kl. Bunnan 183-paragraftaǵı (8)-formula boyınsha

$$\Delta n_0 = \frac{i_H}{ql} = \frac{10^{-9}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{cek}^{-1} = 1,25 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3} \cdot \text{cek}^{-1}$$

shamasına iye bolamız. 1 sm^3 kólemdegi ionlardıń juplarıńıń eń múmkin bolǵan sanı n_0 di 183-paragraftaǵı (2)-formula boyınsha anıqlaymız:

$$n_0 = \sqrt{\frac{\Delta n_0}{\gamma}}.$$

VIII kestege sáykes, hawa ushın $\gamma = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3 \cdot \text{cek}^{-1}$ ekenligin esapqa alıp mınaday mánisti alamız:

$$n_0 = \sqrt{\frac{1,25 \cdot 10^9}{1,67 \cdot 10^{-6}}} \text{ cm}^{-3} \cong 2,7 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-3}.$$

Atmosferalıq basımda 1 sm^3 hawada $2,7 \cdot 10^{19}$ molekula boladı. Demek, berilgen jaǵdayda rentgen nurları barlıq molekulalardıń tek 10^{-12} bólimin ǵana ionlastıra aladı eken. Bul ionizaciya elektrolitlerdegi ionizaciyanıń dárejesine salıstırǵanda júdá kishi. Ázzi eritpelerde erigen zattıń derlik barlıq ionları dissociaciyalanadı.

2-mısal. Jerdiń betindegi atmosferalıq hawada topıraqtıń radioaktivliginiń saldarınan hám kosmoslıq nurlardıń tásirinde 1 sek ishinde 1 sm^3 kólemde ionlardıń ortasha 5 jubı payda boladı. Hár qaysısınıń maydanı $S = 100 \text{ sm}^2$ bolǵan bir birinen $l = 5$ qashıqlıǵında jaylasqan eki elektrodtıń arasındaǵı toyınıw toǵınıń mánisin anıqlańız.

Sheshimi. 183-paragraftaǵı (8)-formula boyınsha mınaday ańlatpanı jazamız.

$$I_t = i_H S = \Delta n_0 q l S.$$

Payda bolǵan ionlar $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ k zaryadına teń dep esaplap (elektronnıń zaryadınday), mınaday nátiyjeni alamız:

$$I_t = 5 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^2 \text{ a} = 4 \cdot 10^{-16} \text{ a}.$$

Solay etip, atmosferalıq hawa júdá kishi bolsa da, biraq sezilerliktey tábiyiy óz betinshe emes ótkizgishlikke iye boladı eken.

3-mısal. Rentgen nurlarınıń tásirinde ionlastırılǵan hawada nurlardıń tásiiri toqtatılǵan momentten baslap qansha waqıttan soń ionlardıń jubınıń sanı eki ese tómenleydi.

Ionlardıń eń dáslepki sanın $n_0 = 10^6 \text{ sm}^{-3}$ shamasına teń dep esaplaymız.

Sheshimi.

$$n = \frac{n_0}{1 + \gamma n_0 t}$$

túrinde jazılatuǵın (3)-formulada moliziciyanıń saldarınan ionlardıń sanı eki ese kemeyetuǵın waqıt $t = \tau$ nı anıqlaytuǵın teńlemenı alamız:

$$\frac{1}{2} n_0 = \frac{n_0}{1 + \gamma n_0 \tau}.$$

Bunnan mınaday

$$\tau = \frac{1}{\gamma n_0}.$$

Bul teńlikke $n_0 = 10^6 \text{ sm}^{-3}$ hám $\gamma = 1,67 \cdot 10^{-6} \text{ sm}^3 \text{ sek}^{-1}$ shamaların qoyıp, ionlardıń juplarıńıń sanınıń eki ese kemeyetuǵın waqıt ushın

$$\tau = \frac{1}{10^6 \cdot 1,67 \cdot 10^{-6}} \text{ sek} = 0,6 \text{ sek}$$

shamasın alamız. Solay etip, 0,6 sek waqıt ótkennen keyin gazde ionlardıń eń dáslepki muǵarınıń yarımı qaladı.

4-mısal. 1-mısalda keltirilgen shártler boyınsha ionlardıń effektivlik diametrin tabıńız.

Sheshimi. Effektivlik diametr dep bólekshelerdiń erkin júriw jolınıń uzınlıǵın yamasa waqıt birligindegi bir biri menen soqlıǵısıwlarınıń sanın anıqlaytuǵın bólekshelerdiń diametrine aytatuǵınlıǵın atap ótemiz. Bunday jaǵdayda soqlıǵısatuǵın bólekshelerdi qattı sharikler túrinde qaraydı.

1-mısaldıń shárti boyınsha 1 sm^3 gazde 1 sek waqıttıń ishinde $\Delta n_0 = 1,25 \cdot 10^9$ dana ionlardıń jupları payda boladı. Teń salmaqlıq halda molizaciyanıń saldarınan 1 sm^3 kólemde 1 sek dawamında tap sonday muǵdardaǵı ionlardıń jubınıń joǵalıwı kerek. Ionlar óz-ara soqlıǵısıwlarıń nátiyjesinde neytrallanadı dep boljaymız.

I tomдағы 53-параграфта айтылғанлар бойынша бір birlik waqıtın ishinde molekula

$$\bar{z} = \sqrt{2} \cdot \pi \sigma^2 \bar{v} n_0$$

shamasına teń soqlıǵısıwlarǵa ushıraydı. Bul teńlikte σ - molekulanıń effektivlik diametri, $\bar{v}$ - molekulalardıń jıllılıq qozǵalıslarınń ortasha tezligi, n_0 - kólem birligindegi molekulalardıń sanı. Bul formulanı ionlardıń bir biri menen soqlıǵısıw sanın anıqlaw ushın qollanıp, biz n_0 shamasın kólem birligindegi ionlardıń jubı sıpatında qabıl etiwimiz kerek. Kólem birliginiń ishindegi barlıq ionlardıń soqlıǵısıwlarınń ulıwmalıq sanı mınaǵan teń boladı:

$$Z = \bar{z} n_0 \sqrt{2} \cdot \pi \sigma^2 \bar{v} n_0^2.$$

Biz qabıl etken boljaw boyınsha, Z sanı ionlardıń molizaciyalanǵan juplarınń sanı $\Delta n'_0$ ge teń bolıwı kerek:

$$\Delta n'_0 = \sqrt{2} \pi \sigma^2 \cdot \bar{v} n_0^2.$$

Bunnan

$$\sigma = \sqrt{\frac{\Delta n'_0}{\sqrt{2} \cdot \pi \bar{v} n_0^2}} \quad (5)$$

Ionlardıń jıllılıq qozǵalıslarınń sanı molekulalardıń jıllılıq qozǵalıslarınń sanına teń, yaǵnıy hawa ushın ójire temperaturasında $\bar{v} = 5 \cdot 10^4$ sm/sek shaması orın aladı. $\bar{v}$ nıń bul mánisin (5)-ańlatpaǵa qoyıp hám 1-mısaldıń maǵlıwmatları boyınsha $\Delta n'_0 = 1,25 \cdot 10^9$ sm⁻⁸·sek⁻¹ hám $n_0 = 2,7 \cdot 10^7$ sm⁻⁸ shamaları orınlı dep boljaw effektivlik diametr ushın mınaday shamalı alamız:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1,25 \cdot 10^9}{1,41 \cdot 3,14 \cdot 5 \cdot 10^4 \cdot (2,7 \cdot 10^7)^2}} \text{ sm} \cong 2,8 \cdot 10^{-6} \text{ sm}.$$

Neytral molekulalardıń effektivlik diametrleri $2,5 \cdot 10^{-8}$ sm shamasınıń átirapında; solay etip, ionlardıń effektivlik diametrleri shama menen 100 úlken eken. Bunı túsindiriw ańsat: hár qıylı belgige iye bolǵan zaryadlarǵa iye bolıp, ionlar bir biri menen elektrostatikalıq kúshler arqalı tartıladı. Bul, óz gezeginde, olardıń arasındaǵı soqlıǵısıwlarıń sanın úlkeytedi hám, soǵan sáykes olardıń effektivlik diametrleriniń úlkeyiwine alıp keledi.

Gazdıń aǵısı menen ionlardı irkiw jolı menen ionlardıń qozǵalgıshlıqların anıqlawdıń ápiwayı bolǵan usılın qaraymız. Meyli, A_1 hám A_2 ler gazge jaylastırılǵan eki tor bolsın (157-súwret). A_1 hám A_2 torlarınń arasındaǵı gaz qanday da sırtqı ionizatordıń tásirinde ionlastırılın. Eger A_1 torı teris, al A_2 torı oń zaryadlanǵan bolsa, onda teris ionlar A_2 torına qaray $u_- = u_-^0 E$ tezligi menen qozǵaladı. Bul teńlikte u_-^0 - ionlardıń qozǵalgıshlıǵı, E - torlardıń arasındaǵı maydannıń kernewlikleri. A_2 torına alıp kelinetuǵın zaryad elektrometrdiń járdeminde baqlanadı. Eger, endi gazdı A_2 torı arqalı A_1 torına qaray v tezligi menen úrlene baslasa (157-súwrette strelkalar menen kórsetilgen), onda ionlardıń A_2 torına qaray qozǵalıslarınń tezligi $u_-^0 E - v$ shamasına teń boladı. Gazdı úrlawdıń tezigi v nıń úlkeyiwı menen bul tezliktiń shaması kishireyedi. $u_-^0 E - v$ shamasınıń mánisi nolge teń bolǵanda teris zaryadlanǵan ionlar A_2 torına jetip bariwdı toqtatadı hám elektrometrdiń zaryadlanıwı toqtaydı. Solay etip, $u_-^0 E = v$ teńligi orınlanatuǵın momenttiń júzege keliwi múmkin. Bunnan v hám E shamalarınń mánisleri boyınsha teris ionlardıń qozǵalgıshlıǵı anıqlanadı.

A_1 hám A_2 torlarınń belgilerin ózgartip, tap usınday jollar menen oń ionlardıń qozǵalgıshlıǵı bolǵan u_+^0 shamaların da anıqlawǵa boladı.

Gazdıń basımı bir atmosferaǵa teń bolǵandaǵı hár qıylı ionlardıń qozǵalgıshlıqların ólshewdiń juwmaqları IX kestede keltirilgen.

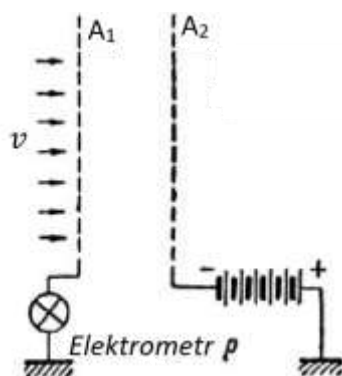
Keń sheklerde ionlardıń qozǵalgıshlıǵı basım p ǵa keri proporcional. Oń ionlardıń qozǵalgıshlıǵı maydannıń kernewligi E den sezilerliktey ǵárezli emes; júdá úlken bolmaǵan E maydanında teris ionlardıń da qozǵalgıshlıqları da maydannıń kernewligi E den ǵárezli emes. Biraq úlken E lerde kernewliktiń bunnan bılay ósiwi menen qozǵalgıshlıq ta ósedi. Solay etip, 183-paraграфта júdá úlken bolmaǵan E lerde ionlardıń tezlikleriniń maydannıń kernewligine proporcionallıǵı jóninde qabıl etilgen boljaw aqlanadı.

IX keste

$p = 1$ atm basımdağı hám 18°C temperaturadağı ionlardıń qozǵalǵıshlıǵı ($\text{sm}^2/\text{sek}\cdot\text{V}$)

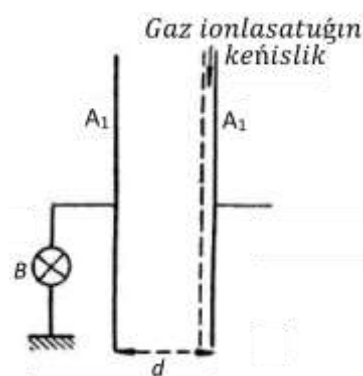
Gaz	u_+^0	u_-^0	$\frac{u_-^0}{u_+^0}$
Vodorod	5,91	8,26	1,4
Kislorod	1,29	1,79	1,4
Azot	1,27	1,84	1,4
CO	1,10	1,14	1,0
Xlor	0,65	0,51	0,8

Ionlardıń qozǵalǵıshlıqlarınıń, ayrıqsha teris zaryadlangan ionlardıń qozǵalǵıshlıqlarınıń gazdıń pataslanıwınan kúshli ǵárezli bolatuǵınlıǵın atap ótiw kerek. Oǵada kishi muǵdardaǵı qosımta, misalı kislorodtıń qosılıwı, teris zaryadlangan ionlardıń qozǵalǵıshlıqların onlaǵan, hátte júzlegen ese ózgerledi. 1 atm basımdaǵı kislorodtıń izleri bar geliyde $u_+^0 = 5,09 \text{ sm}^2/\text{sek}\cdot\text{v}$ hám $u_-^0 = 6,31 \text{ sm}^2/\text{sek}\cdot\text{v}$. Pútkilley taza bolǵan geliyde on zaryadlangan ionlardıń qozǵalǵıshlıǵı u_+^0 derlik ózgerissiz qaladı, al teris zaryadlangan ionlardıń qozǵalǵıshlıǵı bolǵan u_-^0 shamasınıń mánisi oǵada úlken bolǵan $500 \text{ sm}^2/\text{sek}\cdot\text{v}$ shamasına jetedi. Bul geliydi ionlastırǵanda qozǵalǵıshlıqları júdá joqarı bolǵan erkin elektronlardıń payda bolatuǵınlıǵı menen túsindiriledi. Kislorodtıń hesh bolmasa kishi izleri bolǵanda, elektronlar kislorodtıń neytral atomları menen qosıladı hám kishi jılıǵıshlıqqa iye bolǵan teris molekualıq ionlardı payda etedi.



157-súwret.

Ionlardıń qozǵalǵıshlıǵın júdá ápiwayı túrde anıqlawdıń usılı.



158-súwret. Ionlardıń qozǵalǵıshlıǵın anıqlaytuǵın usıldıń sxeması.

Ionlardıń qozǵalǵıshlıqların anıqlawdıń basqa usılınıń mánisi mınadan ibarat: Gaz tegis elektrod A_1 diń qasında ionlastırıladı (158-súwret). A_1 elektrodı menen oǵan parallel bolǵan A_2 elektrodınıń arasına waqıtqa baylanıslı dáwirli túrde ózgeretuǵın $E = E_0 \sin \frac{2\pi}{T} t$ maydanı túsiriledi. Bul ańlatpada t - waqıt, T - dáwir, E_0 - turaqlı shama. A_2 elektrodı B elektrometri menen tutasqan. Qozǵalǵıshlıǵı úlken bolǵan bir belgige iye ionlardı, misalı, teris ionlardı qaraymız. Hár bir berilgen momentte olar $u_- = u_-^0 E$ tezligine iye boladı. Maydanniń kernewligi E waqıtqa baylanıslı ózgeretuǵın bolǵanlıqtan, tezlik u_- da ózgeredi. Meyli, birinshi yarım dáwirde, yaǵnıy $t = 0$ den $t = \frac{T}{2}$ waqtına shekem E maydanı teris ionlardı A_2 elektrodına qaray tezletetuǵın bolsın. Bunday jaǵdayda kelesi yarım dáwirdiń ishinde maydan ionlardı qarama-qarsı baǵıtta, A_1 elektrodına qaray tezletedi. $t = 0$ den $t = \frac{T}{2}$ ge shekemgi waqıt ishinde ionlar mınaday joldı ótedi:

$$s = \int_0^{T/2} u_-^0 E_0 \sin \frac{2\pi}{T} t dt = \frac{T}{\pi} u_-^0 E_0.$$

Eger s shaması elektrodlardıń arasındaǵı qashıqlıq d dan kishi bolsa, onda A_1 elektrodınıń qasında payda

bolğan ionlar A_2 elektrodına jete almaydı hám onıń menen tutastırılğan B elektrometrдің strelkası awıspaydı. T dáwirin ózgertip, $s = d$ shártı orınlanatuǵın jaǵdaydı alıwǵa boladı. Bunday jaǵdayda zaryadlar A_2 elektrodına jetip keledi hám onı biz elektrometrдің strelkasınıń awısıwı boyınsha kóremiz. Bunday jaǵdayda

$$d = \frac{T}{\pi} u_-^0 E_0$$

teńligi orınlanadı hám belgili bolğan T, d hám E_0 shamaları boyınsha izlenip atırğan qozǵalǵıshlıq u_-^0 anıqlanadı.

Dáwir T jáne de úlkeytilse A_2 elektrodına (ekinshi yarım dáwirdiń ishinde) biziń boljawımız boyınsha ásterek qozǵalatuǵın oń ionlar da jetip keledi. Bunday jaǵdayda elektrometrдің awısıwı kishireydi. Usınday jollar menen basqa belgige iye bolğan ionlardıń qozǵalǵıshlıǵın anıqlawǵa boladı.

Ionlardıń qozǵalǵıshlıǵınıń iyeleytuǵın ornın kórsetetuǵın sanlı mısál keltiremiz.

Mısál. 1 sm^3 hawada teń salmaqlıq halda ionlardıń $n_0 = 10^7$ jubı bolatuǵınday dárejede rentgen nurları menen ionlastırılğan hawanıń ótkizgishligi σ nı anıqlańız. Ionlardıń zaryadın bir retlik dep esaplańız³⁴.

Sheshimi. 183-paragraftaǵı (6)-formula boyınsha mınaday arılatpanı jaza alamız:

$$\sigma = q n_0 (u_+^0 + u_-^0).$$

Ionnıń zaryadı q dı kulonlarda, n_0 dı sm^{-3} te hám u_+^0 menen u_-^0 shamaların $\text{sm}^2/\text{sek} \cdot \text{v}$ birlikleri menen alıp σ nı $\text{om}^{-1} \text{sm}^{-1}$ birliklerinde alamız. Hawanı tiykarınan azottan turadı dep esaplap, ionlardıń qozǵalǵıshlıqlarınıń qosındısı $u_+^0 + u_-^0$, ushın IX kestede keltirilgen maǵlıwmatlar boyınsha mınaday shamalı alamız:

$$u_+^0 + u_-^0 = 1,27 + 1,84 = 3,11 \text{ sm}^2/\text{sek} \cdot \text{v}.$$

Bunnan, $n_0 = 10^7 \text{ sm}^{-3}$ hám $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ k}$ mánislerin paydalanıp

$$\sigma = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^7 \cdot 3,11 \text{ om}^{-1} \cdot \text{sm}^{-1} \cong 5 \cdot 10^{-12} \text{ om}^{-1} \cdot \text{sm}^{-1}$$

shamasın alamız.

Bul nátiyjeni metallardıń ótkizgishligi menen salıstırıw qızıqlı. IV kestede keltirilgen maǵlıwmatlar boyınsha $\sigma = 6,4 \cdot 10^5 \text{ om}^{-1} \text{sm}^{-1}$. Bunnan berilgen mısaldıń shártlerinde ionizaciyalanğan hawanıń ótkizgishliginiń mısıń ótkizgishliginen shama menen 10^{17} ese kishi ekenligin kóremiz.

Elektrolitlerdiń ótkizgishligi olardıń quramı menen koncentraciyasınan ǵárezli. Mısál retinde 1 l suwǵa 2,92 g as duzı NaCl eritilgen jaǵdayda payda bolğan elektrolittiń ótkizgishligin esaplayıq

I tomnıń 85-paragrafında osmoslıq basım boyınsha bunday sharayatlarda NaCl molekularınıń 0,44 iniń ionlarǵa dissociaciyalanǵanlıǵın kórdik. Bul ionlardıń jubınıń sanınıń barlıq erigen molekularardıń sanınıń 0,44 bólegindey ekenligin ańǵartadı. NaCl dıń molekularlıq salmaǵı 58 ge teń bolǵanlıqtan, kólem birligindegi erigen molekularlardıń sanınıń mınaǵan teń bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı:

$$n_0 = \frac{2,92 \cdot 6 \cdot 10^{23}}{58 \cdot 1000} \text{ sm}^{-3} \cong 3 \cdot 10^{19} \text{ sm}^{-3}.$$

Bunnan kólem birligindegi ionlardıń jubınıń sanınıń

$$n'_0 = 0,44 \cdot 3 \cdot 10^{19} \text{ sm}^{-3} \cong 1,3 \cdot 10^{19} \text{ sm}^{-3}$$

shamasına teń ekenligi kelip shıǵadı. Elektrolittiń ótkizgishligin 178-paragraftaǵı (5)-formula boyınsha anıqlaymız:

$$\sigma = F \eta \alpha (u_+^0 + u_-^0) = n'_0 q (u_+^0 + u_-^0).$$

VII keste boyınsha elektrolittegi Na^+ hám Cl^- ionlarınıń qozǵalǵıshlıqlarınıń qosındısı

$$u_+^0 + u_-^0 = 0,000450 + 0,000677 \cong 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ sm}^2/\text{sek} \cdot \text{v}$$

shamasına teń hám bunnan mınaday shamalı alamız:

$$\sigma = 1,3 \cdot 10^{19} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ om}^{-1} \cdot \text{sm}^{-1} \cong 2,3 \cdot 10^{-3} \text{ om}^{-1} \cdot \text{sm}^{-1}.$$

Solay etip, kórsetilgen elektrolittiń ótkizgishligi biz keltirgen mısaldıǵıday ionlastırılğan hawanıń ótkizgishliginen shama menen 10^9 ese úlken boladı eken. Elektrolittiń bunday salıstırmalı úlken ótkizgishligi kólem birligindegi ionlardıń sanınıń úlken ekenligi menen túsindiriledi: 1 sm^3 elektrolittegi ionlardıń sanı 1 sm^3 rentgen nurlarınıń tásirinde ionlastırılğan hawadaǵı ionlardıń sanınan shama menen 10^{12} ese úlken; al elektrolittegi ionlardıń qozǵalǵıshlıqları gaz ionlarınıń qozǵalǵıshlıǵınan mıń ese kishi.

³⁴ "Bir retlik" dep aytqanda ionnıń zaryadınıń shamasınıń elektronnıń zaryadınıń shamasınday ekenligin ańǵartadı (Awdarıwshılar).

§ 185. Elektronlıq toqtıń vakuüm arqalı ótiwi. Óz betinshe emes bolǵan ótkizgishliktiń sheklik jaǵdayı sıpatında vakuüm, yaǵnıy qaldıq gazdıń basımı júdá kishi hám sonlıqtan elektronlardıń erkin júriw jolınıń uzınlıǵı elektrodlardıń arasındaǵı qashıqlıqtan úlken bolǵan ortalıq arqalı ótetuǵın elektronlıq toqtı qarawǵa boladı. 170-paragrafta biz vakuüm arqalı elektronlıq toqtı júzege keltiriw ushın metaldıń qızǵan beti sıyaqlı elektronlardıń deregin paydalanıwdıń kerek ekenligin kórdik.

Usınday jollar menen qızdırılǵan katod penen anodtıń arasında alınatuǵın elektronlıq toq Om nızamına baǵınbaydı. 170-paragrafta kórsetilip ótilgenindey toyınıw toǵı I_t ǵa salıstırǵanda kishi bolǵan I toqları ushın Boguslavskiy-Lengmyur formulasınıń orınlı ekenligin kórdik (186-paragraftaǵı kelip shıǵarılıwın qarańız):

$$I = \alpha(V_1 - V_2)^{3/2}. \quad (1)$$

Bul formula boyınsha toqtıń shaması potenciallar ayırmasınıń $3/2$ dárejesine proporcional ósedi. I diń potenciallar ayırması $V_1 - V_2$ den usınday ǵárezli bolıwı elektrodlardıń arasında elektronlıq bulttıń payda bolıwı menen baylanıslı. Potenciallar ayırması úlken bolǵanda toq katod tárepinen waqıt birliginde shıǵarılatuǵın elektronlardıń sanı n menen anıqlanatuǵın toyınıwǵa jetedi.

Qızǵan katodtı paydalanıp, tuwrı sıızqlı ushatuǵın elektronlardıń aǵısın alıwǵa boladı. K katodına úlken bolmaǵan b tesigi bar A anodın jaqın jaylastırısaq, biz elektronlıq yamasa katodlıq nur dep atalatuǵın elektronlardıń C dástesin alamız. Bul elektronlıq nurdı elektronlardıń bir qatar qattı denelerdiń betine kelip urılıwınıń saldarınan payda bolatuǵın jarqın jaqtılıqtıń shıǵıwı (lyuminescenciya) boyınsha tabıwǵa boladı. Bunday qattı denelerdiń qatarına uran shiyshe, villemıt, kúkirtli cink h.t.basqalar kiredi.

Katodlıq nurlar birinshi ret XIX ásirdiń ortasında baqlandı, biraq tek XX ásirdiń basında ǵana olardıń teris zaryadqa iye bolǵan elementar bólekshelerdiń - elektronlardıń aǵısı ekenligi anıqlandı.

Elektronlardıń soqlıǵısıwlar bolmaǵan jaǵdaylardaǵı qozǵalıwı elektr maydanı tárepinen $f = eE$ kúshiniń tásirinde júzege keledi (e arqalı elektronnıń zaryadı, E arqalı maydannıń kernewligi belgilengen). Bunday jaǵdayda maydannıń barlıq jumısı $A = e(V_1 - V_2)$, bul formulada $V_1 - V_2$ shaması arqalı elektronnıń jolınıń baslanǵısh hám aqırǵı noqatlarındaǵı potenciallar ayırması belgilengen, onıń kinetikalıq energiyası bolǵan E_k shamasınıń úlkeyiwi ushın jumsaladı. Eger baslanǵısh tezlik nolge teń bolsa, onda kinetikalıq energiyanıń shaması mınaǵan teń boladı:

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = e(V_1 - V_2). \quad (2)$$

168-paragrafta biz elektronnıń energiyasınıń muǵdarın elektronvoltler dep atalatuǵın ayırıqsha birlikte ólshewdiń qabıl etilgenligin aytıp ótken edik (qısqaşa eV). Bir elektronvolt elektronnıń ushlarındaǵı potenciallar ayırması 1 V bolǵan joldı ótkende alatuǵın energiyasınıń muǵdarına teń.

Sol paragrafta

$$1 \text{ eV} = 1,601 \cdot 10^{-12} \text{ erg}$$

teńliginiń orınlı ekenligi de kórsetildi. Kóp sanlı esaplawlarda N ese (N arqalı Avagadro sanı belgilengen) úlken bolǵan birlikti paydalanǵan qolaylı; bil birlik zattıń bir moline tiyisli bolǵan energiyanı kórsetedi hám ev/mol dep ataladı. Kórinip turganınday,

$$\begin{aligned} 1 \text{ ev/mol} &= 1,601 \cdot 10^{-12} \cdot 6,023 \cdot 10^{23} \text{ erg/mol} = \\ &= 9,643 \cdot 10^{11} \text{ erg/mol} = 23055 \text{ kal/mol}. \end{aligned}$$

Elektronnıń ushlarındaǵı potenciallar ayırması $V_1 - V_2$ shamasına teń bolǵan jol arqalı ótkendegi tezligi v nı ańsat anıqlawǵa boladı (baslanǵısh tezlikti nolge teń dep boljaymız):

$$v = \sqrt{\frac{2e}{m}} \sqrt{V_1 - V_2}. \quad (3)$$

Bul ańlatpaǵa elektronnıń zaryadı e menen massası m di qoyıp, mınanı alamız.

$$v(sm/sec) = 5,930 \cdot 10^7 \cdot \sqrt{V_1 - V_2(V)} \quad (3a)$$

Solay etip, elektronnıń tezligi onıń ótken jolınıń ushlarındaǵı potenciallar ayırmasınıń kvadrat korenine tuwrı proporcional eken. Ushlarındaǵı potenciallar ayırması 1 V bolǵan joldı ótkende elektron $5,93 \cdot 10^7 sm/sec$ shamasındaǵı tezlikke iye boladı.

X keste

Ushlarındaǵı potenciallar ayırması $V_1 - V_2$ shamasına teń bolǵan jaǵdaydaǵı elektronnıń tezligi v ushın alınǵan maǵlıwmatlar

$V_1 - V_2, V$	$v, \frac{sm}{sek}$	$\beta = \frac{v}{c}$
10^2	$5,93 \cdot 10^8$	0,0198
10^3	$1,88 \cdot 10^9$	0,0626
10^4	$5,85 \cdot 10^9$	0,195
10^5	$1,64 \cdot 10^{10}$	0,545
$5 \cdot 10^5$	$2,59 \cdot 10^{10}$	0,863
10^6	$2,82 \cdot 10^{10}$	0,9411

(3)-formula elektronnıń tezligi jaqtılıqtıń tezliginen kishi bolǵan jaǵdaylar ushın durıs. Elektronnıń tezliginiń shaması jaqtılıqtıń tezligine shamasqanda salıstırmalıq teoriyasına sáykes ózgerislerdi esapqa alıwǵa tuwrı keledi (218-paragrafqa hám I tomdaǵı 31-paragrafqa qarańız). X keste de ushlarındaǵı potenciallar ayırması $V_1 - V_2$ shamasına teń bolǵan jaǵdaydaǵı salıstırmalıq teoriyasınıń talapların esapqa alǵandaǵı elektronnıń tezlikleriniń mánisleri keltirilgen. Úshinshi baǵanada elektronnıń tezligi v nıń jaqtılıqtıń tezligi c ǵa qatnası keltirilgen³⁵.

X keste de keltirilgen maǵlıwmatlardan potenciallar ayırmasınıń shaması $V_1 - V_2 = 100 V$ bolǵanda elektronnıń haqıyqıy tezliginiń (3a) formula beretuǵın shamaǵa teń bolatuǵınlıǵın kóriwge boladı. Biraq potenciallar ayırmasınıń shaması $V_1 - V_2 = 10^6 V$ shamasına jetkende elektronnıń haqıyqıy tezligi $2,82 \cdot 10^{10} sm/sec$ shamasına teń boladı, al salıstırmalıq teoriyasınıń talapların esapqa almaytuǵın (3a)-formula boyınsha esaplangan tezlik v nıń shaması $5,93 \cdot 10^{10} sm/sec$ shamasına teń, yaǵnıy jaqtılıqtıń tezliginiń shamasınan da úlken bolǵan bolar edi. Al salıstırmalıq teoriyası boyınsha jaqtılıqtıń vakuumdıǵı tezliginen úlken tezlik bolmaydı.

Elektronlıq nur menen ótkerilgen tájiriye bizde elektronlar haqqında massaǵa hám elektr zaryadına iye, belgili bolǵan traektoriyalar boyınsha qozǵalatuǵın bólekshe haqqındaǵı kóz-qaraslardı payda etedi. Biraq I tomdaǵı 31-paragrafta klassikalıq mexanikanıń qollanıw shegaraları haqqında gáp etkenimizde biz elementar bólekshegerge (ayırım elektronlarǵa, protonlarǵa h.t.b.) klassikalıq "bólekshegerge" qollanıwı múmkin bolǵan kóz-qaraslardı paydalanıwǵa bolmaytuǵınlıǵın atap óttik. Elementar bólekshe gáptiń ádettegi mánisindegi "bólekshe emes" hám onıń ushın traektoriya haqqındaǵı túsinikti qollanıwǵa bolmaydı.

³⁵ Kitaptıń avtorları "salıstırmalıq teoriyasına sáykes massanıń tezlikke baylanıslı bolıwı" túsigin keńnen qollanadı. Biraq, biz massanıń relyativistlik invariant ekenligin jáne eske salamız hám elektronnıń tolıq energiya menen tezliginiń arasında

$$E = \frac{m_e c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{m_e c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

túrindegi qatnastıń bar ekenligin atap ótemiz (m_e arqalı elektronnıń massası belgilengen). Sonlıqtan elektronnıń kinetikalıq energiyası ushın $E_{kin} = \frac{m_e c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - m_e c^2$ shamasına teń boladı. Bul ańlatpada $m_e c^2$ arqalı elektronnıń tınıshlıqtaǵı energiyası belgilengen. Nátiyjede elektronnıń kinetikalıq energiyası menen onıń tuwrı sızıqlı jolınıń ushlarındaǵı potenciallar ayırması $V_1 - V_2$ arasında mınaday qatnas orın aladı:

$$E_{kin} = e(V_1 - V_2).$$

Elementar bóleksheler anıqsızlıq qatnasları dep atalatuǵın qatnaslarǵa baǵınadı hám soǵan sáykes, olardıń hár qaysısınıń dál anıqlanǵan koordinata hám dál anıqlanǵan tezliktiń vektori menen anıqlanıwı múmkin emes³⁶. Anıqsızlıq qatnasları boyınsha koordinata x hám tezliktiń v_x qurawshısınıń bir waqıtta tek Δx hám Δv_x dálliklerinde ǵana anıqlanıwı múmkin:

$$\Delta x \cdot \Delta v_x \geq \frac{h}{m}. \quad (4)$$

Bul ańlatpada m — bóleksheniń massası, al $h = 6,624 \cdot 10^{-27}$ erg·sek turaqlı bolıp tabıladı hám onı *Plank turaqlısı* dep ataydı.

Keyinirek (III tomǵa qarańız) tek júdá puqtalıq penen ótkerilgen tájiriybelerdiń (4)-qatnasqa alıp keletuǵınlıǵın kóremiz hám sonda onıń fizikalıq mánisin tolıq ayqınlastıramız... Haqıyqatında bul qatnas klassikalıq mexanikanıń kóz-qaraslarınıń elementar bólekshelerge qollanıwınıń sheklerin ǵana kórsetedi. Sonlıqtan, qanday jaǵdaylarda elektronlar haqqındaǵı kóz-qaraslardan paydalanıwǵa bolatuǵınlıǵı, al qanday jaǵdaylarda elektronlardı klassikalıq mexanikanıń "bóleksheleri" sıpatında qarawǵa bolatuǵınlıǵın anıqlaw múmkin eken.

Biz joqarıda elektronlıq "dáste" kóz-qarasını tiykarında tallaǵan jaǵdaylardıń barlıǵınıń (4)-qatnasqa sáykes keletuǵınlıǵın ańsat kóriwge boladı.

Onıń ushın biz I tomdaǵı 31-paragraftaǵı mısaldı eske túsiriwimiz kerek. Eger dásteniń keńligi $\Delta x = 10^{-2}$ sm bolsa (al táriyiplengen tájiriybelerde biz dásteniń keńligin onnan da dál anıqlay almaymız), onda (4)-qatnas boyınsha

$$\Delta v_x \sim \frac{h}{m \cdot \Delta x} \cong \frac{6,6 \cdot 10^{-27}}{9 \cdot 10^{-28} \cdot 10^{-2}} \text{ sm/sek} \cong 7 \cdot 10^2 \text{ sm/sek}$$

shamasın alamız.

Biraq, barlıǵı bolıp 1 V bolǵan tezletiwshi potencialda (al, elektronlıq dástelerdi alatuǵın trubkalardaǵı tezleniwshi potencialardıń shaması oǵan salıstırǵanda ádewir joqarı) (3a)formulası boyınsha elektronnıń tezligi $v \cong 5,9 \cdot 10^7$ sm/sek shamasına teń hám, usıǵan sáykes, (4)-qatnas tárepinen talap etiletuǵın Δv_x shamasınıń mánisi tezliktiń shama menen 0,001 % mánisin quraydı, yaǵnıy eksperimenttiń múmkin bolǵan dálliginiń sheklerinen alısta qaladı. Bunnan, táriyiplengen tájiriybelerde, tap sol sıyaqlı usı tomda qarap ótiletuǵın basqa tájiriybelerde de, elektrondı biz ádettegi "bólekshe" sıpatında qarawǵa bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı.

§ 186. Boguslavskiy-Lengmyur formulasın keltirip shıǵarıw; toq kúshiniń fluktuaciyaları. Ápiwayılıq ushın, bir birine parallel jaylasqan eki sheksiz úlken tegis elektrod berilgen dep boljaymız (160-súwret). Elektrodlardıń arasındaǵı qashıqlıqtı d arqalı belgileyміз, shep táreptegi elektrodtı katod dep esaplaymız hám onıń potencialın nolge teń etip alamız: $V_K = 0$. Oń táreptegi elektrodtıń (anodtıń) potencialın V_A arqalı belgileyміз. Katod elektronlardıń deregi bolıp tabıladı.

Maydan tárepinen tezletiletuǵın elektronlar bir elektrodta ekinshisine qaray qozǵaladı hám toqtı payda etedi.

OX kósherin elektrodlarǵa perpendikulyar etip túsireміз. Elektrodlardıń jaylasıwlarında simmetriya bolǵanlıqtan, elektronlıq bult tárepinen payda etiletuǵın zaryadlardıń kólemlik tıǵızlıǵınıń mánisi ρ tek x koordinatasınan ǵárezli boladı, ekvipotenciallıq betler elektrodlarǵa parallel bolıp jaylasadı hám maydannıń kernewligi vektori E hámme orınlarda OX kósheri menen baǵıtlas.

Toqtıń tıǵızlıǵı i san mánisi boyınsha bettiń bir birliǵi arqalı waqıt birliǵinde alıp ótilgen zaryadtıń muǵdarına teń.

Stacionar rejimde toqtıń tıǵızlıǵı i waqıt boyınsha turaqlı hám x koordinatasınıń barlıq mánisleri ushın birdey.

Zaryadlardıń kólemlik tıǵızlıǵı ρ menen V potencialınıń arasındaǵı baylanıs 132-paragraftaǵı (3)-formula menen beriledi:

³⁶ Kvantlıq mexanikadaǵı anıqsızlıq principini dep atalatuǵın princip nemis fizigi Verner Geyzenberg tárepinen 1927-jılı ashıldı hám ol fizikalıq kvantlıq mexanikanıń eń tiykarǵı principleriniń bir bolıp tabıladı (Awdarıwshılar).

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = -4\pi\rho. \quad (1)$$

Biz qarap atirğan jaǵdayda V potentsialı tek elektrodlardırn tegisligine perpendikulyar baǵıtta ǵana, yaǵnıy OX kósheriniń baǵıtında ǵana ózgeredi; sonlıqtan V nıń x koordinatası boyınsha tuwındısı ǵana nolge teń emes hám (1)-teńlik mınaday túrge enedi:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = -4\pi\rho. \quad (2)$$

Termoemissiyada elektronlar katodtan jıllılıq tezlikleri menen ushıp shıǵadı. Olar elektronlar tárepinen ádettegidey sırtqı elektr maydanınıń tásirinde alatuǵın tezliklerden kishi. Sonlıqtan elektronlardırn dáslepki tezliklerin nolge teń dep esaplaymız. Bunday jaǵdayda elektronlar elektrodlardırn arasındaǵı V potentsiallar ayırması menen táriyiplenetuǵın noqatqa jetkende

$$\frac{mv^2}{2} = eV \quad (3)$$

formulasınıń járdeminde anıqlanatuǵın v tezligine iye boladı. i toqtırn tıǵızlıǵı kólemlik zaryadtırn tıǵızlıǵı ρ hám elektronlardırn qozǵalıstırn tezligi arqalı

$$i = -\rho v \quad (4)$$

teńlegi boyınsha anıqlanadı. Bul teńliktiń oń tárepinen minus belgisi qoyılǵan, sebebi i vektorınıń baǵıtı oń zaryadlardırn qozǵalıstırn baǵıtına sáykes keledi.

(2)-, (3)- hám (4)-ańlatpalardan mınanı tabamız:

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = 4\pi i \sqrt{\frac{m}{2e}} \cdot V^{-1/2}.$$

Bul teńliktiń oń hám shep táreplerin $\frac{dV}{dx} dx$ shamasına kóbeytip

$$\frac{d^2 V}{dx^2} \cdot \frac{dV}{dx} dx = 4\pi i \sqrt{\frac{m}{2e}} \cdot V^{-1/2} \cdot \frac{dV}{dx} dx \quad (5)$$

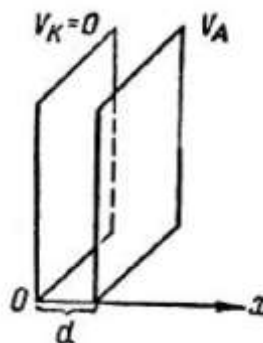
teńligine iye bolamız. (5)-teńlikti 0 den x qa shekem integrallap, mınanı jaza alamız:

$$\int_0^x \frac{d^2 V}{dx^2} \cdot \frac{dV}{dx} dx = 4\pi i \sqrt{\frac{m}{2e}} \int_0^x V^{-1/2} \cdot \frac{dV}{dx} dx. \quad (6)$$

SHárt boyınsha $x = 0$ teńligi orınlanganda $V = 0$ bolıwı kerek; usınıń menen birge bizge $x = 0$ teńligi orınlanganda $\frac{dV}{dx} = 0$ teńligi de orınlanadı dep esaplaw kerek boladı.

160-súwret.

Boguslovskiy-Lengmyur formulasın keltirip shıǵarıwǵa.



Bul sońǵı shárt mınaday jaǵdaylardan kelip shıǵadı: katodtırn qasında sol katodtırn elektronları tek diffuziyanıń esabınan kelip jetetuǵın elektronlıq bult payda boladı. Demek, katodtırn qasında maydannıń kernewligi $E = 0$, bunnan mınaday talap kelip shıǵadı:

$$\frac{dV}{dx} = 0.$$

Bunday sharayatlarda (6)-teńlikti integrallawdıń nátiyjesinde tómendegidey ańlatpanı alamız:

$$\left(\frac{dV}{dx}\right)^2 = 16\pi i \sqrt{\frac{m}{2e}} \cdot V^{1/2}$$

yamasa

$$\frac{dV}{V^{1/4}} 4\sqrt{\pi i} \cdot \sqrt[4]{\frac{m}{2e}} \cdot dx.$$

Bul ańlatpanı x tıń ózgeriw sheklerin bolǵan 0 den d ǵa shekem integrallaymız:

$$\int_0^{V_A} \frac{dV}{V^{1/4}} = 4\sqrt{\pi i} \cdot \sqrt[4]{\frac{m}{2e}} \cdot \int_0^d dx.$$

$x = 0$ noqatında $V = 0$ hám $x = d$ noqatında $V = V_A$ teńlikleri orınlı bolǵanlıqtan, shep táreptegi integral ushın integrallaw shegi sıpatında 0 hám V_A shamaların aldıq. Integrallaw

$$\frac{4}{3} V_A^{3/4} = 4\sqrt{\pi i} \cdot \sqrt[4]{\frac{m}{2e}} \cdot d$$

teńligin beredi. Bul teńlikti toqtıń tıǵızlıǵı i ge qarata sheship,

$$i = \frac{\sqrt{2}}{9\pi} \sqrt{\frac{e}{m}} \cdot \frac{1}{d^2} \cdot V_A^{3/2} \quad (7)$$

ańlatpasına iye bolamız. Toqtıń tıǵızlıǵı i dan ulıwmalıq I toǵına ótiw ushın i shamasın elektronlardı emitterleytuǵın bettiń maydanı S ke kóbeytiw kerek:

$$I = iS.$$

Usınıń menen birge biziń belgilewlerimizde V_A shamasınıń elektrodlardıń arasındǵı potenciallar ayırması $V_1 - V_2$ ge sáykes keletuǵınlıǵın esapqa alsaq, onda (7)-ańlatpadan mınaday formulanı alamız:

$$I = \frac{S\sqrt{2}}{9\pi} \cdot \sqrt{\frac{e}{m}} \cdot \frac{1}{d^2} (V_1 - V_2)^{3/2}.$$

Bunday jaǵdayda

$$\frac{S\sqrt{2}}{9\pi} \cdot \sqrt{\frac{e}{m}} \cdot \frac{1}{d^2} = \alpha$$

belgilewin qabıl etsek (bul jaǵdayda α shaması elektrodlardıń berilgen ólshemleri menen jaylasıwları ushın turaqlı shama), onda mınaday formulanı alamız:

$$I = \alpha (V_1 - V_2)^{3/2}.$$

Bul formula 172-paragraftaǵı (3)-formula menen birdey.

Júdá ázzi bolǵan elektronlıq toqta waqıt birliǵi ishinde anodqa jetip kelgen elektronlardıń sanı n úlken emes. Bunday jaǵdaylarda toqtıń kúshi I diń frukuaciyaıarı seziledi. Toqtıń kúshiniń bul flukuaciyaıarı I tomnda esletilip ótilgen gazdıń basımınıń, onıń tıǵızlıǵınıń h.t.b. flukuaciyaıarına uqsas; olardıń júzege keliwi elektr zaryadlarıńnıń úzlikli bolǵan "avtomat" tábiyatı, yaǵnıy elektronlardıń bar bolıwı menen baylanıslı.

Baqlaw waqtın bir birine teń bolǵan kishi Δt waqıtlarına bólemiz. Bunday jaǵdayda anodqa Δt waqtı ishinde jetip barǵan elektronlardıń ortasha sanı $\bar{n}_{\Delta t}$ shamasına teń. Hár bir ayırım $\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_k \dots$, waqıt aralıqlarında katodtan ushıp shıǵıwdıń tártipli emes ekenligine baylanıslı anodqa jetip barǵan elektronlardıń sanı $n_{\Delta t_k}$ ortasha mánis bolǵan $\bar{n}_{\Delta t}$ shamasınan ayırmaǵa iye boladı:

$$n_{\Delta t_1} = \bar{n}_{\Delta t} + \delta_1 n$$

$$n_{\Delta t_2} = \bar{n}_{\Delta t} + \delta_2 n$$

...

$$n_{\Delta t_k} = \bar{n}_{\Delta t} + \delta_k n$$

...

Usı jaǵdayǵa baylanıslı $I_k = n_{\Delta t_k} \cdot \frac{e}{\Delta t_k}$ toq kúshleri de (bul teńliktegi e - elektronnıń zaryadı), berilgen Δt_k waqıt aralıǵında baqlanatuǵın ortasha mánisler bir birinen ayırıldı:

$$I_1 = \bar{I}_{\Delta t} + \delta_1 I$$

$$I_2 = \bar{I}_{\Delta t} + \delta_2 I$$

...

$$I_k = \bar{I}_{\Delta t} + \delta_k I$$

...

Bul teńliklerde $\bar{I}_{\Delta t} = \bar{n}_{\Delta t} \cdot \frac{e}{\Delta t}$ arqalı waqıt aralıqlarınıń barlıǵındaǵı toqtıń kúshiniń ortasha mánisleri belgilengen.

Sáykes statistikalıq esaplaw toqtıń kúshiniń ortasha kvadratlıq awısıwı bolǵan $\overline{\delta_k I^2}$ shamasınıń

mınağan teń ekenligin kórsetedi:

$$\overline{\delta_k I^2} = \frac{\bar{I}_{\Delta t} \cdot e}{\Delta t}. \quad (8)$$

Eger biz baqlawdı úlken Δt waqıt aralığında ótkeretuǵın bolsaq, onda bul awısıwdır shaması sonshama kishi boladı: bul nátiye ayqın, sebebi waqıttır úlken aralıqlarında katodtan shıqqan elektronlardır sanınıń tosınan ózgeriwiniń saldarınan kelip shıǵatuǵın toqtır kúshiniń shamasındaǵı úlkeyiwler menen kishireyiwler jaqsıraq tegislenedi. Ekinshiden, $\overline{\delta_k I^2}$ awısıwınıń mánisi elektronnır zaryadınıń shaması e den ǵárezli. Teoriyanır bul nátiyesi de túsinikli: misalı, eger elektronnır zaryadı bolǵan e shaması haqıyqıy mánisinen úlken bolsa, onda toqtır kúshiniń shaması burınday bolǵan jaǵdayda ushıp shıǵatuǵın elektronlardır sanı kishi bolǵan bolar edi hám, usıǵan sáykes, toqtır kúshiniń ortasha mánisten awısıwı sezilerliktey bolǵan bolar edi.

Tok kúshiniń sonday bolıp "dirildewin" elektr hám magnetizmde "túyirtpek" effekt dep ataydı hám elektronlardır dástesiniń túyirtpeklerdiń aǵısı menen uqsas ekenligin kórsetedi.

Fluktuaciyalıq terbelislerdi garmonikalıq qurawshılardıǵa jayıwǵa boladı. Terbelislerdiń tártipsiz bolǵanlıǵı sebepli olardı múmkin bolǵan ν jıyiliklerine iye bolǵan sheksiz kóp sanlı qurawshılardıǵa, yaǵnıy *tutas spektrge* jayıwǵa boladı (I tomǵa qarańız). Eger fluktuaciyalıq terbelislerdi mikrofonnır járdeminde baqlaytuǵın bolsaq, onda olar shawqımdı payda etedi; bunnan toqtır fluktuaciyalıq terbelisleriniń ataması bolǵan *elektrlik shawqımlar* ataması payda boldı.

Túyirtpelik effektte elektronlardır katod trubkası arqalı ushıp ótiw waqtına shekemgi dáwirge shekem ($\sim 10^{-8}$ sek) barlıq jıyilikler ushın garmonikalıq qurawshılardıń amplitudaları birdey. Eger katod lampasın (137-súwret) R qarsılıqqa T temperaturaǵa iye shinjır dep qarasaq, onda lampanıń elektrodlarında payda bolatuǵın potenciallyar ayırmasınıń fluktuaciyalıq ayırmasınıń amplitudasınıń ortasha kvadratlıq mánisi mınağan teń boladı:

$$\overline{\delta V^2} = 4kTR\Delta\nu. \quad (9)$$

Bul teńlikte k - Bolcman turaqlısı hám $\Delta\nu$ - jıyiliklerdiń ayırıp alınǵan intervalınıń keńligi. Anod toǵınıń fluktuaciyalıq terbelisleriniń amplitudasınıń ortasha kvadratlıq mánisi $\overline{\delta I_a^2}$ mınağan teń

$$\overline{\delta I_a^2} = 4kT \frac{\Delta\nu}{R}. \quad (10)$$

Eger lampa kólemlik zaryadlar bolmaǵan jaǵdayda isleytuǵın bolsa, onda sońǵı formulanı bılayınsha kóshirip jazıwǵa boladı:

$$\overline{\delta I_a^2} = 2eI_a\Delta\nu. \quad (10a)$$

Qızǵan katodtan ushıp shıǵatuǵın elektronlardır tártipsiz jıllılıq qozǵalıslarınıń úzlisiz fluktuaciyalardıǵa ushıraytuǵınlıǵına baylanıslı joqarıda kórsetilgen terbelisler payda boladı. Olardıń amplitudası temperaturadan ǵárezli hám onır kishireyiwi ushın tek temperaturanı tómendetiw kerek boladı. Toqtır kúshiniń fluktuaciyalıq terbelisleri elektrlik ólshewlerdiń dáligin anıqlaydı. Ólshenetuǵın toqtır shaması onır fluktuaciylarınıń shamasınan úlken bolıwı kerek.

Usınday fluktuaciylar menen bir qatarda katodlıq lampada katodtır betiniń ayırım uchastkalarınır aktivliginiń ózgerisiniń esabınan emissiya toǵınıń ózgeriwi de múmkin. Anod toǵınıń $\nu \approx 10^{-3} \text{ sek}^{-1}$ jıyiligindegi toqtır kúshiniń terbelislerine alıp keletuǵın usınday ózgerisler Djonson tárepinen ashıldı hám "jıltıldaw" atamasına iye boldı.

Rezonanslıq konturdiń járdeminde toqtır kúshiniń fluktuaciyalıq terbelisleriniń garmonikalıq qurawshılardıń birin ayırıp alıp, onır amplitudasınıń ortasha kvadratlıq mánisin ólshewge boladı. $\overline{\delta I_a^2}$ shamasınıń ólshewde alınǵan mánisi menen (10a) formulasınıń járdeminde esaplaw jolı menen alınǵan mánisin salıstırıw elektronnır zaryadı e ni anıqlawǵa múmkinshilik beredi. Usınday jollar menen ótkerilgen ólshewlerdegi baqlawlardır dáliginde (1%) elektronnır zaryadınıń shaması ushın basqa usıllar menen ólshewlerde alınǵan mániske sáykes keletuǵın shama alındı.

Toqtır tıǵızlıǵınıń fluktuaciyalıq terbelisleri erkin elektronlardır alıp júriw menen toq payda bolatuǵın tek elektronlıq lampalarda ǵana emes, al toqtır qálegen ótkizgishlerinde de orın aladı (metallarda, yarım ótkizgishlerde, elektrolitlerde).

§ 187. Elektronlardır gazdegi erkin júriw jolınıń uzınlıǵı. Gaz ortalıqta qozǵalıslarınıń barısında elektron atomlar hám molekularlar menen soqlıǵısadı. Onır erkin júriw jolınıń uzınlıǵın molekularlardır erkin júriw jolınıń uzınlıǵın anıqlaǵandaǵı tallawlardır járdeminde anıqlawǵa

boladı.

I tomnıń 53-paragrafında biz molekulardıń erkin júriw jolınıń ortasha uzınlıǵın anıqlaǵan edik:

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 n_0}. \quad (1)$$

Bul formulada n_0 - molekulardıń kólem birligindegi sanı, σ - molekulardıń effektivlik diametri; dálirek aytqanda σ shaması soqlıǵısıwshı molekulardıń effektivlik radiusları bolǵan r hám r' shamalarınıń qosındısı bolıp tabıladı: $\sigma = r + r'$. Eń aqırında bólshektiń bólimindegi $\sqrt{2}$ sanınıń soqlıǵısıw processine barlıq molekulardıń, yaǵnıy "ushıp kelip basqa molekula menen soqlıǵısatuǵın" hám "basqa molekula ushıp kelip urılatuǵın" molekulardıń qatnasatuǵınlıǵına baylanıslı payda bolǵanlıǵın eske túsiremez. Elektronnıń erkin júriw jolınıń ortasha uzınlıǵın tapqımız keletuǵın bolsa, biz eki jaǵdayda esapqa alıwımız kerek: birinshiden, elektronnıń ólshemleri atomlar menen molekulardıń ólshemlerinen júdá kishi, sonlıqtan effektivlik diametr ushın jazılǵan $\sigma = r + r'$ ańlatpasında molekulanıń radiusı r diń qasında elektronnıń radiusı r' tı esapqa almawǵa boladı; ekinshiden, massasınıń kishi bolıwına baylanıslı elektronnıń tezligi molekulardıń tezliginen júdá úlken, sonlıqtan (1)-formulanıń bólimindegi $\sqrt{2}$ kóbeytiwshisin saqlawdıń zárurlıǵı joq.

Usınıń nátiyjesinde elektronlardıń erkin júriw jolınıń ortasha uzınlıǵı ushın

$$\bar{\lambda}_e = \frac{1}{\pi r^2 n_0} \quad (2)$$

ańlatpasına iye bolamız. Bul ańlatpada r - elektron qozǵalatuǵın gazdıń molekularınıń effektivlik radiusı.

Elektronlardıń erkin júriw jolınıń ortasha uzınlıǵı bolǵan $\bar{\lambda}_e$ shaması, molekulardıń erkin júriw jolınıń ortasha uzınlıǵı sıyaqlı gazdıń basımı p ǵa keri proporcional.

(1)-formulada berilgen gazdıń molekuları ushın (yaǵnıy, $r = r'$ teńligi orınlanganda) effektivlik diametr $\sigma = 2r$, bunnan (1)- hám (2)-formulalardı salıstırıw arqalı mınaǵan iye bolamız:

$$\bar{\lambda}_e = 4\sqrt{2} \cdot \bar{\lambda} \cong 5,6\bar{\lambda}.$$

Demek, elektronlardıń erkin júriw jolınıń ortasha uzınlıǵı tap sonday basımdaǵı gaz molekulasınıń erkin júriw jolınıń uzınlıǵınan shama menen 5,6 ese úlken boladı eken.

Hár qıylı gazlerdegi jáne hár qıylı basımlardaǵı elektronlardıń erkin júriw jolınıń ortasha mánisi bolǵan $\bar{\lambda}_e$ shamasınıń san mánisleri XI kestede berilgen.

XI keste

0°C temperaturadaǵı elektronnıń erkin júriw jolınıń
ortasha mánisleri $\bar{\lambda}_e$ (sm lerdegi)

Gaz	Basım		
	1 mm Hg	10^{-2} mm Hg	10^{-4} mm Hg
He	$7,4 \cdot 10^{-2}$	7,4	740
Ne	$6,6 \cdot 10^{-2}$	6,6	660
Ar	$4,4 \cdot 10^{-2}$	4,4	440
H ₂	$7,5 \cdot 10^{-2}$	7,6	750
N ₂	$3,6 \cdot 10^{-2}$	3,6	360
O ₂	$4,1 \cdot 10^{-2}$	4,1	410

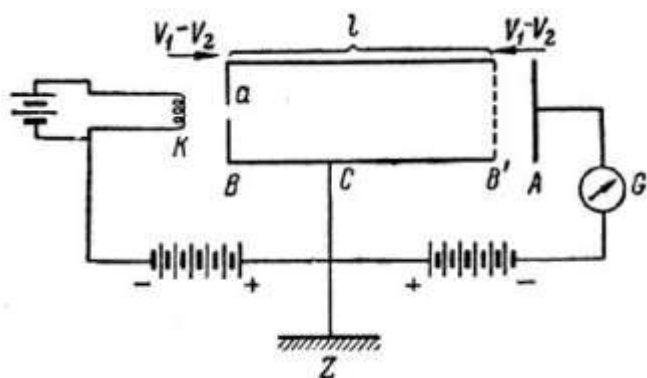
Eskertiw: "1 mm Hg" 1 mm sinap baǵanasınıń basımı mánisin beredi (Awdarıwshılar).

XI kestede keltirilgen maǵlıwmatlardan házirgi waqıtlardaǵı vakuumlıq nasoslardıń járdeminde ańsat alınatuǵın 10^{-4} mm Hg basımlarda elektronlardıń erkin júriw jolınıń uzınlıǵınıń

bir neshe metrge jetetuǵınlıǵı kórinip tur. Sızıqlı ólshemleri bir neshe onlaǵan santimetr bolǵan ıdıslarda jaqsı sheklengen jayılmagan elektronlıq dástelerdiń alınatuǵınlıǵı usı jaǵday menen túsindiriledi.

Elektronlardıń erkin júriw jolınıń ortasha uzunlıǵın eksperimentte molekualıq dásteni paydalanıp, gaz molekularınıń erkin júriw jolınıń ortasha uzunlıǵı anıqlaw tájiriybesiniń ideyası menen sáykes keletuǵın usıldıń járdeminde anıqlawǵa boladı (I tomdaǵı 54-paragraftı qarańız).

Bul usıldıń sxeması 161-súwrette keltirilgen: K elektronlardıń deregi bolıp tabılatsuǵın qızdırılǵan katod; B - α tesigi bar anod. Ásbaptıń barlıq bólimi basımı tómén bolǵan ıdıstıń ishinde jaylasqan. B anodı K katodınan elektronlardıń erkin júriw jolınıń ortasha mánisinén kishi qashıqlıqta jaylasqan. Anod penen katodtıń arasında $V_1 - V_2$ shamasına teń tezletiwshi potenciallar ayırması túsirilgen hám onıń tásirinde elektronlarǵa belgili bolǵan tezlik beriledi. α tesigi arqalı ótip, elektronlar C metall cilindriniń ishinde qozǵalatuǵın dásteni payda etedi. Bul cilindriniń potencialı B anodınıń potencialı menen birdey. C cilindri B' torı menen tamam boladı. Solay etip, C cilindriniń ishinde maydan joq hám elektronlar turaqlı tezlik penen qozǵaladı. B' torı arqalı ushıp ótip, olar A elektrodına kelip túsedi hám oǵan óziniń zaryadın beredi. C cilindriniń uzunlıǵı elektronlardıń erkin júriw jolınıń ortasha uzunlıǵınan úlken, al A elektrodı B' torınan $\bar{\lambda}_e$ shamasınan kóp kishi qashıqlıqta jaylasqan.



161-súwret.
Elektronlardıń erkin júriw jolınıń ortasha
uzunlıǵın anıqlaw usılınıń sxeması.

Dásteniń bazı bir elektronları C cilindriniń ishinde gazdıń molekuları menen soqlıǵısa, sońır nátiyesinde olar bir qaptalǵa burıladı hám sol C cilindriniń ishki bólimine qaray yamasa B' torına qıya baǵıtta ushıp keledi. A elektrodı menen B' torınıń aralıǵına K katod penen A anodınıń aralıǵına túsirilgen tezletiwshi potenciallar ayırmasına teń bolǵan $V_1 - V_2$ irkiwshi potenciallar ayırması túsiriledi. Bunday jaǵdayda B' torına perpendikulyar baǵıtta qozǵalatuǵın elektronlar, yaǵnıy soqlıǵısıwǵa ushıramaǵan elektronlar A anodına jetip keledi hám G galvanometri menen ólshenetuǵın I toǵın payda etedi.

B anodınan qashıqlıǵı l di ózgertiw ushın A elektrodı menen B' torın qozǵalatuǵın etip isleydi.

I tomdaǵı 54-paragrata keltirilgen formula boyınsha dásteniń l jolın soqlıǵısıwıarsız ótken bóleksheleriniń sanı

$$n = n_0 e^{-l/\bar{\lambda}}$$

shamasına teń. Bul formulada n_0 - dástedegi bólekshelerdiń eń dáslepki waqıttaǵı sanı, al $\bar{\lambda}$ - olardıń erkin júriw jolınıń ortasha uzunlıǵı.

Bul formulanı elektronlıq dáste ushın da qollanıwǵa boladı: bul formula waqıt birliginde A anodına jetken elektronlardıń sanı n di beredi.

Toqtıń kúshi I elektronlardıń sanı n ge proporcional bolǵanlıqtan

$$I = I_0 e^{-l/\bar{\lambda}_e}$$

arılatpasın jaza alamız.

Birdey basımlarda hám toqtıń birdey I_0 baslanǵısh mánisleri ushın l diń hár qıylı bolǵan eki mánisindegi I toq kúshiniń mánislerin esaplaymız. Bunday jaǵdayda

$$I_1 = I_0 e^{-l_1/\bar{\lambda}_e}, I_2 = I_0 e^{-l_2/\bar{\lambda}_e}$$

hám bunnan

$$\frac{I_1}{I_2} = e^{-(l_1-l_2)/\bar{\lambda}_e}$$

teńliklerine iye bolamız. Sońǵı formuladan elektronnıń erkin júriw jolınıń ortasha mánisi $\bar{\lambda}_e$ ushın tómendegidey ańlatpanı alamız:

$$\bar{\lambda}_e = \frac{l_2 - l_1}{\ln I_1/I_2}.$$

l_1 menen l_2 qashıqlıqları da, I_1 hám I_2 toq kúshleri de tikkeley ólshenetuǵın bolǵanlıqtan, usınday jollar menen $\bar{\lambda}_e$ shamasınıń mánisi anıqlanadı.

Eksperimentallıq maǵlıwmatlar elektronlardıń erkin júriw jolınıń uzınlıǵınıń teoriyalıq mánisin tastıyıqlaydı. Biraq, elektronlardıń erkin júriw jolınıń ortasha uzınlıǵı elektronlardıń tezliginen ǵárezli ekenligin atap aytıw kerek; kishi tezlikler menen qozǵalatuǵın elektronlar ushın gazlerdiń kópshiliginde onıń shaması gazlerdiń kinetikalıq teoriyası boyınsha anıqlanǵan molekulalardıń erkin júriw jolınıń ortasha uzınlıǵınan kishi. Úlken tezliklerde onıń mánisi gazlerdiń kinetikalıq teoriyası boyınsha anıqlanatuǵın mániske jaqınlasadı.

Bizler usı waqıtqa shekem bir neshe ret gaz molekulalarınń bir biri menen soqlıǵısıwın serpimli sharlardıń bir biri menen soqlıǵısıwı túrinde qarawdı júdá ápiwaylastırılǵan ekenligin kórsetken edik.

Molekulalar bolsa bir biri menen tikkeley tiyisken jaǵdayda ǵana emes, al qashıqlıqtan da tásirlesetuǵın zaryadlanǵan bólekshelerdiń quramalı sistemaları bolıp tabıladı. Elektronlardıń molekulalar yamasa atomlar menen soqlıǵısıwında másele onnan da quramalasadı. Elektron molekula yamasa atom menen sol molekula menen atomnıń haqıyqıy ólshemlerine salıstırǵanda úlken bolǵan qashıqlılarda tásirlese baslaydı hám olardıń arasındǵı qashıqlılardıń kishireyiwi menen óz-ara tásirlesiw kúshleriniń shaması úlkeyedi. Bunnan elektron menen soqlıǵısıwı boyınsha anıqlanatuǵın molekulanıń effektivlik diametriniń ushıp keletuǵın elektronnıń tezliginen ǵárezli ekenligi kelip shıǵadı. Effektivlik diametr ushın bunday jaǵdayda alınatuǵın shama molekulalardıń bir biri menen soqlıǵısıwı ushın alınatuǵın effektivlik diametrden ózgeshe boladı.

Elektronlardıń molekulalar menen soqlıǵısıw teoriyasında 0°C temperaturadaǵı hám 1 mm Hg basımdaǵı 1 sm³ kólemde jaylasqan barlıq molekulalardıń tolıq kese-kesimin qaraydı.

Bul tolıq kesim S mınaǵan teń:

$$S = \pi r^2 n_0.$$

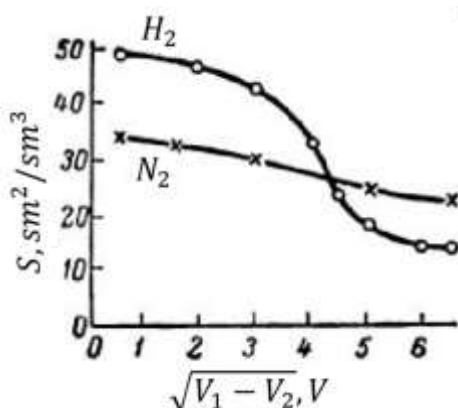
Bul teńlikte r - molekulanıń radiusı, al n_0 - molekulalardıń 0°C temperaturadaǵı hám 1 mm Hg basımdaǵı molekulalardıń sanı.

r shamasın elektronlardıń erkin júriw jolınıń ortasha mánisi $\bar{\lambda}_e$ boyınsha anıqlap, mısalı, vodorod atomı ushın (H_2) 25 V shamasındaǵı tezletiwshi potencial ushın $S = 20 \text{ sm}^2/\text{sm}^3$ kesimin alamız. Joqarıda ayılǵanlarǵa sáykes, S elektronlardıń tezliginen ǵárezli.

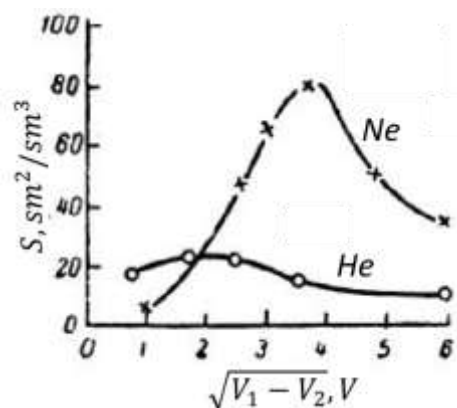
162-súwrette S tiń H_2 hám N_2 ushın alınǵan eksperimentallıq mánislerin keltirilgen. Abscissa kósherine tezletiwshi potencıallardıń kvadrat korenleri, yaǵnıy elektronlardıń tezligi v ǵa proporcional bolǵan shamalar qoyılǵan. Oń tárepte molekulalardıń erkin júriw jolınıń uzınlıǵı boyınsha gazlerdiń kinetikalıq teoriyasınıń tiykarında esaplanǵan S tiń mánisleri qoyılǵan. Kórinip turǵanıday, elektronlardıń kishi tezliklerinde vodorod ushın molekulalardıń effektivlik kesimleri gazlerdiń kinetikalıq teoriyası boyınsha esaplanǵan mánisten eki ese úlken; joqarı tezliklerde bolsa elektronlardıń erkin júriw jolı boyınsha alınǵan kesim menen gazlerdiń kinetikalıq teoriyası boyınsha esaplanǵan basım bir biri menen sáykes keledi.

He, Ne, Ar, Kr, Xe inert gazlerinde kishi tezlikler menen qozǵalatuǵın elektronlar ushın effektivlik kesimler júdá kishi, bunnan keyin olar úlkeyedi hám bir neshe volt shamasındaǵı tezletiwshi potencıallarda maksimumǵa jetedi, al bunnan keyin kishireyedi. Júdá kishi tezlikler menen qozǵalatuǵın elektronlar ushın ($V_1 - V_2 \cong 1 \text{ V}$) gazlerdiń kinetikalıq teoriyası boyınsha anıqlanatuǵın effektivlik kesimlerden ádewir kishi. Atomlar elektronlar ushın "móldir" bolatuǵınday bolıp kórinedi: elektronlar atom arqalı qozǵalıw baǵıtın ózertpesten ótedi. Ramzauer tárepinen ashılǵan bul effektı tek kvantlıq mexanikanıń tiykarında

túsindiriwge boladı³⁷.



162-súwret. $0^\circ C$ temperaturada hám 1 mm Hg basımdağı 1 sm^3 kólemdegi H_2 hám N_2 molekulaları ushın effektivlik kesim S tiń elektronlardıń tezliginen gárezligi.



163-súwret. $0^\circ C$ temperaturada hám 1 mm Hg basımdağı 1 sm^3 kólemdegi He hám Ne molekulaları ushın effektivlik kesim S tiń elektronlardıń tezliginen gárezligi.

163-súwrette He hám Ne atomları ushın atomlardıń effektivlik kesimi S tiń soqlıǵısıwshı elektronlardıń tezliklerinen gárezligi keltirilgen. Bul súwrette de oń tárepte gazlerdiń kinetikalıq teoriyası boyınsha anıqlanǵan effektivlik kesimler qoyılǵan.

§ 188. Elektronlardıń atomlar hám molekulalar menen soqlıǵısıwları. Úlken emes tezliklerde elektronlardıń atomlar hám molekulalar menen soqlıǵısıwı serpimli xarakterge iye boladı. Elektronlardıń massası m atomnıń yamasa molekulanıń massası M nen ádewir kishi bolǵanlıqtan, elektron serpimli soqqıda óziniń tezligin san shaması boyınsha derlik ózgertpeydi: tezlik tek baǵıtı boyınsha ózgeredi. Elektron atomnan yamasa molekuladan serpimli túrde "sekiredi". Usıǵan sáykes, serpimli soqlıǵısıwdıń saldarınan elektronnıń molekulaga beretuǵın energiyasınıń muǵdarı onıń dáslepki kinetikalıq energiyasınıń júdá kishi bólegen quraydı.

Elektronnıń tezligi v molekulanıń tezliginen kóp úlken bolǵanlıqtan, biz molekulanı tınıshlıqta turıptı dep esaplay alamız. Bunday jaǵdayda oraylıq soqqı ushın 1 tomnıń 28-paragrafında sharlardıń serpimli soqlıǵısıwı ushın alınǵan formulanı paydalanıp, soqlıǵısıwdan keyin molekulanıń

$$v' = \frac{2mv}{m + M}$$

tezligine iye bolatuǵınlıǵın anıqlaymız. Bul formulada v - elektronnıń soqlıǵısıwdan burınǵı tezligi.

Bólimdegi elektronnıń massası m di atomnıń massası M niń qasında esapqa almay, juwıq túrde mınaday ańlatpaǵa iye bolamız:

$$v' = \frac{2mv}{M}.$$

Atom yamasa molekula tárepinen alınǵan kinetikalıq energiya mınaǵan teń:

³⁷ Ramzauer effekti (Ramzauer-Taunsend effekti ataması menen de belgili) - kishi tezlikler menen qozǵalatıwın elektronlardıń neytral gazlerdiń atomları menen anomallıq túrdegi ázzi shashırawı qubılısı. Birinshi ret 1921-jılı nemis fizigi Karl Ramzauer tárepinen elektronlardıń argondaǵı shashırawın izertlewdiń barısında ashıldı. Keyinirek bul effekt basqa zatlarda da baqlandı. Tap sol waqıtları bul effekt D.Taunsend tárepinen de gárezsiz túrde ashıldı.

Bul effektı klassikalıq mexanikanıń kóz-qaraslarınıń tiykarında túsindiriwdiń múmkinshiligi joq. Sonlıqtan, bul effektıń ashılıwı kvantlıq mexanikanıń qalıplesiwinde, atap aytqanda bólekshelerdiń tolqınlıq qásiyetke iye bolatuǵınlıǵın ashılıwında úlken áhmiyetke iye boldı (Awdarıwshılar).

$$\Delta E_k = \frac{Mv'^2}{2} = \frac{4m}{M} \frac{mv^2}{2}.$$

Elektron tap sonday muǵdardaǵı kinetikalıq energiyanı joǵaltadı. $\frac{mv^2}{2}$ shamasınıń elektronnıń baslanǵısh kinetikalıq energiyası E_k ekenligin názerde tutıp,

$$\Delta E_k = \frac{4m}{M} E_k$$

teńligine iye bolamız. Oraylıq emes soqlıǵısıwda joǵalǵan energiyanıń shaması kishi boladı; elektron yamasa molekula menen serpimli soqlıǵısıwda elektronnıń *ortasha*

$$\Delta \bar{E}_k = x E_k \quad (1)$$

shamasındaǵı energiyanı joǵaltadı. Bul ańlatpada

$$x = \frac{2m}{M}. \quad (1a)$$

x shaması kishi bólshek bolıp tabıladı. Mısalı, elektronlardıń neon atomları menen serpimli soqlıǵısıwındaǵı $x = 5,45 \cdot 10^{-8}$, al argon atomları menen soqlıǵısıw ushın $x = 2,76 \cdot 10^{-5}$.

Solay etip, atom yamasa molekula menen serpimli soqlıǵısqanda elektron óziniń energiyasınıń júz mıńday bólegin ǵana joǵaltadı eken.

Elektronnıń tezligi úlkeygende *serpimli bolmaǵan soqlıǵısıwlar* júzege keledi, bunday jaǵdayda elektron soqlıǵısqan atomǵa yamasa molekulaǵa óziniń energiyasın tolıǵı menen bere aladı. Berilgen energiya *atomnıń (molekulanıń) qozıwı* yamasa *onıń ionlasıwı*, yaǵnıy onnan *bir yamasa bir neshe elektrondı julıp alıw ushın* jumsaladı. Eger energiya atomnıń qozıwı ushın jumsalatuǵın bolsa, onda ol keyin nurlanıw energiyasına yamasa jıllılıqqa aylanadı.

Bul bapta biz tek ionizaciyaǵa alıp keletuǵın *serpimli emes soqlıǵısıwlar*dı qaraymız; bunday jaǵdayda bir retlik ionizaciya júzege keledi, yaǵnıy atom yamasa molekula elektron menen serpimli bolmaǵan soqlıǵısıwda óziniń elektronlarınń tek birewin ǵana joǵaltadı hám, soǵan sáykes, bir valentli oń ionǵa aylanadı dep boljaymız.

Ionizaciya ushın zárúrli bolǵan energiyanı E_j arqalı belgileymiz. Bunday jaǵdayda elektronnıń atomdı ionlastırıwı ushın onıń kinetikalıq energiyasınıń E_j shamasınan kishi bolmawı kerek. Elektronnıń kinetikalıq energiyası

$$\frac{mv^2}{2} = e(V_1 - V_2)$$

shamasına teń bolǵanlıqtan (bul teńlikte $V_1 - V_2$ arqalı elektronlardı tezletetuǵın potenciallar ayırması belgilengen), maydannıń ionizaciya ushın zárúrli bolǵan elektrondı tezletetuǵın potenciallar ayırmasınıń eń kishi mánisi

$$e(V_1 - V_2)_j = \frac{mv_j^2}{2} = E_j \quad (2)$$

shamasına teń bolıwı kerek.

$(V_1 - V_2)_j$ potenciallardıń ayırmasın berilgen atomnıń yamasa molekulanıń *ionizaciyalıq potencialı* dep ataydı.

E_j ionzaciya potencialın elektronvoltlerde (eV) ańǵartadı.

Ionizaciyalıq potenciallardı anıqlawdıń kóp sanlı eksperimentallıq usılları bar. Bul potenciallardı anıqlawdaǵı bazı bir qıyınshılıq atom menen molekulanı qozdırıwǵa alıp keletuǵın potenciallar ayırması menen ayırıw zárúrligi menen baylanıslı. Biz mánisi mınalardan ibarat bolǵan ápiwayı jaǵdaydı ǵana qaraymız. Katod trubkasında qızǵan K katodı menen A anodınıń arasında elektronlıq toq alınadı. Trubkada úlken emes muǵdardaǵı gaz bolıp, elektronlardıń erkin júriw jolınıń uzınlıǵı anod penen katod arasındaǵı qashılıq l den kishi bolsın.

Elektronlar gazdıń molekulaları menen tek serpimli túrde tásir etisetuǵın bolsa, onda toq tolıǵı menen elektronlıq boladı hám onıń kúshi I Boguslavskiy-Lengmyur formulasınıń járdeminde anıqlanadı (186-paragrafqa qarańız):

$$I = \alpha(V_1 - V_2)^{3/2}.$$

Sonlıqtan, eger biz abscissa kósherine $(V_1 - V_2)^{3/2}$ shamasınıń mánislerin qoyatuǵın bolsaq, onda I toq kúshiniń $(V_1 - V_2)^{3/2}$ ǵárezliginiń 164-súwrettegi Oa iymekligi menen súwretlenetuǵınlıǵın kóremiz. Biraq, elektronlardıń tezlikleri trubkadaǵı gazdı ionlastırıw ushın jetkilikli bolsa, onda trubkanıń kóleminde qosımsha elektronlar menen oń ionlar payda boladı hám I toqtıń shaması keskin túrde ósedi (164-súwrettegi iymekliktiń ab bólimi). I toqtıń shamasınıń $(V_1 - V_2)^{3/2}$ shamasınan ǵárezliginde keskin úzilis orın alatuǵın noqatqa sáykes keletuǵın potenciallar ayırması ionizaciyalıq potencial bolıp tabıladı.

XI keste

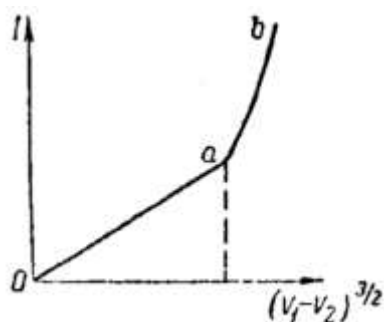
Ionizaciyalıq potenciallar (voltlerdegi)

Atomlar yamasa molekularlar	$(V_1 - V_2)_I$
Vodorod, H	13,54
Geliy, He	24,47
Neon, Ne	21,47
Argon, Ar	15,69
Sınap, Hg	10,38
Natriy, Na	5,12
Kaliy, K	4,32
Ceziy, Cs	3,87
Vodorod molekulası, H_2	15,4
Azot molekulası, N_2	15,8

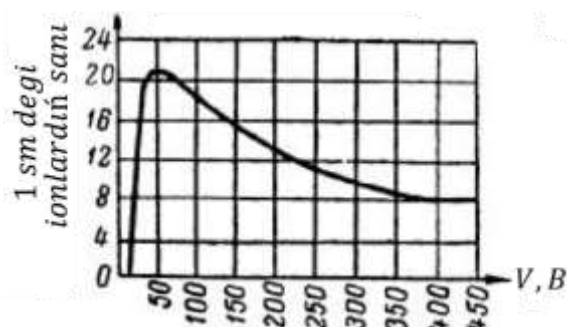
XI kestede bazı bir atomlar menen molekularlardıń ionizaciyalıq potencialları keltirilgen.

Eger elektronnıń tezligi ionizaciya ushın talap etiletuǵın tezlikten úlken bolsa, onda ol soqlıǵısıwda tek ionizaciya ushın zárúrli bolǵan energiyasın ǵana beredi hám onıń ózi soqlıǵısıwdan keyin qalǵan kinetikalıq energiyası menen qozǵalısnı dawam ete beredi. Soqlıǵısıwlardıń barlıǵı ionizaciyaǵa alıp kele bermeydi. Úlken tezlikler ushın ionizaciyanıń itimallıǵı kishireydi, elektron atomnıń qasınan onı ionlastırmay ushıp ótiwge "úlgeredi". 165-súwrette hár qıylı tezliklerge iye bolǵan elektronnıń 1 mm sınap baǵanasınıń basımında basım 1 sm joldı ótkende payda etetuǵın sınaptıń oń ionlarınıń (Hg^+) sanın beretuǵın iymeklik kórsetilgen. Kórinip turǵanıday, potenciallar ayırması 50 V bolǵan tezletetuǵın maydandaǵı ionizaciyanıń itimallıǵı maksimumǵa jetedi (sınaptıń ionizaciya potencialı 10,4 V); tezletiwshi potenciallardıń úlken mánislerinde ionizaciyanıń itimallıǵı kishireydi. 165-súwrette iymekliktiń maksimumında elektron óziniń 1 sm jolında shama menen 20 dana Hg^+ ionın payda etedi. Sonday shártler orınlanganda 1 sm jolda ol shama menen 57 ret soqlıǵısatuǵın bolǵanlıqtan, soqlıǵısıwlardıń tek $\frac{20}{57}$ shaması ǵana (yaǵnıy, ulıwma soqlıǵısıwlardıń 35 procenti) ionizaciyaǵa alıp keledi. Basqa barlıq soqlıǵısıwlarda ionizaciya alıp keletuǵın soqlıǵısıwlardıń procenti kishi boladı.

Usı waqıtqa shekem biz tek elektronnıń soqlıǵısıwınıń saldarınan júzege keletuǵın ionizaciya haqqında gáp ettik. Biraq ionlar menen soqlıǵısıwdıń nátiyjesinde de ionizaciyanıń júriwi múmkin. Biraq, házirgi waqıtları júdá úlken energiyalarda ionlardıń ionizaciylanatuǵınlıǵı anıqlanǵan, sonlıqtan, bizdi qızıqtıratuǵın barlıq gaz ótkizgishliginde ionlardıń ionizaciyası tek ekinshi dárejeli orındı ǵana iyeleydi.



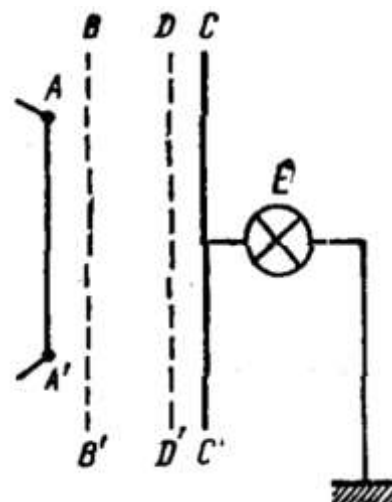
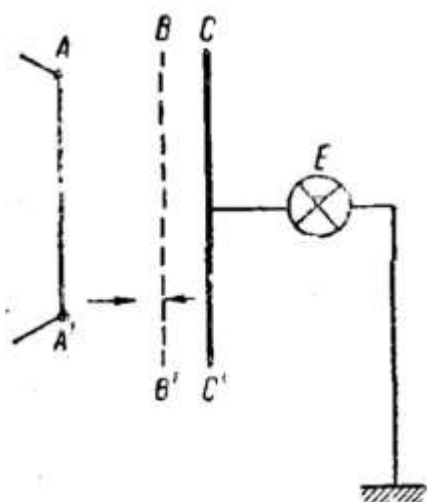
164-súwret. Ionizaciyaǵa baylanıslı toqtır kúshi I dıń potenciallar ayırması $V_1 - V_2$ den ǵárezligi grafigindegi úzilistiń payda bolıwı.



165-súwret. Sinaptaǵı (Hg^+) payda bolatuǵın ionlardıń elektronlardıń tezliginen ǵárezligi.

Joqarıda táriyiplengen sxema menen bir qatarda, ionizaciyalıq potenciallardı anıqlaw ushın basqa hár qıylı bolǵan sxemalar qollanıladı. Frank hám Gerc 1913-jılı ionizaciyalıq potenciallardı mınaday sxemanıń járdeminde anıqladı (166-súwret). Jabıq ıdista ornastırılǵan qızdırılatuǵın AA' sımı elektronlardıń dereginıń xızmetin atqardı. E elektrometri CC' elektrodına kelip túsetuǵın zaryadlardı tabıwǵa múmkinshilik berdi. Qızdırılatuǵın sim menen CC' elektrodınıń arasına BB' torı ornastırıldı. Kontaktlıq potenciallar ayırmasınıń payda bolmawı ushın CC' elektrodı menen BB' torı platinadan soǵıldı. ıdistiń ishindegi barlıq keńislik tómengi basımdaǵı izertlenetuǵın gaz yamasa puw menen toltırıldı. AA' sımı menen BB' torınıń arasına elektronlardı tezletetuǵın $V_A - V_B$ potenciallar ayırması túsirilgen. BB' torı menen CC' elektrodınıń aralıǵına elektronlardı irketuǵın $V_B - V_C$ potenciallar ayırması túsirilgen. Eger san mánisleri boyınsha $V_B - V_C$ potenciallar ayırması $V_A - V_B$ potenciallar ayırmasınan úlken bolsa, onda elektronlar tor arqalı ótip, keri qaray iyteriledi hám CC' elektrodına jetip kelmeydi. Biraq, eger elektronlardıń $V_A - V_B$ potenciallar ayırmasınıń tásirinde alınatuǵın tezligi BB' hám CC' lardıń aralıǵında soqlıǵısıwlar atomlardı ionlastıra alatuǵın bolsa, onda oń zaryadlanǵan ionlar payda boladı. Bul ionlar $V_B - V_C$ potenciallar ayırmasınıń tásirinde tezletiledi hám CC' elektrodına jetip, oǵan oń zaryadın beredi hám ol E elektrometri tárepinen baqlanadı. Solay etip, CC' elektrodında oń zaryad payda bolatuǵın $V_A - V_B$ potenciallar ayırmasınıń shamasınıń anıqlanıwı múmkin. Bul potenciallar ayırması izertlenetuǵın atomlardıń ionizaciyalıq potencialın anıqlaydı.

Frank hám Gerctiń usılı úlken bolǵan bir kemshilikke iye: CC' elektrodındaǵı oń zaryad elektronlardıń atomlardı ionizaciyalawınıń saldarınan ǵana emes, al olardı qozdırıwdıń saldarınan da payda bolıwı múmkin. Biz keyinirek bunday jaǵdayda (III tomǵa qarańız) qozǵan atomnıń jaqtılıqtı nurlandırıp, óziniń normal halına ótetuǵınlıǵın kóremiz. Eger bul nurlanıw spektrdiń ultrafiolet oblastına tiyisli bolsa, onda CC' elektrodına kelip túsip onnan elektronlardı julıp alıwı múmkin (jaqtılıqtıń tásirinde elektronlardı usınday etip julıp alıwdı fotoeffekt dep ataydı, III tomǵa qarańız). Teris elektronlardı joǵaltıwdıń nátiyjesinde CC' elektrodınıń ózi oń zaryadlanadı hám bunday zaryadlanıwdı E elektrometriniń járdeminde kóriwge boladı.



166-súwret. Ionizaciýalıq potenciallyardı anıqlaw ushın arnalğan Frank hám Gerc usılınıń sxeması.

167-súwret. Ionizaciýalıq potenciallyardı anıqlaytuǵın usıldıń sxeması.

Elektronlardıń soqqısınıń nátiyjesinde júzege keletuǵın atomlardıń qozıwın olardıń ionlasıwınan ayırıw ushın, mınaday usıl paydalanıldı: qızatuǵın AA' sımı menen CC' elektrodınıń arasına eki BB' hám DD' torları jaylastırıladı (167-súwret). Sım menen BB' torınıń arasına elektronlardı tezletiw ushın $V_A - V_B$ potenciallyarı, al BB' hám DD' torlarınıń arasına elektronlardı irketuǵın $V_B - V_D$ potencialı túsirilgen. Eń aqırında, DD' torı menen CC' elektrodınıń arasına baǵıtın ıqtıyarlı túrde ózgertiwge bolatuǵın ázzi maydan túsirilgen. Eger, qızǵan sımnan ushıp shıqqan elektronlar BB' hám DD' torlarınıń arasındadı keńislikte ionizaciyanı payda etetuǵın bolsa, onda payda bolǵan oń ionlar CC' elektrodına jetip keledi hám oǵan DD' torı hám CC' elektrodınıń arasına túsirilgen qosımsha ázzi maydannıń baǵıtınan ǵárezsiz oń zaryad beredi. Haqıyqatında, eger bul maydan BB' hám DD' torlarınıń arasındadı maydan menen baǵıtlas bolsa, onda ol ionlardı CC' elektronı tárepke qaray iondı kúshlirek tezletedi. Eger maydan qarama-qarsı baǵıtlanǵan bolsa, onda DD' hám CC' arasındadı potencial san mánisi boyınsha $V_B - V_D$ potenciallyar ayırmasınan kishi etip alınatuǵın bolǵanlıqtan, ionlardı irkiw ushın jetkiliksiz boladı.

Endi elektronlardıń BB' hám DD' torlarınıń arasına atomlar menen soqlıǵısıp, olardı tek qozdıratuǵın jaǵdaydı qaraymız. Qozǵan atomlar jaqtılıq shıǵaradı hám bul jaqtılıq BB' hám DD' torlarınan jáne CC' elektrodınan elektronlardı ushırıp shıǵaradı. Eger DD' torı menen CC' elektrodınıń arasındadı qosımsha maydannıń baǵıtı BB' hám DD' torlarınıń arasındadı maydannıń baǵıtında bolsa (bunday jaǵdayda oń zaryadlanǵan ionlar CC' tárepke qaray tezlenedi), onda elektronlar CC' elektrodınan iyterilip taslanadı hám bul elektrod oń zaryadqa iye boladı. Eger qosımsha maydannıń baǵıtın qarama-qarsı etip alsaq, onda CC' elektrodınan julıp alınǵan elektronlar oǵan qaytıp keledi, oǵan jáne DD' torınan da elektronlar kelip jetedi hám ol teris zaryadqa iye boladı. Solay etip, qosımsha maydannıń baǵıtın ózgertiw jolı menen atomlardıń ionizaciyası menen qozıwın ayırıwǵa boladı.

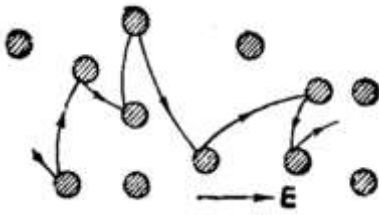
Sınaptıń puwları menen ótkerilgen eksperimentler serpimli emes soqlıǵısıwlar bolıp ótetuǵın potenciallyardıń úsh mánisin alıw múmkinshiligin jarattı: 4,9; 6,7 hám 10,4 V. Bul potenciallyar kritikalıq potenciallyar atamasına iye boldı. Olardıń dáslepki ekewi sinap atomlarınıń qozıwına, al úshinshisi ionizaciyaǵa alıp keledi.

§ 189. Tómenge basımlardaǵı gazlerdegi elektronlardıń qozǵalǵıshlıǵı. Elektrolitlerdegi hám gazlerdegi júdá úlken bolmaǵan basımlardaǵı ionlardıń qozǵalǵıshlıǵın qaraǵanda ionlardıń tezligine proporcional bolǵan súykeli kúshilerniń bolatuǵınlıǵına itibar berdik. Bul ionlardıń erkin júriw jolınıń kishi bolatuǵınlıǵına baylanıslı múmkin boldı. Elektronlardıń gazdegi qozǵalıwın qaraǵan jaǵdayda mäseleni mayda-shúydesine shekem qaraw kerek boladı.

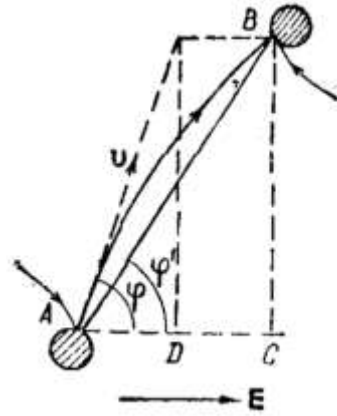
Ápiwayılıq ushın elektronlardıń gazdıń atomları menen tek serpimli soqlıǵısıwların ǵana qaraymız. Usınday jaǵdaylar ushın 188-paragraftadı (1)-formuladan soqlıǵısıwdıń nátiyjesinde elektronnıń tezliginiń san mánisiniń derlik ózgermeytuǵınlıǵı, tezliktiń baǵıtınıń qálegen túrde ózgeretuǵınlıǵı kelip shıǵadı: elektronnıń bir tárepke qaray ushıp ketiwi yamasa onıń keyin qaray sekiriwi múmkin. Eger maydannıń kernewligi E shamasına teń bolsa, onda soqlıǵısıwlardıń aralıǵında elektron mınaday turaqlı tezleniw aladı

$$w = \frac{eE}{m} \quad (1)$$

hám usıǵan sáykes, parabolanıń kesindisi boyınsha qozǵaladı. Gazdıń atomlarınıń arasındadı onıń barlıq jolı 168-súwrette kórsetilgendey túrge iye boladı.



168-súwret. Elektronnıń gazdıń atomlarınń arasındaǵı jolı.



169-súwret. Eki soqlıǵısıwdıń arasındaǵı elektronnıń jolı anıqlawǵa.

Bir birinen soń júzege keletuǵın eki soqlıǵısıwdıń arasındaǵı elektronnıń jolın tolıq qaraymız. 169-súwrette kernewlik vektorı $\mathbf{E}$ niń baǵıtı strelkanıń járdeminde kórsetilgen. Meyli, elektronnıń tezligi $\mathbf{v}$ soqlıǵısıwdan keyin A atomı menen $\mathbf{E}$ vektorı menen φ múyeshin jasaytuǵın bolsın. Elektron tárepinen maydannıń kernewligi $\mathbf{E}$ niń tásirinde alınatuǵın qosımsha tezlikti v tezligine salıstırǵanda kishi dep esaplaymız. Bunday jaǵdayda $\overline{AB}$ doǵasınıń járdeminde kórsetilgen elektronnıń jolı elektr maydanı bolmaǵan jaǵdayda elektron A hám B atomlarınń arasında ótetuǵın erkin jolı $\lambda = AB$ den úlken ayırmaǵa iye bolmaydı. AB menen kernewlik $\mathbf{E}$ niń arasındaǵı múyeshti φ' arqalı belgileybiz.

Soqlıǵısıwlarıń arasındaǵı τ wakıtı ishinde elektr kúshi

$$dA = eE\lambda \cos\varphi'$$

jumısın orınlaydı. Kóp soqlıǵısıwlar ushın ortasha bul jumıs mınaǵan teń boladı:

$$\overline{dA} = eE\bar{\lambda} \overline{\cos\varphi'}. \quad (2)$$

188-paragraftaǵı (1)-formula boyınsha soqqıda elektrod $x \frac{mv^2}{2}$ energiyasın joǵaltadı.

Eki soqlıǵısıwdıń arasındaǵı elektr kúshiniń tásirinde orınlangan ortasha jumıs bolǵan $\overline{dA}$ shaması elektronnıń soqqıdaǵı energiyasınıń ortasha joǵaltıwına teń bolǵnada teń salmaqlıq orıaydı

$$\overline{dA} = x \frac{m\bar{v}^2}{2}.$$

$\overline{dA}$ shamasınıń ornına onıń (2)-teńlik boyınsha mánisin qoyıp, qozǵalıstıń stacionarlıq shártine iye bolamız:

$$eE\bar{\lambda} \overline{\cos\varphi'} = x \frac{m\bar{v}^2}{2}. \quad (3)$$

169-súwrette

$$\cos\varphi' = \frac{AC}{AB} = \frac{AD + DC}{AB}$$

teńliginiń orınlı ekenligin kóremiz. Biraq, $AD = v\tau \cos\varphi$, al $DC = \frac{1}{2}\omega\tau^2$, bul teńlikte ω shaması (1)-teńlik boyınsha alınatuǵın tezleniw. Demek,

$$\cos\varphi' = \frac{v\tau \cos\varphi + \frac{1}{2}\omega\tau^2}{AB} = \frac{v\tau \cos\varphi + \frac{1}{2}\frac{eE}{m}\tau^2}{\lambda}.$$

Bunnan $\overline{\cos\varphi'}$ ortasha mánisi mınaday qatnastıń járdeminde anıqlanadı:

$$\overline{\cos\varphi'} = \frac{\bar{v}\bar{\tau} \overline{\cos\varphi} + \frac{1}{2}\frac{eE}{m}\tau^2}{\bar{\lambda}}.$$

Biraq, biz soqlıǵısıwdan keyingi elektronnıń qálegen baǵıtı teńdey itimallıqqa iye dep esaplaymız. Atomǵa kelip urılatuǵın elektronnan qálegen φ múyeshi menen sekiriwi múmkin; bunday jaǵdayda $\overline{\cos\varphi'} = 0$ hám

$$\overline{\cos\varphi'} = \frac{1}{2} \frac{eE}{m\bar{\lambda}} \tau^2.$$

Eki soqlıǵısıwdıń arasındaǵı ortasha waqıt $\bar{\tau}$ mınaǵan teń:

$$\bar{\tau} = \frac{\bar{\lambda}}{\bar{v}}.$$

Bunnan mınaday teńlikke iye bolamız:

$$\overline{\cos\varphi'} = \frac{1}{2} \frac{eE}{m} \cdot \frac{\bar{\lambda}}{\bar{v}^2}. \quad (4)$$

Bul ańlatpada $\bar{v}^2$ shaması ortasha tezliktiń kvadratın bildiredi, al (3)-formulada bolsa ortasha kvadratlıq tezlik turıptı. Biraq bizlerdiń ótkerip atırǵan esaplawlarımızdıń juwıq xarakterin itibarǵa alıp, biz bul eki ortasha mánislerdi bir birinen ayırmaymız. Bunday jaǵdayda $\overline{\cos\varphi'}$ shamasınıń mánisin (3)-teńlikke qoyıp hám alınǵan teńlemenı $\bar{v}$ ǵa qarata sheship,

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{e\bar{\lambda}}{m\sqrt{x}}} \cdot \sqrt{E} \quad (5)$$

ańlatpasına iye bolamız.

Solay etip, elektronnıń gazdıń atomlarınń arasındaǵı tártipsiz qozǵalısnıń tezligi $\sqrt{E}$ shamasına proporcional eken.

Endi elektronnıń maydannıń baǵıtındaǵı orın almasıwınıń u tezligin tabamız. 169-súwrette

$$u = \frac{AC}{\tau} = v \cos \varphi + \frac{1}{2} w \tau$$

teńligine iye bolamız. Bul tezliktiń ortasha mánisi

$$\bar{u} = \bar{v} \cdot \overline{\cos\varphi} + \frac{1}{2} w \bar{\tau}$$

shamasına teń boladı. Buringıday, $\overline{\cos\varphi} = 0$ teńliginiń orınlı ekenligine itibar berip, w menen $\bar{\tau}$ shamalarınń ornına olardıń (1)- hám (4)-teńlikler boyınsha mánislerin qoyıp,

$$\bar{u} = \frac{1}{2} \cdot \frac{e\bar{\lambda}}{m\bar{v}} \cdot E$$

ańlatpasınıń orınlı ekenligine kóz jetkeremiz. Eń aqırında $\bar{v}$ shamasınıń ornına onıń (5)-ańlatpa boyınsha mánisin qoyıp

$$\bar{u} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{e\bar{\lambda}\sqrt{x}}{m}} \cdot \sqrt{E} \quad (6)$$

ańlatpasına iye bolamız. Bunnan elektronnıń maydannıń baǵıtındaǵı tezligi bolǵan $\bar{u}$ shamasınıń $\sqrt{E}$ shamasına proporcional ekenligin kóremiz. Elektronnıń qozǵalgıshlıǵın $u^0 = \frac{\bar{u}}{E}$ shamasına teń dep anıqlap

$$u^0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{e\bar{\lambda}\sqrt{x}}{m}} \cdot \frac{1}{\sqrt{E}} \quad (7)$$

formulasına iye bolamız. Solay etip, gazdegi elektronnıń qozǵalgıshlıǵı $\sqrt{E}$ shamasına keri proporcional túrinde maydannıń kernewliginen ǵárezli eken. Usı jaǵdayǵa sáykes, gazlerdiń elektronlıq ótkizgishligi ushın Om nızamı orınlı emes eken. SHın mánisinde, Om nızamı jáne bir qatar sebeplerge baylanıslı orınlanbaydı.

Biz tek serpipmi soqlıǵısıwları ǵana qaradıq, sonlıqtan alınǵan formulalar úlken bolmaǵan E kernewlikleri ushın ǵana durıs. Inert gazler ushın (Ne , Ar h.t.b.) $E = 1$ V/sm kernewliktegi $\bar{v}$ menen $\bar{u}$ shamalarınń (5)- hám (6)-formulalar boyınsha esaplangan mánisleri olardı basqa usallardıń járdeminde esaplangan mánisleri menen jaqsı sáykes keledi. $p = 1$ mm Hg basımı hám $E = 1$ v/sm kernewligi ushın

$$\bar{v} = 1,25 \cdot 10^8 \text{ sm/sek}, \bar{u} = 4,63 \cdot 10^5 \text{ sm/sek}$$

mánislerin alamız.

Atomlardıń arasındaǵı kernewligi $E = 1$ V/sm shamasına teń bolǵan elektr maydanınıń tásirinde elektronnıń alatuǵın $\bar{v}$ tezliginiń shaması ádettegi temperaturalardaǵı sırtqı elektr maydanı bolmaǵan jaǵdaydaǵı tezligine salıstırǵanda úlken.

Elektr maydanı bolmaǵan jaǵdayda elektronlardıń jıllılıq qozǵalıslarınıń ortasha kinetikalıq energiyası molekulalardıń jıllılıq qozǵalıslarınıń kinetikalıq energiyasınday boladı:

$$\frac{m\bar{v}^2}{2} = \frac{3}{2} kT.$$

Bul teńlikte k - Bolcman turaqlısı hám T - absolyut temperatura.

Bunnan mınaday formulaǵa iye bolamız:

$$\sqrt{\bar{v}^2} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}.$$

$T = 300 \text{ K}$ temperatura ushın

$$\sqrt{\bar{v}^2} = \sqrt{\frac{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-16} \cdot 300}{9 \cdot 10^{-27}}} \text{ sm/sek} \cong 3,74 \cdot 10^8 \text{ sm/sek}$$

shamasına iye bolamız, yaǵnıy $\bar{v}$ nıń keltirilgen mánisin shama menen 30 ese kishi.

Elektronnıń maydannıń baǵıtındaǵı orın almasıwınıń ortasha tezligi $\bar{u}$ onıń tolıq ortasha tezligi bolǵan $\bar{v}$ shamasınan kóp kishi. Usıǵan baylanıslı elektron tárepinen basıp ótiletuǵın joldıń ulıwma uzınlıǵı l de maydannıń baǵıtındaǵı orın almasıwınıń uzınlıǵı l_E den úlken boladı. Álbette,

$$\frac{l}{l_E} = \frac{\bar{v}}{\bar{u}}$$

teńligi orınlı boladı. (5)- hám (6)-formulalardı paydalanıp, bul ańlatpanı bilayınsha kóshirip jazamız:

$$\frac{l}{l_E} = \frac{2}{\sqrt{x}}.$$

Neon ushın $\frac{l}{l_E} = 271$, al argon ushın $\frac{l}{l_E} = 381$; solay etip, elektron tárepinen basıp ótilgen joldıń uzınlıǵı onıń maydannıń baǵıtında basıp ótken jolınıń uzınlıǵınan júzlegen ese úlken boladı.

§ 190. Gazlerdiń óz betinshe ótkizgishligi. 188-paragrafta biz soqlıǵısıwdıń saldarınan ionlasıwdı payda etiw ushın jetkilikli bolǵan elektronlardıń tezliklerinde gazdegi toqtıń kúshiniń kúshli úlkeyetuǵınlıǵın kórgen edik. Sebebi, bunday jaǵdaylarda tártipli qozǵalısqı toqtı payda etetuǵın zaryadlanǵan bólekshelerdiń sanı úlkeyedi. Endi bul processti tereńirek qaraymız.

Ápiwayılıq ushın biz toqtı bir birine parallel bolǵan tegis K hám A plastinkalarınń arasında payda boladı dep boljayıq, sonıń menen birge K katodi elektronlardıń deregi bolsın (170-súwret). Meyli, waqıttıń bir biriginde n_0 dana elektron ushıp shıqsın. Elektrodlarǵa parallel etip katodtan x qashıqlıǵında qalınlıǵı dx bolǵan qatlamdı ayırıp alamız. Bul qatlamǵa shekem ushıp keletuǵın elektronlardıń sanın n arqalı belgileybiz.

Bunday jaǵdayda elektronlardıń kelip soqlıǵısıwınıń saldarınan ionizaciyanıń nátiyjesinde payda bolǵan jańa elektronlardıń sanı

$$dn = \alpha n dx$$

shamasına teń boladı. Bul teńlikte α - ionizaciya koefficienti. Bul teńlikti

$$\frac{dn}{n} = \alpha dx$$

túrinde kóshirip jazıp, shep hám onı táreplerin integrallap

$$\ln n = \alpha x + C \quad (1)$$

ańlatpasın alamız. C turaqlısıwınıń mánisi anıqlaw ushın $x = 0$ teńligi orınlanǵanda, yaǵnıy katodqa tiyip turǵan orında $n = n_0$ teńliginiń orınlanatuǵınlıǵın shárt túrinde qabıl etemiz. Bunnan

$$\ln n_0 = C$$

teńligine iye bolamız. C nıń usı mánisin paydalanıp, (1)-teńlikten

$$\ln \frac{n}{n_0} = \alpha x$$

teńligin yamasa

$$n = n_0 e^{\alpha x} \quad (2)$$

formulasına iye bolamız.

Bul formulanı keltirip shıǵarǵanda, biz rekombinaciyanı esapqa almadıq. Eger elektrodlardıń arasındaǵı qashıqlıq d ǵa teń bolsa, onda anodqa n_d dana elektron kelip jetedi:

$$n_d = n_0 e^{\alpha d}. \quad (2a)$$

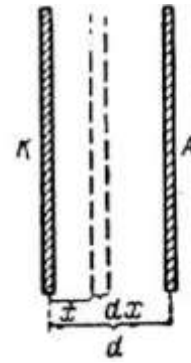
Gazdiń kóleminde rekombinaciya bolmaǵan jaǵdayda eń jaqsı bolǵanda anodqa n_0 dana elektron jetip kelgen hám, soǵan sáykes, I_t toyınıw toǵınıń kúshi mınaǵan teń bolar edi:

$$I_t = n_0 q. \quad (3)$$

Bul teńlikte q - elektronńıń zaryadı.

170-súwret.

Óz betinshe ótkizgishlik orın alǵandaǵı tegis elektrodlardıń arasındaǵı toqtır kúshin esaplawǵa.



Ionizaciya orın alǵanda anodqa n_d elektron jetip keledi hám (2a) boyınsha toqtır kúshi

$$I = n_d q = n_0 e^{\alpha d} \cdot q. \quad (4)$$

(4)-teńlikti (3)-teńlik penen salıstırıp

$$I = I_t e^{\alpha d}. \quad (4a)$$

formulasın alamız. Solay etip, toqtır shaması $e^{\alpha d}$ shamasına úlkeyedi eken.

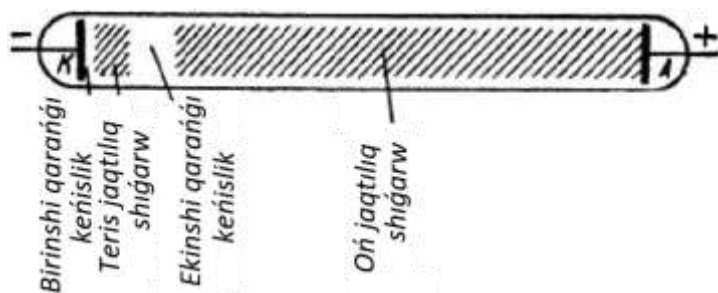
Eger, misalı, $d = 5$ sm dep boljasaq hám katod tárepinen shıǵarılgan elektron 1 sm jolında ortasha eki jańa elektrondı payda etedi dep esaplasaq, onda $\alpha = 2 \text{ sm}^{-1}$ hám

$$I = I_t \cdot e^{2 \cdot 5} \sim 2,2 \cdot 10^4 I_t,$$

yaǵnıy toqtır kúshi onlaǵan mırn ese úlkeyedi. Bul esaplaw elektronńıń kelip urılıwı menen ionizaciya bolatuǵın jaǵdayda ótkizgishliktiń tiykarınan razryad oblastınan sırttan keletuǵın elektronlardıń esabınan emes, al onıń ózinde payda bolǵan elektronlardıń esabınan boladı eken. Toqtır shamasın uslap turıw ushın sırttan elektronlardıń yamasa basqa da zaryadlangan bólekshelerdiń salıstırmalı úlken bolmaǵan sanınıń kelip turıwı jetkilikti. Teris zaryadlangan elektron (katod) bul dáslepki elektronlardıń deregi bolıp tabıladı, bul elektrodan razryad oblastınan kelip túsetuǵın oń ionlardıń urılıwınıń saldarınan, elektrodıń barlıq bóliminiń kúshli qızıwınan yamasa nurlanıwdıń (fotoeffektıń) tásirinde elektronlar julıp alınadı. Bul barlıq jaǵdaylarda elektrod elektronlardı razryadtıń ózinde bolıp ótetuǵın processlerdiń tásirinde shıǵaradı hám, usıǵan sáykes, razryad óz betinshe uslap turıladı - biz gazdıń óz betinshe ótkizgishligi menen is alıp baramız.

Gazlerdiń óz betinshe ótkizgishligi ushın bir neshe keń tarqalǵan jaǵdaylardı keltiremez.

1. Pısqıwshı razryad. Bunday tiptegi razryad gazlerde kishi basımlarda (gama menen 1 mm Hg basımda); bunday razryadtı eki ushında elektronlar jaylastırılǵan uzın trubkada elektrodlarǵa bir neshe júz volt bolǵan potenciallar ayırmasın túsirgende ańsat baqlawǵa boladı (171-súwret). Trubka arqalı ótetuǵın toqtır tásirinde gaz jaqtılıq shıǵaradı. Bunday jaǵdayda jaqtılıq shıǵarıwdıń mınaday xarakterli oblastların ayıradı: a) katodtıń qasındaǵı ázzi jaqtılıq shıǵarıw oblasti - bul oblasttı birinshi qarańǵı keńislik dep ataydı; b) teris jaqtılıq shıǵarıw dep atalatuǵın jaqtılıq shıǵarıw oblasti; v) ázzi jaqtılıq shıǵaratuǵın ekinshi oblast - ekinshi (faradeylik) qarańǵı keńislik; g) intensivli oń jaqtılıq shıǵarıw oblasti. Oń jaqtılıq shıǵarıw trubkanıń ádewir oblastın óziniń ishine kamtıydı.



171-súwret.
Pısqıwshı razryad.

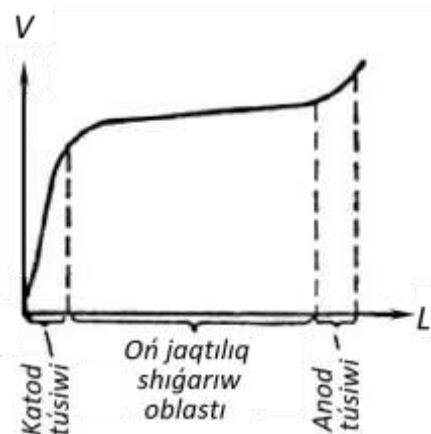
Trubka boyınsha potencialdıń túsiwi bir tekli emes. Birinshi qarańǵı oblastqa túsken potenciallar ayırması eń úlken mániske iye - bul potencialdıń katodlıq túsiwi dep ataladı (172-súwret); bunnan keyin trubkanıń qalǵan bóliminiń barlıǵına túsetuǵın potencialdıń shaması júdá kishi (shama menen $1 - 2 \text{ V/sm}$) hám tek anodtıń kasında jańa sekiriw - potencialdıń anodlıq túsiwi orın aladı.

Potencialdıń katodlıq túsiwiniń shaması tiykarınan katodtıń materialınan hám gazdıń tábiyatınan ǵárezli boladı.

Toqtır kishi mánislerinde teris jaqtılıq katodtıń betiniń bir bólegin ǵana jabadı. Bunday jaǵdayda potencialdıń katodlıq túsiwiniń shaması toqtır kúshinen de, gazdıń basımınan da ǵárezli emes (basımniń ózgerisiniń bazı bir intervalında); katodlıq túsiwdiń bul shamasın normal túsiw dep ataydı.

Katodtıń hár qıylı materialları ushın potencialdıń normal katodlıq túsiwiniń mánisleri XIII keste de keltirilgen.

Toqtır kúshi úlkeygende (sırtkı qarsılıqtıń shamasın kishireytiw arqalı) katodtıń betiniń jaqtılıq shıǵarıp turǵan maydanı da oǵan proporcional ósedı. Sonlıqtan bettiń qasındaǵı toqtır tıǵızlıǵı turaqlı bolıp qaladı. Katodtıń betiniń barlıǵı jaqtılıq shıǵarıw menen qaplangan jaǵdayda toqtır bunnan bılay ósiwi potencialdıń katodlıq túsiwiniń úlkeyiwi, yaǵnıy elektrodlardıń arasındaǵı potenciallar ayırmasınıń úlkeyiwi menen baylanıslı. Solay etip, pısqıwshı razryadqa Om nızamın pútkilley qollanıwǵa bolmaydı.



172-súwret.

Razryadlı trubka boylap potencialdıń túsiwi.

Katodtıń qızıwı baqlanatuǵın kúshli toqlarda túsiw xarakteristikası dep atalatuǵın xarakteristikaniń júzege keliwi múmkin: trubka arqalı ótip atırǵan toqtır úlkeyiwi menen elektrodlardaǵı potenciallar ayırmasınıń shaması kishireydi.

XIII keste

Potencialdıń normal katodlıq túsiwi (voltlerdegi)

Katodtıń materialı	Gaz					
	N ₂	H ₂	He	Ne	Ar	Hg
Na	178	185	80	75	-	-

Cu	208	214	177	220	131	447
Al	179	171	141	120	100	245
Fe	215	198	153	150	131	389
Ni	197	211	158	140	131	275

Razryadtırın baslanıwı ushın (trubkanıń jaǵıw ushın) katodlıq potenciallar ayırmasına salıstırǵanda úlkenirek potenciallar ayırmasınıń túsiriliwı kerek.

Trubkada bolıp ótetuǵın processlerdiń sxema túrinde bılayınsha kórsetiliwı múmkin. Elektrodlarǵa jetkilikli dárejede potenciallar ayırması túsirilgende, trubkada gazde barlıq waqıtta az muǵdarda bolsa da bar bolatuǵın ionlar menen elektronlarǵa tezletetuǵın maydan payda boladı. Elektronlar óziniń jolında gazdıń atomların ionlastıradı hám jańa ionlardı payda etedi, bul jaǵday óz gezeginde teoriyaǵa sáykes toqtır keskin úlkeyiwine alıp keledi. Bunnan keyin potencialdıń katodlıq túsiwı úlken orındı iyeleydi. Ol elektronlardıń erkin júriw jolınıń uzınlıǵınday keńislikte jıynalǵan. Bul orında elektronlar soqqılardıń serpimli emes xarakterge iye bolatuǵınınday tezlikke iye boladı. Usı oblastta oń ionlar katodqa qaray tezleniw aladı hám oǵan kelip urılıp, onıń betinen jańa elektronlardı ushırıp shıǵaradı. Bunday elektronlardıń bolıwı gazdıń ótkizgishligin jáne de joqarılatadı.

Oń jaqtılıq shıǵarıw oblastında elektronlar menen oń ionlardıń koncentraciyaları birdey. Biraq, elektronlardıń qozǵalıshlıǵınıń úlken bolatuǵınlıǵına baylanıslı gazdıń ótkizgishliginiń basım bólegi elektronlar tárepinen payda etiledi. Oń jaqtılıq shıǵarıw oblastındaǵı ioniziciya dárejesiniń júdá joqarı bolıwı múmkin; misalı, 0,05 mm Hg basımındaǵı sınaptıń puwlarındaǵı razryadta atomlardıń kólem birligindegi sanınıń 10^{13}sm^{-3} shamasına jetiwi múmkin. Demek, olardıń shama menen 1/200 bólimi ionlasqan boladı.

Ionizaciyanıń joqarı dárejesi orın alǵan gaz elektronlardıń sanı menen oń zaryadlangan ionlardıń sanları teń bolǵan jaǵdayda plazma dep atalatuǵın kvazineytrallıq ortalıqtı payda etedi. Plazmada elektronlar tiykarınan tártipsiz qozǵaladı hám sonıń menen birge anod tárepke qarap ástelik penen jılısadı (188-paragraftaǵı esaplarǵa qarańız).

Zond usılı dep atalatuǵın ayrıqsha usıldıń járdeminde ótkerilgen ólshewler elektronlardıń tártipsiz qozǵalıslarınıń tezliginiń Maksvellik tarqalıwǵa iye ekenligin kórsetti. Bunday jaǵdayda ortasha kinetikalıq energiyaniń shaması salıstırmalı úlken hám gazdıń tábiyatı menen razryadtırın sharayatlarınan ǵárezli shama menen 2 den 10 eV ke shekem jetedi. Bunday jaǵdayda

$$\frac{m\bar{v}^2}{2} = \frac{3}{2} kT$$

teńliginen paydalanıp, elektronlardıń berilgen qozǵalıslarınıń ortasha energiyasına sáykes keletuǵın T temperaturanı anıqlawǵa boladı. $\frac{m\bar{v}^2}{2} = 1 \text{ eV}$ teńligi orınlanatuǵın elektronlar ushın

$$T = \frac{2}{3k} \cdot \frac{m\bar{v}^2}{2} = \frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-12}}{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-16}} K = 7735 K$$

shamasın alamız. Demek, elektronlardıń 2 – 10 eV shamasına teń ortasha energiyalarına 15000 nan 70000 K shamasına shekemgi temperaturalar sáykes keledi. Razryad bolıp ótetuǵın gazdıń óziniń temperaturası bolsa bul shamadan ádewir kishi hám bir neshe júz gradustan aspaydı. Solay etip, plazmanı atomlıq hám elektronlıq eki gazdıń aralaspasınan turadı dep esaplawǵa boladı, olardıń hár qaysısı óz aldına teń salmaqlıq halda turadı hám óziniń menshikli temperaturası menen táriyiplenedi; bul gazler bir biri menen jaqsı aralasqan bolsa da, olardıń arasındaǵı energiyalar menen almasıw júdá hálisiz, sonlıqtan olardıń temperaturaları teńlespeydi hám hár qıylı bolıp qala beredi.

2. Elektr doǵası. Atmosferalıq basımlarǵa jaqın basımlardaǵı yamasa atmosferalıq bamısınan joqarı basımlardaǵı gaz arqalı óz betinshe ótkizgishlik ayrıqsha qızıǵıwdı payda etedi. Razryadtırın usınday tipin birinshi ret 1803-jılı Peterburgtaǵı Medicinalıq-xirurgiyalıq akademiyanıń professorı V.V.Petrov tárepinen birinshi ret baqlandı hám *elektr doǵası* atamasına iye boldı. Bir neshe jıldan keyin onı Devi izertledi hám onı elektrlik qubılıslardı eń birinshi izertlewshilerdiń biri

bolğan Voltanıń húrmetine voltlıq doǵa dep atadı³⁸.

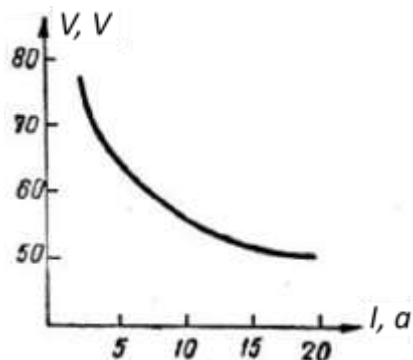
Elektr doǵası eki elektrodtı (kópshilik jaǵdayda kómirden islengen) bir birine tiydirgende hám onnan keyin olardı ajıratqanda payda boladı. Kómirden soǵılğan elektrodlardıń arasındaǵı doǵa 30 – 40 V shamasına teń bolğan potenciallar ayırmasında janadı. Toqtıń kúshiniń shaması kóp onlaǵan amperlerge jetedi. Elektrodlardıń ekewi de kúshli qızadı (3000°C ǵa shekem, al joqarı basımlarda hátte 6000°C ǵa shekem); atmosferalıq basımda oń elektrod kóbirek qızadı, onıń betinde krater dep atalatuǵın oyısıqlar payda boladı. Biraq, doǵanıń janıwı ushın katodtaǵı qızǵan daqtıń bolıwı jetkilikli. Bul qızǵan daq elektronlardıń deregi bolıp xızmet etedi. Anodtıń salqın bolıp qalıwı da múmkin. Razryadtı uslap turatuǵın elektronlardıń deregi sıpatındaǵı qızǵan katodtıń ornı birinshi ret 1905-jılı V.F.Mitkevich tárepinen anıqlandı.

Doǵalıq razryad qulaytuǵın volt-amperlik xarakterislikaǵa iye boladı: toqtıń kúshiniń úlkeyiwi menen (sırtqı qarsılıqtıń kishireyiwiń esabınan) elektrodlardıń arasındaǵı potenciallar ayırmasınıń ayırması kishireyedi (173-súwret).

Elektr doǵası birinshi ret kóshelerdi jaqtılandırıw ushın P.N.Yablochkov tárepinen paydalanıldı; házirgi waqıtları doǵanı tiykarınan projektorlardaǵı hám proekciyalıq apparatlardaǵı (kino) jaqtılıqtıń deregi sıpatında paydalanadı. Metall elektrodlardıń arasındaǵı doǵa metaldı jergilikli qızdırıw ushın qollanıladı (N.G.Slavyanov penen N.N.Benardos tárepinen ámelge endirilgen elektr svarkası).

Házirgi waqıtları jaqtılandırıw hám laboratoriyalıq praktikada tómengi basımlardaǵı gazler menen puwlarda janatuǵın elektr doǵaları paydalanıladı. Olarda dáslepki elektronlardıń deregi qızdırılğan katodlar bolıp tabıladı. Katodlar razryadtıń ózinde júzege keletuǵın processlerdiń yamasa toqtıń sırtqı dereginiń esabınan qızadı ("Qızǵan katodlar")³⁹.

173-súwret.
Doǵalıq razryadtıń qulawshı volt-amperlik
xarakteristikası.



3. Ushqın. Ushqınlıq razryad úlken potenciallar ayırması túsken jaǵdayda salqın elektrodlardıń arasında baqlanadı. Razryad quramalı terbelmeli xarakterge iye boladı. Toqtıń kúshi úlkeygende elektrodlardıń qızıwınıń nátiyjesinde ushqın doǵaǵa aylanadı.

Ushqınlıq razryadtıń basın gazdıń elektrlik tesiliwi, gazdegi ionlardıń nóser tárizli úlkeyiwi

³⁸ Elektr doǵası birinshi ret 1801-jılı britaniya alımı Gemfri Devi tárepinen "Journal of Natural Philosophy, Chemistry, and the Arts" jurnalında táriyiplendi, al 1802-jılı Korol ilimiy jámiyetiniń májilisinde demonstraciyalandı. 1802-jılı rus alımı A.Petrov tárepinen ózine tán bolğan "Geypara jaǵdaylarda 1400 mıs hám cink dóńgeleklerden turatuǵın oǵada úlken batareyanıń járdeminde ótkerilgen galvanı-voltlik tájiriybeler haqqında xabar" atamasındaǵı kitabında táriyiplendi (Bul kitap Sankt-Peterburg qalasında 1803-jılı jariq kórdi). Elektr doǵası zattıń halınıń tórtinshi formasınıń dara jaǵdayı bolğan plazma bolıp tabıladı hám ionlastqan, elektrdlik jaqtan neytral bolğan gazden turadı. Erkin elektr zaryadlarınń qatnasıwı elektr doǵasınıń ótkizgishligin támiyinleydi (Awdarıwshılar).

³⁹ Házirgi waqıtları elektr doǵası jıllılıqtıń quwatlı hám koncentraciyalanǵan deregi sıpatında svarkada hám metallardı plazmalıq kesiw, doǵalıq pechlerdegi polattı balqıtıw, elektrodetonatorlardaǵı partlanıwshı zatlardıń iske túsiwi h.t.b. ushın qollanıladı. Sonıń menen birge doǵanı elektr-raketalıq dvigatellerdi qızdırıw ushın da paydalanadı (Awdarıwshılar).

sıpatında qarawğa boladı. Usınıń saldarınan gaz ótkizgish gazge aylanadı. Tesiwge alıp keletuǵın potencialdıń ayırması elektrodtıń materialınan, gazdıń tábiyatı menen basımınan, elektrodlardıń ólshemleri menen formasınan, olardıń arasındaqı qashıqlıqtan ǵárezli. Ushlı elektrodlar ushın tesiw potenciallar ayırmasınıń mánisi kishi.

Tegis elektrodlar bolǵan jaǵdayda elektrodtıń berilgen materialı hám berilgen gaz ushın tesiwshi potencialdıń shaması tek pd kóbeymesinen ǵana baylanıslı, bul kóbeymedi p - gazdıń basımı, al d - elektrodlardıń arasındaqı qashıqlıq. Mısalı atmosferalıq basımdaqı elektrodlardıń arasındaqı qashıqlıq 5 sm bolǵan jaǵdayda tesiwshi potencialdıń shaması 0,5 atm basımdaqı hám elektrodlardıń arasındaqı qashıqlıq 10 sm bolǵan jaǵdayda tesiwshi potencialdıń shamasına teń.

XIV keste

Atmosferalıq basımdaqı hawa ushın ushqınlıq aralıqlar (millimetrlerdegi)

Voltlerdegi potenciallar ayırması	Keltirilgen túrdegi elektrodlardıń arasındaqı qashıqlıq		
	Ushlı	Diametri 5 sm bolǵan shar	Tegis
20000	15,5	5,8	6,1
40000	45,5	13	13,7
100000	220	45	36,7
200000	410	262	75,3
300000	600	530	114

Berilgen potenciallar ayırmasınıń shamasında ushqın payda bolatuǵın elektrodlardıń arasındaqı qashıqlıq *ushqınlıq aralıq* dep ataladı.

XIV kestede bir qatar dara jaǵdaylar ushın ushqınlıq aralıqlardıń shamaları keltirilgen.

4. Taj tárizli razryad. Taj tárizli razryad dep atalatuǵın razryad óz betinshe razryadtıń ayırıqsha túri bolıp tabıladı. Bunday razryad salıstırmalı úlken basımlarda (atmosferalıq) elektrodlardıń birewiniń yamasa ekewiniń de betiniń iymekliginiń radiusı kishi bolǵan jaǵdayda razryadlıq aralıқтаǵı maydan júdá teń ólshewli emes bolǵan jaǵdayda payda boladı. Ionizaciya menen gazdıń jaqtılıq shıǵarıwı elektrodlardıń arasındaqı jińishke qatlamda júzege keledi; gazdıń basqa bólimindegi ótkizgishlik eki belgige iye ionlardıń qozǵalıswın saldarınan júzege keledi. Toqtı joqarı kernew simları arqalı alıp bergende tiykarǵı kesent beretuǵın qubılıs taz tárizli razryad bolıp tabıladı.

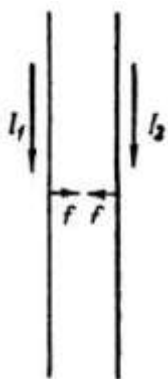
ATINSHI BÓLIM

ELEKTROMAGNIT QUBILISLAR

XVIII BAP

TOQLARDIŇ MAGNIT MAYDANI

§ 191. Magnit maydanı hám onıń xarakteristikası. Elektr zaryadların qorshap turǵan keńislikte belgili fizikalıq qásiyetlerge iye bolatuǵın elektrostatikalıq maydanniń payda bolatuǵını sıyaqlı toqlardı qorshap turǵan keńislikte magnit maydanı dep atalatuǵın maydan payda boladı. Elektrostatikalıq maydanniń bar ekenligin usı maydangá alıp kelingен zaryadlarǵa kúshtiń tásir etetuǵınlıǵı boyınsha anıqlaymız. Magnit maydanı usı maydandaǵı toq ótip turǵan ótkizgishlerge kúshlerdiń tásiiri boyınsha kórinedi. Mısalı, bir baǵıtta toq ótip turǵan bir birine parallel bolǵan eki ótkizgish bir birine tartıladı (174-súwret). Bul fakttı biz bilayınsha túsindiremiz: toqlardıń hár biri qorshaǵan ortalıqta magnit maydanın payda etedi hám bul maydan basqa toqqa tásir etedi. Toqqa magnit maydanınıń tásiriniń xarakterı toq ótip turǵan ótkizgishtiń forması, qalayınsha jaylasqanlıǵı hám ótkizgishtegi toqtıń baǵıtı boyınsha hár qıylı boladı. Sonlıqtan magnit maydanınıń xarakteristikası ushın onıń bazı bir tolıq anıqlanǵan toqqa tásirin qaraw kerek. Usınday jaǵdayda biz házirshe ótkizgishler boslıqta jaylasqan dep esaplaymız.



174-súwret. Bir baǵıtta toq ótip turǵan eki parallel ótkizgishlerdiń bir biri menen tartısıwı.



175-súwret. Toǵı bar ramka.

Elektrostatikada biz elektrostatikalıq maydanniń qásiyetlerin úyreniw ushın noqatlıq zaryadtan, yaǵnıy ólshemleri maydandı payda etken zaryadlarǵa shekemgi qashıqlıqqa salıstırǵanda kishi bolǵan denede jaylasqan zaryadtı paydalandıq (124-paragrafqa qarańız). Magnit maydanınıń qásiyetin úyreniw ushın onıń *toǵı bar tuyıq konturǵa tásir*in paydalanamız. Bunday konturdı biz *ramka* dep ataymız. Bunday konturdiń ólshemleri magnit maydanın payda etetuǵın toq ótip turǵan ótkizgishlerge shekemgi qashıqlıqtan kishi bolıwı kerek. Ramkada turaqlı toqtıń ótip turıwı ushın oǵan qanday da bir ótkizgishlerdiń járdeminde toqtı alıp keliwimiz kerek. Magnit maydanı sol ótkizgishlerge de tásir etedi; bul tásirde qutılıw ushın alıp kelinetuǵın ótkizgishlerdi bir birine júdá jaqın etip jaylastırıwımız kerek, bunday jaǵdayda magnit maydanınıń olarǵa túsiretuǵın qosındı tásiiri nolge teń boladı (magnit kúshleriniń baǵıtınıń toqtıń baǵıtınan tómende keltiriletuǵın ǵárezlik boyınsha). Buralıw deformaciyasın kórsetiwge qábiletli bolǵan jıńışke sabaqqa ildirilgen usınday ramkanı (175-súwret) biz magnit maydanınıń qásiyetin úyreniw ushın paydalanamız.

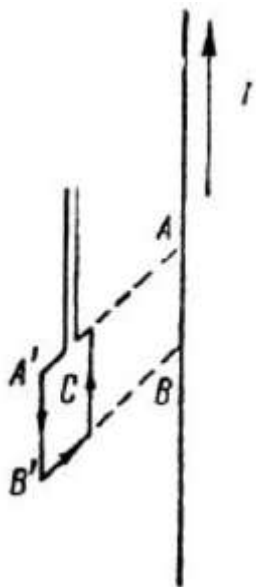
Tájiriybe toqlar ótip turǵan ótkizgishlerdiń qasına jaylastırılǵan kishkene ramkanıń belgili bolǵan túrde burılatuǵınlıǵın kórsetedi. *Magnit maydanı ramkaǵa baǵıtlawshı tásir etedi.*

I toǵı ótip turǵan tuwrı hám uzın ótkizgish (176-súwret). Usınday ótkizgish (176-súwret). Usınday ótkizgish qasına jaylastırılǵan C ramkası ótkizgish arqalı ótetuǵın $AA'BB'$ tegisliginde jatatuǵınday bolıp burıladı.

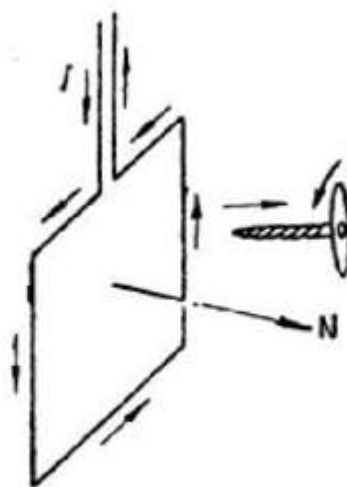
Bunday jaǵdayda ramkanıń baǵıtı ondaǵı toqtıń baǵıtınan ǵárezli boladı: ramkadaǵı toqtıń baǵıtı ózgergende ramka 180° qa burıladı⁴⁰.

Maydannıń ramkaǵa túsiretuǵın baǵıtlawshı (orientaciyalaytuǵın) tásin eń dáslep *magnit maydanınıń baǵıtlanǵanlıq xarakteristikası* ushın paydalanıwǵa boladı. Onıń ushın ramkanıń tegisligine normal túsiremiz. *Normaldıń oń baǵıtı sıpatında mınaday baǵıttı qabıl etemiz: eger normaldıń ushı tárepten qaraytuǵın bolsaq, onda ramkadaǵı toq saat strelkasınıń qozǵalı baǵıtına qarama-qarsı baǵıtta ótiwi kerek.*

Basqa sóz benen aytqanda, normaldıń oń baǵıtı sıpatında tutqası toqtıń baǵıtında aylanatuǵın burǵınıń qozǵalıw baǵıtı qabıl etiledi (177-súwret).



176-súwret. Erkin burıla alatuǵın ramka ótkizgish arqalı ótetuǵın $AA'BB'$ tegisliginde jatatuǵınday bolıp jaylasadı.



177-súwret. Toǵı bar ramkadaǵı oń normaldıń baǵıtı.

Toǵı bar ramkaǵa magnit maydanınıń tásir etiwiniń nátiyjesinde ramka berilgen jaǵdayda belgili bolǵan orientaciyaǵa iye boladı⁴¹. Sonlıqtan oǵan túsirilgen normal qanday da bir baǵıtqa qaray baǵıtlanǵan bolıp shıǵadı. Álbette, magnit maydanındaǵı ramkanı qanday bir tárepke qaray baǵıtlanıwı magnit maydanınıń óziniń baǵıtınıń bolatuǵınlıǵın kórsetedi. Ramka jaylasqan orındaǵı magnit maydanınıń baǵıtı sıpatında ramkaǵa túsirilgen oń normaldıń baǵıtı qabıl etilgen. Solay etip, ramkanıń orientaciyası boyınsha magnit maydanınıń baǵıtın bir mánisli anıqlawǵa boladı.

Bunnan bılay biz magnit maydanınıń sanlıq xarakteristikasını anıqlaw ushın da sol ramkadan paydalanamız.

Ramkaǵa maydannıń baǵıtlawshı tásiriniń tiyiw faktınıń ózi magnit maydanındaǵı ramkaǵa

⁴⁰ Tórende biz magnit maydanında ramkaǵa onıń baǵıtı bir orientaciyasında joǵalatuǵın kúshlerdiń jubınıń tásir etetuǵınlıǵın kóremiz. Sonlıqtan, ulıwma aytqanda, magnit maydanında ramka óziniń teń salmaqlıq ornınıń átirapında terbeledi. Biraq, súyekis kúshleri bar bolǵan jaǵdayda bul terbelisler tez sónedi.

⁴¹ Ramkanıń usı orientaciyasınan basqa qarama-qarsı baǵıtlanǵan orientaciyanıń bolıwı da múmkin. Biraq, usı ekinshi orientaciyaǵa sáykes keletuǵın ramkanıń jaylasıwı ornıqlı emes.

kúshler jubınıń tásir etetuǵınlıǵın ańǵartadı⁴².

Kúshler jubınıń shamasın ramka ildirilip qoyılǵan sabaqtıń burılıwı boyınsha anıqlawǵa boladı. Tájiriye bul juptıń momenti M niń toqtıń kúshi I ge de, magnit maydanın payda etetuǵın toqlardıń jaylasıwlarınan da, ramkanıń óziniń qásiyetlerinde de (onıń ólshepleri, orientaciyası hám ondaǵı toqtıń kúshi) ǵárezli ekenligin kórsetedi.

Eń dáslep ramkanıń óziniń qásiyetlerinde toqtaymız. Onıń ushın magnit maydanınıń payda etetuǵın toqlardıń kúshlerin hám olardıń jaylasıwın ózgerissiz qaldıramız. Ótip turǵan kúshtiń shaması belgili bolǵan ramkanı alamız. Eger ramkaǵa túsirilgen normaldıń baǵıtı maydannıń baǵıtı menen sáykes kelse oǵan tásir etetuǵın kúshlerdiń momenti nolge teń boladı. Ramkaǵa túsirilgen normaldıń baǵıtı menen maydannıń baǵıtı perpendikulyar bolǵan jaǵdayda kúshler jubınıń momenti maksimallıq mánisine jetedi. Sonlıqtan, eger biz ramkanı magnit maydanınıń sanlıq xarakteristikası ushın paydalanatuǵın bolsaq, onda barlıq jaǵdaylarda ramkaǵa túsirilgen normaldı maydannıń baǵıtına perpendikulyar qoyıwǵa kelisemiz. Bunnan keyin tájiriyebeden kúsh momenti M niń ramkadaǵı toqtıń kúshi I ge proporcional bolatuǵınlıǵına ańsat iseniwge boladı. Aqırında, tájiriye hár qıylı tegis ramkalar ushın M momenttiń formasınan ǵárezsiz ramkanıń maydanı S ke de proporcional bolatuǵınlıǵın kóriwge boladı (ramkanıń tuwrı múyeshli, dóńgelek, ellips tárizli h.t.b. formalarǵa iye bolıwınan ǵárezsiz):

$$M \sim IS. \quad (1)$$

Toqtıń kúshi I menen ramkanıń maydanı S tin kóbeymesine proporcional bolǵan shamasın ramkanıń magnit momenti p_m dep ataydı:

$$p_m \sim IS. \quad (2)$$

Magnit maydanınıń berilgen noqatında birdey bolǵan p_m magnit momentine iye bolǵan ramkanıń barlıǵına birdey bolǵan kúshlerdiń momenti M tásir etedi.

Eger, berilgen magnit momentine iye bolǵan magnit maydanınıń hár qıylı noqatlarına jaylastırısaq, onda, ulıwma aytqanda, ramkaǵa hár qıylı kúsh momentleri M lerdiń tásir etetuǵınlıǵın tabamız. Mısalı, eger biz ramkanı toq ótip turǵan ótkizgishke qanshama jaqın jaylastırısaq, onda oǵan tásir etetuǵın kúshlerdiń momentiniń de úlken bolatuǵınlıǵın kóriwge boladı. Bul fakttı magnit maydanınıń sanlıq xarakteristikası ushın, atap aytqanda eger berilgen p_m momentine iye bolǵan ramkaǵa tásir etetuǵın kúshlerdiń momenti M qanshama úlken bolsa, onda ramka jaylasqan orındaǵı maydannıń kernewligi H ta sonshama úlken boladı:

$$M \sim H.$$

Bul juwmaqtı (1)-qatnas penen biriklirip mınanı alamız: magnit maydanındaǵı toq ótip turǵan ramkaǵa tásir etetuǵın kúshlerdiń momenti ramkanıń magnit momenti bolǵan p_m shamasına hám ramka jaylasqan orındaǵı magnit maydanınıń kernewligi H qa tuwrı proporcional:

$$M \sim p_m H. \quad (3)$$

Bul qatnastı biz ramkanıń járdeminde magnit maydanınıń kernewligi H tı anıqlaw ushın paydalanamız. (3)- hám (2)-teńliklerden mınaǵan iye bolamız:

$$H \sim \frac{M}{p_m} \sim \frac{M}{IS}. \quad (4)$$

Sońǵı ańlatpadaǵı proporcionallıq belgiden teńlik belgisine ótiw ushın k proporcionallıq koefficientin kirgiziw kerek. Bunday jaǵdayda

$$H = k \frac{M}{IS} \quad (4a)$$

teńligine iye bolamız.

k proporcionallıq koefficientiniń san mánisleri H, M, I hám S shamaların birliklerin saylap alıw menen baylanıslı. k niń belgili bolǵan san mánisin saylap alıp, (4a)-teńliktiń tiykarında magnit

⁴² Bir tekli bolmaǵan maydanda ramkaǵa jáne bir kúsh tásir etedi (197-paragraf), bul kúshti biz házirshe qaramaymız.

momentiniń shaması p_m belgili bolǵan ramkaǵa tásir etetuǵın kúshlerdiń momenti M niń mánisi boyınsha magnit maydanınıń kernewligi H tıń mánisin ólshewge boladı. Magnit maydanınıń kernewligi H tıń birlikleri haqqında 195-paragrafta aytıladı.

Magnit maydanı baǵıtı boyınsha da, san mánisi boyınsha da táriyiplenetuǵın bolǵanlıqtan, soǵan sáykes magnit maydanınıń kernewligi bolǵan H shaması vektorlıq shama bolıp tabıladı. Bunday jaǵdayda, joqarıda ayılǵanlardı juwmaqlap mınaǵan iye bolamız: magnit maydanınıń hár bir noqatındaǵı magnitlik kernewlik H tıń baǵıtı magnit maydanında ornıqlı halda turǵan toǵı bar ramkanıń oń normalınıń baǵıtı boyınsha anıqlanadı. Kernewliktiń shaması ramkaǵa túsirilgen normal N vektorına perpendikulyar jaylasqan jaǵdayda (4a) teńligi tiykarında kúshler momentiniń shaması boyınsha anıqlanadı.

Endi biz ramkanıń ólshemleri haqqındaǵı máselege de ayqınlıq kirgize alamız. Álbette, bir tekli maydan bolǵan jaǵdayda ramkaǵa tásir etetuǵın kúshlerdiń momenti ramkanıń sheklerindegi maydannıń kernewliginiń ortasha mánisin ólsheydi. Maydannıń kernewliginiń berilgen noqattaǵı mánisin ólshew ushın *ramkanıń ólshemleri onıń sheklerinde maydandı bir tekli dep esaplawǵa bolatuǵınday dárejede kishi bolıwı kerek.*

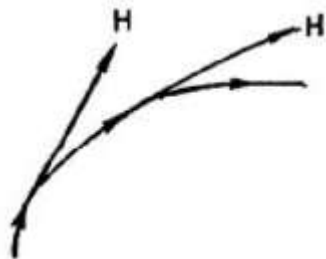
§ 192. Magnit maydanınıń kernewligin grafikalıq súwretlew. Elektrostatikada biz elektrostatikalıq maydannıń xarakteristikası ushın kernewlik sızıqlarınıń járdemindegi grafikalıq usıldı paydalanǵan edik. Tap sol sıyaqlı magnit maydanınıń xarakteristikası ushın biz qaraw ushın magnitlik kernewlik sızıqların kirgizemiz. *Magnitlik kernewliktiń sızıǵı ushın hár bir noqattaǵı urınba usı noqattaǵı kernewlik vektorı H tıń baǵıtı menen sáykes keletuǵın sızıqtı qabıl etemiz* (178-súwret). Kernewlik sızıǵı ushın berilgen hár bir uchastkadaǵı maydannıń kernewlik vektorı H penen sáykes keletuǵın baǵıttı beremiz.

Toǵı bar ramkanı paydalanıp, biz bunnan burınǵı paragrafta táriyiplengen usıldıń járdeminde biz hár qıylı dara jaǵdaylar ushın magnitlik kernewlik sızıqlarınıń túrin anıqlay alamız.

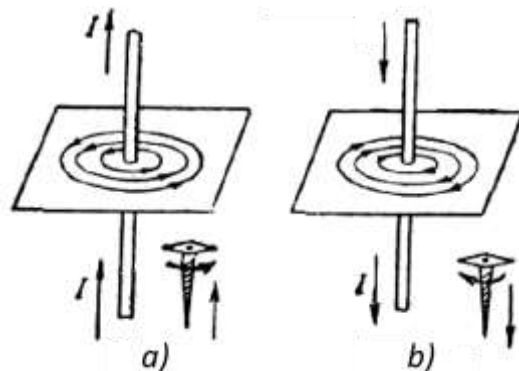
Joqarıda kórgenimizdey, tuwrı uzın toq bolǵan jaǵdayda ramka toqtıń baǵıtı arqalı ótetuǵın tegislikte jaylasadı. Demek, ramkaǵa túsirilgen normal toq ótip turǵan ótkizgishti ramka jaylasqan orın menen tutastıratuǵın radius-vektorga perpendikulyar baǵıtlanǵan. Bunnan uzın toq bolǵan jaǵdayda kernewlik sızıqlarınıń toqqa perpendikulyar tegislikte jatatuǵın, orayı toq ótip turǵan orında jaylasqan sheńberlerdiń túrine iye bolatuǵınlıǵın kóremiz. Tuwrı toqtıń magnit maydanınıń kernewlik sızıqlarınıń baǵıtı 179- a hám b súwretlerde kórsetilgen burǵı qaǵıydası boyınsha anıqlanadı: *eger burǵınıń ilgerilemeli qozǵalıstıń baǵıtın toqtıń baǵıtı menen birdey etip jaylastırısaq, onda usı burǵınıń tutqasınıń aylanıw baǵıtı magnitlik kernewlik sızıqlarınıń baǵıtın beredi.*

Ramkanıń járdeminde qálegen formaǵa iye bolǵan toqlardıń magnit maydanların izertlew múmkin. Mısal sıpatında dóńgelek toqtı alamız; bunday jaǵdayda toqtıń konturına perpendikulyar bolǵan tegisliktegi magnit maydanınıń kernewliginiń sızıqları 180-súwrette keltirilgende yimekliklerden ibarat boladı. Usınıń menen birge, bul sızıqlar tuyıq yimeklikler yamasa dawam etkende tuyıqlanıw tendenciyasına iye yimeklikler bolıp tabıladı.

Ulıwmalıq tuwrı sızıqlı kósherge iye bolǵan birdey dóńgelek toqlardıń sistemasın *solenoid* dep ataydı.



178-súwret. Magnitlik kernewlik sızıqları.



179-súwret. Tuwrı toqtıń magnit maydanınıń kernewlik sızıqlarınıń baǵıtı.

Solenoidtı ádette cilindrlik betke oralǵan toq ótip turǵan ótkizgish sıpatında kórsetedi. Solenoidtıń magnit maydanın izertlep, biz 181-súwrette keltirilgen kartınanı alamız. Solenoidtıń ishki quwıslıǵınıń orta bólegindegi magnit sızıqları kósherge parallel bolǵan tuwrılardıń sistemasın payda etedi; solenoidtıń ushlarına jaqınlaǵanda tuwrı sızıqlar solenoidtıń ushlarında tarqalatuǵın hám keńisliktiń sırtqı bóliminde tuyıqlanatuǵın yamasa olardı dawam etkende tuyıqlanıw tendenciyasına iye bolǵan iymekliklerge aylanadı. Sırtqı bólimdegi solenoidtıń kernewliginiń magnit sızıqları dipoldıń kernewliginiń elektrlik sızıqların eske túsiredi (17b-súwretke qarańız). Biraq, solenoidtıń ishindegi kernewliktiń magnitlik sızıqları solenoidtıń sırtındaǵı kernewliktiń magnitlik sızıqlarına úziksiz túrde ótedi, al dipoldaǵı kernewliktiń elektrlik sızıqları dipoldıń zaryadlarında baǵıtın ózǵertedi. Keńisliktiń solenoidqa salıstırǵanda sırtqı bólimindegi magnit maydanı solenoidlardıń ushlarında ǵana úlken mániske iye boladı, ushlardan qashıqlasqanda maydan tez hálsireydi; solenoidtıń orta bóliminde, onıń sırtında magnit maydanı júdá kishi. Solenoid qanshama uzın bolǵan sayın maydanniń joqarıda kórsetilgen ózgeshelikleri sonshama keskin túrde kórinedi. Solenoidtıń ishki bólimindegi maydandı bir tekli dep esaplawǵa boladı, bir tekli bolıwdan sezilerliktey ayırma solenoidtıń ushlarına jaqın bolǵan orınlarda ǵana alınadı.

Orayları sheńber boyınsha jaylasqan birdey dóńgelek toqlardıń sisteması *toroidtı* payda etedi (182-súwret).

Toroidtıń magnit maydanı onıń tek ishki bóliminde ǵana toplanǵan, keńisliktiń sırtqı bóliminde toǵı bar ramkaǵa kúshler tásir etpeydi.

Eger toroidtıń uzınlıǵı onıń kese-kesimine salıstırǵanda úlken bolsa, onda onıń ishindegi maydandı bir tekli dep esaplawǵa boladı.

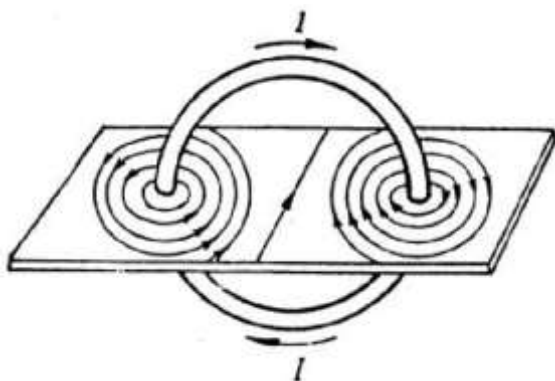
Tájiriybe magnit maydanında toǵı bar ramka qanday baǵıtta turatuǵın bolsa, solnoidtıń da tap sonday baǵıtta turatuǵınlıǵın kórsetedi. Bunday jaǵdayda solenoidqa magnit maydanınıń kernewlik sızıǵına qarama-qarsı baǵıtta qarasaq, onda baqlawshı solenoidtaǵı toqtı saat strelkasınıń qozǵalıǵı baǵıtına qarama-qarsı baǵıtta kóredi (183-súwret). Álbette, n oramnan turatuǵın solenoidqa tásir etetuǵın kúshlerdiń momenti M bir oramǵa tásir etetuǵın kúsh momentinen n ese úlken boladı. Solay etip, 191-paragraftaǵı (4a) formulasına uqsas, eger solenoidtıń kósheri magnitlik kernewlik sızıqlarına perpendikulyar bolsa, onda oǵan momenti

$$M = \frac{1}{k} nIS \cdot H \quad (1)$$

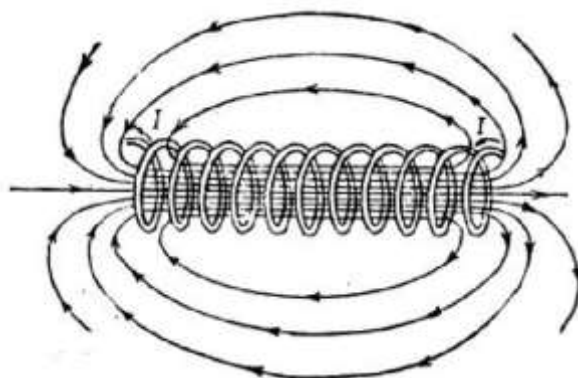
shamasına teń bolǵan kúshlerdiń jubı tásir etedi. Solenoidtıń magnit momenti dep ayırım oramnıń magnit momentinen n ese úlken bolǵan p_c shamasına aytadı:

$$p_c \sim nIS. \quad (2)$$

Bul ańlatpada I - solenoid arqalı ótetuǵın toqtıń kúshi hám S - onıń kese-kesiminiń maydanı.



180-súwret. Dóńgelek toqtırn magnit maydanınıń kernewlik sızıqlarınıń baǵıtı.



181-súwret. Solenoidtıń magnit maydanınıń kernewlik sızıqlarınıń baǵıtı.

Magnit maydanınıń kernewligi sızıqların qaraw *olardıń tuyıq sızıqlar ekenligin kórsetedi*. Magnit kernewliginiń sızıqları barlıq waqıtta tuyıq iymeklikler túrinde elektr toǵın óziniń ishine aladı. Kernewliktiń magnit sızıqlarınıń tuyıq ekenligi olardıń elektr maydanınıń kernewlik sızıqlarınan ózine tán bolǵan ózgesheligi bolıp tabıladı. Bul fakt elektrostatikalıq hám magnit maydanlarınń arasında tereń analogiyanıń joq ekenligin kórsetedi. Bul maydanlardıń tábiyatı hár qıylı.

Kernewlik sızıqları bir zaryadta baslanatuǵın hám basqa zaryadta yamasa sheksizlikte tamamlanatuǵın *elektrostatikalıq maydan potenciallıq maydan bolıp tabıladı*. Bunday maydanniń hár bir noqatına potencialdıń belgili bolǵan mánisin beriwge boladı. Magnit maydanı bolsa onıń kernewlik sızıqlarınıń tuyıqlıǵı menen táriyiplenedi. Bunday maydandı *solenoidlıq dep* ataydı. Biz keyinirek (198-paragrafta) magnit maydanınıń noqatlarına elektrostatikalıq maydan ushın islenetuǵınday bir mánisli potencialdıń mánislerin beriwge bolmaydı.

H kernewlik sızıqları maydanniń hár bir noqatındaǵı kernewliktiń baǵıtın berip, qosımsha anıqlamalar berilmegen jaǵdayda kernewliktiń shamasın bermeydi. Eger bir elektrostatikada paydalanılǵan kernewlik sızıqlarınıń jıyılıǵın (qoyılıǵın) kernewliktiń san mánisi menen salıstırısaq, onda kernewlik sızıqlarınıń súwreti magnit maydanın sanlıq tárepten de táriyipleı aladı. Jetkilikli dárejedeǵi kishi uchastkada qálegen maydandı bir tekli dep esaplawǵa boladı; usınday uchastkadaǵı kernewlik sızıqlarına normal baǵıtlangan bettiń elementiniń ΔS_0 uchastkasın alamız. ΔS_0 maydanı arqalı ótetuǵın sızıqlardı sanı ΔN di usı ΔS_0 maydanına qatnası maydanniń berilgen uchastkasındaǵı kernewlikke teń bolatuǵınday etip alamız:

$$\frac{\Delta N}{\Delta S_0} = H.$$

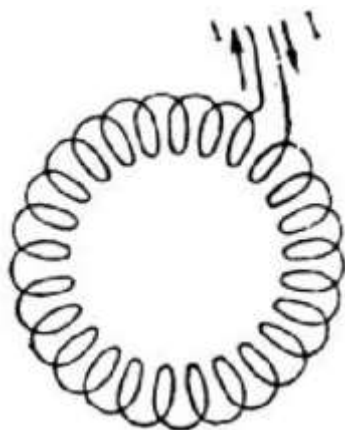
Qálegen ΔS maydanı arqalı ótetuǵın kernewlik sızıqlarınıń sanı ΔS maydanın usı sızıqlarǵa perpendikulyar baǵıtta kesip ótetuǵın ΔS_0 maydanın kesip ótetuǵın sızıqlardıń sanına teń (184-súwret). Bunnan ΔS maydanın kesi ótetuǵın kernewlik sızıqlarınıń sanı

$$\Delta N = H \Delta S \cos \alpha \quad (3)$$

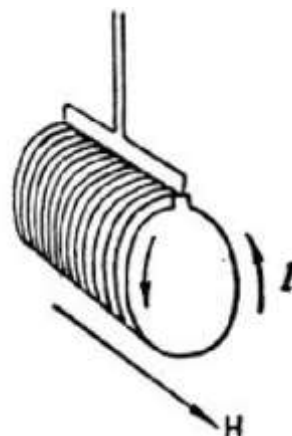
shamasına teń. Bul teńlikte α - kernewlik sızıqları menen ΔS maydanına túsirilgen normal arasındaǵı múyesh. $H \cos \alpha = H_n$ teńligi orınlanatuǵın bolǵanlıqtan (H_n arqalı kernewlik vektóri **H** tırn bettiń ΔS elementine túsirilgen normaldıń baǵıtındaǵı proekciyası belgilengen), (3)-teńlikti bılayınsha kóshirip jazıwǵa boladı:

$$\Delta N = H_n \Delta S. \quad (3a)$$

(Za) arılatpası bettiń ΔS elementi arqalı ótetuǵın *kernewliktiń elementar aǵısın* anıqlaydı. Álbette, ΔN aǵısı H_n niń belgisinen gárezli bolǵan belgige iye boladı. H_n shamasınıń belgisi normaldıń baǵıtın saylap alıw menen baylanıslı. Eger ΔS elementi tuyıq betke tiyisli bolsa, onda oń baǵıt sıpatında berilgen bet penen sheklengen kólemge salıstırǵanda sırtqı normaldıń baǵıtı qabıl etilgen (126-paragrafta keltirilgen maǵlıwmatlar menen salıstırıńız).



182-súwret. Toroid.

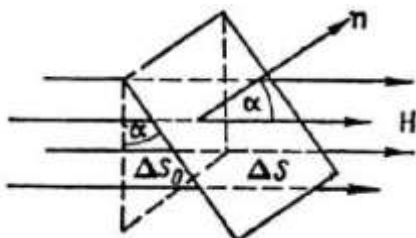
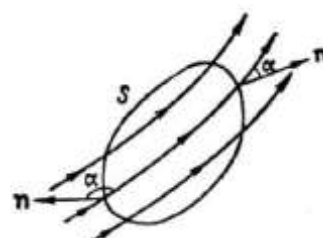


183-súwret. Sırtqı magnet maydanındaǵı solenoidtiń orientaciyası.

Shekli bet arqalı ótetuǵın tolıq aǵıs N berilgen S betin payda etetuǵın barlıq ΔS elementleri arqalı ótetuǵın aǵıslardıń algebralıq summasına teń:

$$N = \sum \Delta N = \sum H_n \Delta S. \quad (4)$$

Eger S beti tuyıq bolsa, onda betke kiretuǵın magnet kernewliginiń sıziqlarınıń sanı, onnan shıǵatuǵın sıziqlardıń sanına teń. Sebebi magnetlik kernewlik sıziqları barlıq waqıtta tuyıq iymeklikler bolıp tabıladı. Bunday jaǵdayda sırtqı normaldıń baǵıtı menen doǵal múyesh jasaytuǵın sıziqlar teris aǵıstı payda etedi (185-súwret). Al shıǵıwshı sıziqlar sırtqı normal menen súyir múyeshti payda etip oń aǵıstı payda etedi. Solay etip, eki aǵıs bir birin kompensacıyalaydı hám biz mınaday juwmaqqa kelemiz: *qálegen tuyıq bet arqalı magnetlik kernewliktiń tolıq aǵısı nolge teń.*

184-súwret. Qıya jaylasqan ΔS beti arqalı ótetuǵın kernewlik sıziqları.

185-súwret. Tuyıq bet arqalı ótetuǵın kernewlik sıziqları.

Bul jaǵdayda magnet hám elektrostatalıq maydanlardıń arasındaǵı úlken ayırma jáne de kórinedi; Ostrogradskiy-Gauss teoreması boyınsha $\mathbf{E}$ elektr kernewliginiń sıziqlarınıń tolıq aǵısı nolden ózgeshe bola aladı (126-paragraf).

Integrallıq esaptıń belgilewlerinen paydalanıp, (4)-ańlatpadaǵı summanı integral menen alıstıramız hám nátiyjede S beti arqalı magnetlik kernewliktiń aǵısı ushın ańlatpanı alamız:

$$N = \int_S H_n dS. \quad (4a)$$

Bul integral barlıq S betine tarqatılǵan.

Joqarıda aytııp ótilgenindey, tuyıq bet arqalı magnetlik kernewliktiń aǵısı nolge teń. Solay etip, eger (4a) integralın tuyıq betke tarqatatuǵın bolsaq, onda

$$\int_S H_n dS = 0$$

teńligine iye bolamız. Meyli, biz qarap atırǵan bet penen sheklengen kólem V bolsın. Bunday jaǵdayda tuyıq betti noqatqa alıp kelgende

$$\lim_{V \rightarrow 0} \left(\frac{1}{V} \int_S H_n dS \right) = \operatorname{div} \mathbf{H}$$

teńligin alamız. Al, $\int_S H_n dS$ shaması barlıq waqıtta nolge teń bolıp qala beretuǵın bolǵanlıqtan

$$\operatorname{div} \mathbf{H} = 0$$

formulasına iye bolamız. Solay etip, *boslıqta, keńisliktiń qálegen noqatındaǵı magnit maydanınıń kernewlik vektorı $\mathbf{H}$ tıń divergenciyası nolge teń.*

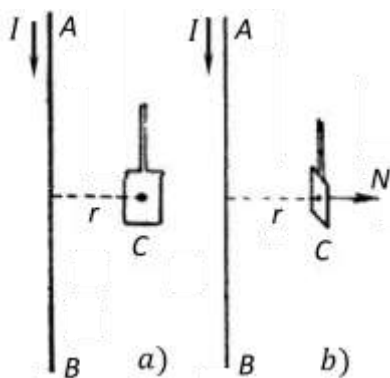
132-paragrafta kórsetilip ótilgenindey, elektrostatikada

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = 4\pi\rho$$

teńligi orınlı edi. Bul teńlikte ρ - biz qarap atırǵan noqattaǵı kólemlik zaryadlardıń tıǵızlıǵı. Tek, kólemlik elektr zaryadlarınń tıǵızlıǵı nolge teń bolǵan noqatlarda ǵana (yaǵnıy $\rho = 0$ teńligi orınlanatuǵın noqatlarda) elektrostatikalıq maydannıń kernewlik vektorı $\mathbf{E}$ niń divergenciyası nolge teń.

Kólemlik elektr zaryadlarınń tıǵızlıǵı ρ nolge teń bolmaǵan barlıq orınlarda $\mathbf{E}$ niń divergenciyası da nolge teń bolmaydı. Aytılǵan jaǵdaylar boyınsha boslıqtaǵı $\mathbf{H}$ vektorınıń divergenciyası barlıq waqıtta nolge teń bolǵanlıqtan, magnitlik qubılıslar oblastında elektr zaryadınıń analogınıń bolmaytuǵınlıǵın kóremiz.

§ 193. Toqlardıń magnit maydanın anıqlawdıń usılı. Joqarıda kórsetkenimizdey, keńisliktiń qanday da bir noqatındaǵı maydannıń kernewligi $\mathbf{H}$ toqlar ótip turǵan ótkizgishlerdiń formasınan, toqlardıń kúshinen hám biz qarap atırǵan noqattıń sol ótkizgishlerde salıstırǵandaǵı ornınan ǵárezli. Eksperimentte bolsa $\mathbf{H}$ kerewliktiń shaması magnit momenti p_m belgili bolǵan ramkaǵa tásir etetuǵın kúshlerdiń momenti M boyınsha anıqlanadı.



186-súwret.

Maydannıń kernewligin ramkanıń járdeminde anıqlaw.

Eń ápiwayı mısál retinde biz tuwrı hám uzın sim alıp, onnan bazı bir r qashıqlıǵındaǵı maydannıń kernewligi H tı anıqlay alamız.

Eń dáslep eksperimentallıq jol menen ramkanıń járdeminde maydannıń kernewligi H tı sol sim arqalı ótip atırǵan toqtıń kúshi I den hám simǵa shekemgi qashıqlıq r den qanday ǵárezlikke iye ekenligin anıqlaymız. Tuwrı hám uzın sim arqalı ótip atırǵan toqtıń magnit maydanı bir tekli emes, biraq, eger ramkanıń ólshemleri r qashıqlıǵına salıstırǵanda kishi bolsa, onda ramkanıń sheklerindegi maydandı bir tekli dep qarawǵa boladı. 191-paragrafta aytılıp ótilgenindey, toq ótip turǵan uzın, tuwrı simniń qasında ramkanıń onıń normalı simniń eń jaqın uchastkasınan ramkaǵa túsirilgen r tuwrısına perpendikulyar bolıp jaylasadı. Eger I toǵı joqarıdan tómenge qaray ótetuǵın bolsa (186-a súwret), onda N ramkasına túsirilgen normal óziniń oń ushı menen oqıwshıǵa qaraǵan halda sızilmanıń tegisligine perpendikulyar jaylasadı. Ramkaǵa túsirilgen normaldı r diń baǵıtında uslap turıw ushın (186-b súwret) ramkaǵa kúshlerdiń M momentin

túsiriw kerek, al onıń shaması, joqarıda aytılganday, maydannıń kernewligi H qa proporcional. Ramkanıń turaqlı bolǵan magnit momenti p_m de kúshlerdiń momenti M di ólshep, onıń AB sımı arqalı ótip atırǵan toqtıń kúshi I ge proporcional ekenligin kóriwge boladı. Bunnan magnit maydanınıń kernewligi H tıń usı maydandı payda etken toqtıń kúshi I ge proporcional ekenligi kelip shıǵadı:

$$H \sim I.$$

Ekinshiden, ramkanı sımnan hár qıylı r qashıqlıqlarında jaylastırıp, M momentiniń sımǵa shekemgi qashıqlıq r den kerı proporcional ekenligin tabıw múmkin, bunnan maydannıń kernewliginiń r ge kerı proporcional ekenligi kelip shıǵadı:

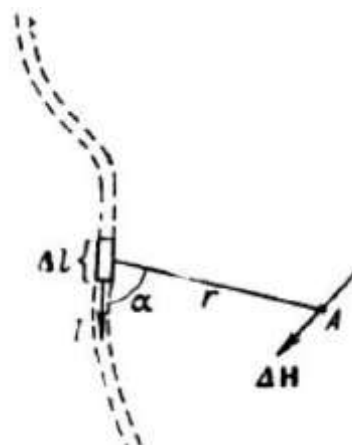
$$H \sim \frac{1}{r}.$$

Tuwrı uzın toqtıń magnit maydanınıń kernewliginiń sımǵa shekemgi qashıqlıqqa kerı proporcional ekenligi 1820-jılı Bio hám Savar tárepinen tabıldı. Biraq, bunday ǵárezlik tuwrı uzın toq ushın dara jaǵdayda ǵana orın aladı. Hár bir jaǵdayda maydannıń kernewliginiń toq ótip turǵan ótkizgishlerdiń ulıwmalıq jaylasıwlarınan ayırıqsha túrde ǵárezli boladı. Birden bir, ulıwmalıq jaǵday berilgen noqattaǵı magnit maydanınıń kernewligi H tıń usı maydandı payda etken toqtıń kúshi I den ǵárezligi bolıp tabıladı.

Ótkizgish arqalı ótetuǵın toq tárepinen payda etilgen magnit maydanınıń kernewligi H usı ótkizgishtiń ayırım uchastkalarınıń barlıǵınıń tásiiri boyınsha anıqlanadı. Ayırım uchastkalar ΔH elementar kernewliklerin payda etedi hám, sonlıqtan, baqlanatuǵın H kernewligi olardıń vektorlıq qosındısı bolıp tabıladı. Bul jaǵday toqtıń elementar uchastkası menen usı uchastkadaǵı toqtıń payda etken magnit maydanınıń kernewligi arasındǵı baylanıstı ornatiwǵa tábiyiy túrdegi tırısıwlarǵa alıp keldi. Tájiriybede biz toqtıń ayırım uchastkasın payda ete almaymız hám, sonlıqtan toqtıń elementi tárepinen payda etiletuǵın magnit maydanın tikkeley ólshewdiń múmkinshiligi joq. Tek toqtıń barlıq elementleri tárepinen berilgen noqatta payda etiletuǵın magnit maydanınıń qosındı kernewligin ǵana ólshewge boladı. Biraq, Laplasqa tájiriybelerde alınǵan maǵlıwmatlardı ulıwmalastırıw arqalı sáykes elementar nızamdı keltirip shıǵarıwdıń sáti tústi. Bul nızamdı iqtıyarlı formaǵa iye bolǵan konturdiń uchastkaları ushın qollanıp, tájiriybelerdegi ólshewlerdiń nátiyjeleri menen sáykes keletuǵın maydannıń kernewliginiń qosındı mánisin anıqlawǵa múmkinshilik beredi. *Bul nızamdı Bio-Savar-Laplas nızamı dep ataw qabıl etilgen.*

187-súwret.

Toqtıń Δl elementi A noqatında Δl elementi menen r radius-vektori jatqan tegislikke perpendikulyar bolǵan ΔH shamasına teń magnit maydanınıń kernewligin payda etedi.



Onıń mazmunı mınalardan ibarat: Kúshi I bolǵan toq ótip turǵan konturdiń Δl elementi iqtıyarlı saylap alınǵan A noqatında kernewligi ΔH shamasına teń magnit maydanın payda etedi (187-súwret). Onıń shaması

$$\Delta H = k' \frac{I \Delta l \sin \alpha}{r^2} \quad (1)$$

formulasınıń járdeminde anıqlanadı. Bul formulada r - toqtıń Δl elementinen A noqatına shekemgi qashıqlıq, α arqalı A noqatına ótkerilgen radius vektor r menen Δl elementi arasındaǵı múyesh, al k' arqalı proporcionalıq koefficient belgilengen. ΔH vektorı Δl elementi menen r radius-vektorı jatqan tegislikke perpendikulyar; ΔH vektorınıń baǵıtı burǵı qaǵıydasınıń járdeminde anıqlanadı: eger burǵınıń ilgerilemeli qozǵalıstınıń baǵıtı konturdıń Δl elementindegi toqtıń baǵıtına sáykes keletuǵın bolsa, onda burǵınıń qozǵalıstı baǵıtı ΔH vektorınıń baǵıtına sáykes keledi.

Joqarıda ayılǵanlar boyınsha, (1)- Bio-Savar-Laplas formulası A noqatındaǵı tolıq toq tárepinen payda etilgen magnit maydanınıń tolıq kernewligi H tı emes, al onıń konturdıń Δl elementi tárepinen payda etilgen bólimin ǵana beredi. *Tolıq kernewlik H konturdı oyımızda bólgen barlıq elementler tárepinen payda etilgen ΔH kernewlikleriniń vektorlıq qosındısına teń.* Hár qıylı konturlar ushın (1)-formula tiykarında ótkerilgen esaplawlardıń tájiriybelardıń nátiyjeleri menen sáykes keliwi sol formulanıń durıs ekenligin tastıyıqlaydı.

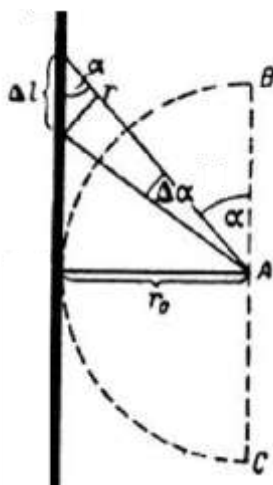
ΔH kernewliginiń shamasın da, baǵıtın da anıqlaw ushın (1)-formulanı vektorlıq túrde jazıwǵa boladı:

$$\Delta H = k' \frac{I[\Delta l \times r]}{r^3}. \quad (1a)$$

Bul teńlikte $[\Delta l \times r]$ kóbeymesi Δl hám r vektorlarınıń vektorlıq kóbeymesi bolıp tabıladı.

Ótkizgishtiń (sımnıń) uzınlıǵınıń Δl elementiniń baǵıtı usı element arqalı ótip atırǵan toqtıń baǵıtı menen birdey dep qabıl etiledi. r radiusı vektorı ótkizgishtiń Δl elementinen maydan esaplanıp atırǵan A noqatına qaray júrgiziledi. Usı A noqatındaǵı maydanniń tolıq kernewligi H barlıq ΔH elementar maydanlardıń geometriyalıq summası sıpatında anıqlanadı:

$$H = \sum \Delta H.$$



188-súwret.

Tuwrı toqtıń magnit maydanınıń kernewligin anıqlawǵa arnalǵan.

Elementar bolǵan (1)-nızamnan tuwrı hám uzın ótkizgish arqalı ótip atırǵan toqtıń payda etken magnit maydanı H tıń I/r shamasına proporcional ekenligi kelip shıǵadı. Haqıykatında da, júdá uzın bolǵan tuwrı simnan r_0 qashıqlıǵında jaylasqan A noqatındaǵı magnit maydanınıń kernewligi H tı (188-súwret) simniń ayırım elementleri tárepinen payda etilgen elementar kernewliklerdiń summası sıpatında tabamız. (1)- Bio-Savar-Laplas nızamı boyınsha toqtıń Δl elementi A noqatında

$$\Delta H = k' \frac{I[\Delta l \sin \alpha]}{r^2}$$

kernewligin payda etedi. Bul teńlikte r arqalı Δl elementinen A noqatına shekemgi qashıqlıq belgilengen; ΔH súwret tegisligine perpendikulyar, eger toq joqarıdan tómén qaray baǵıtlanǵan bolsa, onda ΔH oqıwshıǵa qaray baǵıtlanǵan. Barlıq Δl elementleri payda etken kernewlikler ΔH birdey bolıp baǵıtlanadı hám qosındı kernewlik bolsa

$$H = \sum k' \frac{I \Delta l \sin \alpha}{r^2}$$

algebraıq summasınıń járdeminde ańǵartıldı. 188-súwrette

$$\Delta l = \frac{r \cdot \Delta \alpha}{\sin \alpha}$$

teńligine iye bolamız. Bunnan

$$\frac{\Delta l}{r^2} = \frac{\Delta \alpha}{r \sin \alpha}$$

qatnasın alamız. Biraq, $r \sin \alpha = r_0$ hám, usıǵan sáykes,

$$\frac{\Delta l}{r^2} = \frac{\Delta \alpha}{r_0}$$

qatnasına iye bolamız. Bunnan keyin H ushın jazılǵan ańlatpa

$$H = \sum k' \frac{I \sin \alpha \cdot \Delta \alpha}{r_0} \quad (2)$$

túrine enedi. Biz ótkizgishti oyımızda bólgén Δl elementlerin sheksiz kishi dep esaplap, $\Delta \alpha$ múyeshiniń de sheksiz kishi ekenligin hám, usıǵan sáykes, (2)-ańlatpadaǵı summanıń

$$H = \int k' \frac{I \sin \alpha d\alpha}{r_0}$$

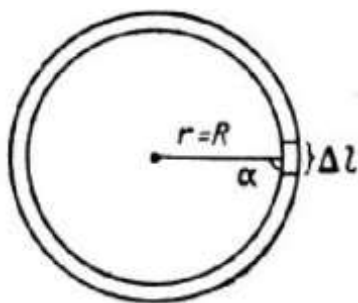
integralı menen almasıırılıwınıń kerek ekenligin kóremiz.

Integrallawdı α nıń barlıq mánisleri boyınsha $\alpha = 0$ shamasınan (bul eń joqarǵı dl elementlerine sáykes keledi) $\alpha = \pi$ shamasına shekem (bul eń tómengi dl elementlerine sáykes keledi) ámelge asırıw kerek. Demek integrallaw shekleri 0 hám π shamaları bolıp tabıladı. Usınıń menen birge I hám r_0 shamalarınń turaqlı ekenligin ańǵarıp, olardı turaqlı shamalar túrinde integral belgisiniń astınan shıǵarıwǵa boladı jáne, nátiyjede,

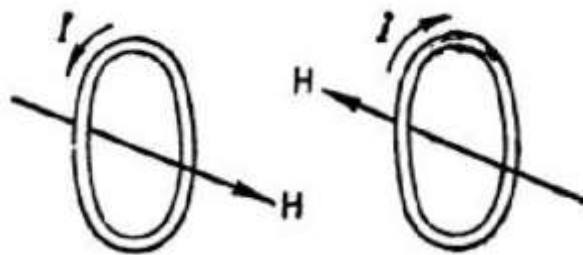
$$H = k' \frac{I}{r_0} \int_0^\pi \sin \alpha d\alpha = k' \frac{I}{r_0} [-\cos \alpha]_0^\pi = k' \frac{2I}{r_0}. \quad (3)$$

teńliklerin alamız. Solay etip, Bio-Savar-Laplas nızamınan sheksiz uzın tuwrı ótkizgis arqalı ótip atırǵan toqtıń payda etken magnit maydanınıń kernewligi H tıń I/r_0 shamasına proporcional ekenligi haqıyqatında da kelip shıǵadı.

§ 194. Dóńgelek toq penen solenoidtiń magnit maydanı. Bio-Savar-Laplas formulasın qollanıwǵa bir qatar misallardı keltiremiz.



189-súwret. Dóńgelek toqtıń orayındaǵı maydanınıń kernewligin esaplawǵa.



190-súwret. Dóńgelek toqtıń orayındaǵı magnit maydanınıń kernewliginiń baǵıtı.

1. Dóńgelek toqtıń orayındaǵı magnit maydanınıń kernewligi. Meyli radiusı R bolǵan dóńgelek túrindegi konturdan kúshi I ge teń bolǵan toq ótip turǵan bolsın (189-súwret). Dóńgelek konturdıń qálegen Δl elementi oraydan birdey bolǵan $r = R$ qashıqlıǵında jaylasadı. Usınıń menen birge, qálegen Δl elementi ushın R radius-vektori Δl ge perpendikulyar. Bunnan $\alpha = \frac{\pi}{2}$ teńliginiń orınlanatuǵınlıǵın kóremiz hám soǵan sáykes $\sin \alpha = 1$ teńligi orınlı boladı.

Bunnan 193-paragraftağı (1)-formula boyınsha Δl elementi tárepinen dóńgelektiń orayında payda etilgen magnit maydanınıń kernewligi ushın

$$\Delta H = k' \frac{I \Delta l}{R^2}$$

teńligine iye bolamız. $\Delta \mathbf{H}$ vektorınıń baǵıtı burǵı qaǵıydası boyınsha anıqlanadı: $\Delta \mathbf{H}$ vektorı dóńgelektiń tegisligine perpendikulyar hám toqtıń baǵıtı saat strelkasınıń qozǵalıw baǵıtı menen sáykes kelgende súwrettiń tegisliginen arman qaray baǵıtlangan. Solay etip, toqtıń dóńgelek konturınıń barlıq Δl elementleri orayda $\Delta \mathbf{H}$ tıń birdey baǵıtın payda etedi hám bunday jaǵdayda maydanniń qosındı kernewligi bolǵan $\mathbf{H}$ shaması $\Delta \mathbf{H}$ shamalarınń algebralıq summasına teń boladı:

$$H = \sum \Delta H = \sum k' \frac{I \Delta l}{R^2}.$$

Toqtıń kúshi I , R radiusı hám k' proporcionallıq koefficienti turaqlı shamalar bolıp tabıladı hám sonlıqtan olardı summa belgisiniń aldına shıǵarıwǵa boladı. Bunnan

$$H = k' \frac{I}{R^2} \sum \Delta l$$

formulasına iye bolamız. Biraq, $\sum \Delta l$ summası radiusı R ge teń bolǵan dóńgelek kontur bólingen barlıq elementlerdiń qosındısı bolıp tabıladı, yaǵnıy, $\sum \Delta l$ summası radiusı R bolǵan sheńberdiń uzınlıǵına teń. Bunnan $\sum \Delta l = 2\pi R$ hám

$$H = k' \frac{2\pi I}{R}. \quad (1)$$

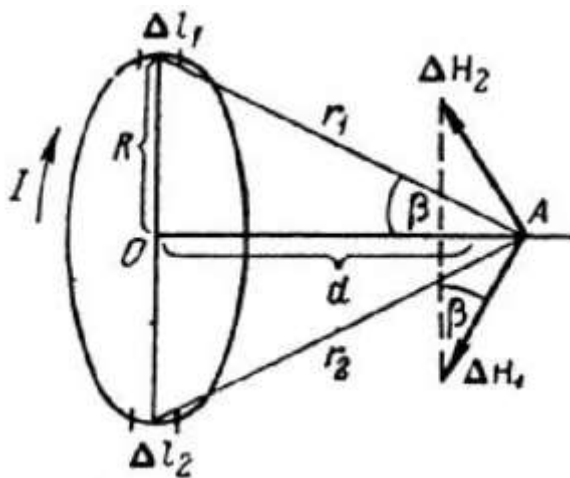
H penen I diń baǵıtlarınıń arasındaǵı baylanıs 190-súwrette keltirilgen.

2. Dóńgelek toqtıń kósherindegi magnit maydanınıń kernewligi. Dóńgelek toqtıń kósheri dep konturdiń sheńberiniń orayınan qayta tiklengen perpendikulyarǵa aytamız. Konturdiń tegisliginen d qashıqlıǵında jaylasqan A noqatındaǵı kernewlikti anıqlaymız (191-súwret); dóńgelek konturdiń radiusın R , al A noqatınan Δl elementine shekemgi qashıqlıqtı r arqalı belgileymiz. Diametrdiń qarama-qarsı táreplerinde jaylasqan Δl_1 hám Δl_2 elementleri payda etken $\Delta \mathbf{H}_1$ hám $\Delta \mathbf{H}_2$ kernewliklerin qaraymız. r menen Δl arasındaǵı múyesh α múyeshiniń shaması $\pi/2$ ge teń bolǵanlıqtan (konustıń jasawshısı menen onıń ultanınıń dóńgeleginiń elementi arasındaǵı múyeshtey), 193-paragraftağı (1)-formula boyınsha sáykes

$$\Delta H_1 = k' \frac{I \Delta l_1}{r_1^2}, \Delta H_2 = k' \frac{I \Delta l_2}{r_2^2}$$

formularına iye bolamız.

191-súwret.
Dóńgelek toqtıń kósherindegi
magnit maydanınıń kernewligin anıqlawǵa.



Δl_1 hám Δl_2 elementleriniń uzınlıqların birdey hám Δl shamasına teń etip alıp jáne $r_1 = r_2$ teńliginiń orınlı ekenligin ańǵarıp, mınanı alamız:

$$\Delta H_1 = \Delta H_2 = k' \frac{I \Delta l}{r^2}. \quad (2)$$

Bul formulada $r = r_1 = r_2$. Solay etip, ΔH_1 hám ΔH_2 shamaları san mánisleri boyınsha teń; al baǵıtları boyınsha hár qıylı: ΔH_1 kernewligi r_1 ge hám Δl_1 elementine perpendikulyar, ΔH_2 bolsa r_2 ge hám Δl_2 elementine perpendikulyar; $\Delta \mathbf{H}_1$ hám $\Delta \mathbf{H}_2$ vektorlarınıń baǵıtları burǵı qaǵıydası boyınsha anıqlanadı (191-súwretke qarańız). $\Delta \mathbf{H}_1$ hám $\Delta \mathbf{H}_2$ vektorlarınıń geometriyalıq qosındısı bolǵan $\Delta \mathbf{H}$ vektorı dóńgelek toqtırn baǵıtı menen baǵıtlas bolıp, onıń san mánisi olardıń OA kósherine túsirilgen proekciyalarınıń qosındısına teń:

$$\Delta H = \Delta H_1 \sin \beta + \Delta H_2 \sin \beta.$$

191-súwretten $\sin \beta = \frac{R}{r}$ teńliginiń orınlı ekenligin ańǵarıp hám ΔH_1 menen ΔH_2 lerdiń orınlarına olardıń (2)-teńlik boyınsha anıqlanǵan san mánislerin qoyıp, mınanı alamız:

$$\Delta H = k' 2 \frac{I \Delta l}{r^2} \cdot \frac{R}{r} = k' \frac{2 I \Delta l R}{r^3}.$$

Dóńgelek konturdı joqarıda kórsetilgendey Δl elementleriniń juplarına bólip, magnit maydanınıń qosındı kernewligi $\mathbf{H}$ tırn kósher boyınsha baǵıtlanǵanlıǵın hám ΔH shamalarınń algebralıq summasına teń ekenligin kóremiz:

$$H = \sum k' \frac{2 I \Delta l \cdot R}{r^2} = k' \frac{I R}{r^2} \cdot 2 \sum \Delta l.$$

Barlıq elementlerdiń summası $2 \sum \Delta l$ dóńgelek konturdıń uzınlıǵı $2\pi R$ ge teń, sonlıqtan

$$H = k' \frac{2\pi R^2 I}{r^3}.$$

191-súwretten $r^2 = R^2 + d^2$ ekenligin kórinip tur. Bunnan mınaday ańlatpanı alamız:

$$H = k' \frac{2\pi R^2 I}{(R^2 + d^2)^{3/2}}. \quad (3)$$

$\mathbf{H}$ tırn baǵıtın bılayınsha anıqlaymız: usı $\mathbf{H}$ vektorınıń baǵıtında qaraǵanda biz toqtı saat strelkasınıń qozǵalı baǵıtında ótetuǵınlıǵın kóremiz.

Dóńgelek toqtırn orayı ushın $d = 0$ hám (3)-formula

$$H = k' \frac{2\pi I}{R}$$

formulasın beredi, yaǵnıy biziń kútkenimizdey, (1)-formulaǵa ótedi.

Dóńgelek toqtırn radiusı R den úlken bolǵan d qashıqlıqları ushın (3)-formulanıń bólimindegi R di esapqa almawǵa boladı hám bunday jaǵdayda juwıq túrde

$$H \cong k' \frac{2\pi R^2 I}{d^3}$$

formulasına iye bolamız, yaǵnıy H kernewligi d qashıqlıǵınıń kubına keri proporcional ózgeredi.

3. Solenoidtir kósherindegi magnit maydanınıń kernewligi. Biz joqarıda solenoidtir cilindrlik betke oralǵan ótkizgishten turatuǵınlıǵın kórdik. Eger solenoidtir oramları bir birine tıǵız jaylasqan bolsa, onda ol ulıwmalıq kósherge iye birdey radiuslı dóńgelek toqlardıń sistemasına ekvivalent boladı. Bunnan solenoidtir kósherindegi magnit maydanınıń kernewligi ayırım dóńgelek toqlardıń payda etken magnit maydanlarınıń kernewliklerin summalawdıń járdeminde anıqlanıwınıń múmkin ekenligi kelip shıǵadı.

Sáykes esaplaw (mayda shrift penen jazılǵan tekstke qarańız) mınanı beredi:

$$H = k' 4\pi n I. \quad (4)$$

Bul teńlikte n - solenoidtir uzınlıǵınıń bir birligindegi oramlar sanı, I - toqtırn kúshi.

Eger solenoidtir uzınlıǵınıń kishi dl uchastkasın alsaq, onda oǵan ndl dana oram sáykes keledi; hár bir oramdaǵı toqtırn kúshin I arqalı belgilep, solenoidtir di uchastkasın kúshi $I n dl$ shamasına teń bolǵan dóńgelek toq dep qarawǵa boladı. (3)-formulaǵa sáykes, usı uchastka tárepinen solenoidtir kósherinde jaylasqan bazı bir A noqatındaǵı magnit maydanınıń kernewligi

$$dH = k' \frac{2\pi I R^2 \cdot n}{(R^2 + l^2)^{3/2}} dl \quad (5)$$

shamasına teń boladı. Bul teńlikte l arqalı kósher boyınsha dl uchastkasınan A noqatına shekemgi qashıqlıq belgilengen. Qaraw ushın solenoidtıń kósheri menen biz qarap atırǵan noqattan dl uchastkasına túsirilgen radius-vektordıń arasındaǵı β múyeshin kirgizip (192-súwret),

$$l = R \operatorname{ctg} \beta$$

teńligin hám onnan

$$dl = -R \frac{d\beta}{\sin^2 \beta}$$

teńligin alamız. Sonıń menen birge

$$R^2 + l^2 = \frac{R^2}{\sin^2 \beta}$$

teńliginiń orınlı ekenligi ayqın. $|dl|$ menen $R^2 + l^2$ mánislerin (5)-formulaǵa qoyıp [(5)-formulada dl oń shama bolıp tabıladı], mınaday teńlikke iye bolamız:

$$dH = k' 2\pi n I \cdot \sin \beta \, d\beta.$$

A noqatındaǵı kernewlik toqlardıń kósheri boyınsha baǵıtlanǵan bolǵanlıqtan, A noqatındaǵı eń aqırǵı qosındı H tı alıw ushın alınǵan ańlatpanı β múyeshiniń barlıq mánisleri boyınsha integrallaw kerek. Eger solenoidtıń ushlarındaǵı sol múyeshlerdiń mánislerin β_1 hám β_2 arqalı belgilesek, onda integrallawdıń nátiyjesinde mınaday teńlikti alamız:

$$H = k' 2\pi n I \int_{\beta_1}^{\beta_2} \sin \beta \, d\beta = k' 2\pi n I (\cos \beta_1 - \cos \beta_2). \quad (6)$$

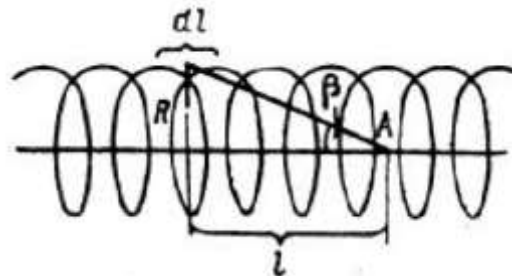
Bul nátiyje A noqatı turǵan orınnan hám solenoidtıń uzınlıǵına baylanıslı. Sheksiz uzın solenoid ushın $\beta_1 = 0$ hám $\beta_2 = \pi$ teńlikleri orınlı. Sonlıqtan (4)-formulaǵa sáykes keletuǵın

$$H = k' 4\pi n I$$

ańlatpasına iye bolamız.

192-súwret.

Solenoidtıń ishindegi magnit maydanınıń kernewligin esaplawǵa.



Qálegen shekli solenoid ushın maydannıń kernewligi sheksiz uzın solenoidtıń maydanınıń kernewliginen kishi boladı; shekli solenoid ushın kernewliktiń eń úlken mánisi solenoidtıń ushlarınan teńdey qashıqlıqta jaylasqan noqatta júzege keledi. Solenoidtıń ushında turǵan noqat ushın kernewliktiń mánisi (6)-formulanıń járdeminde alınadı; eger usı ushta múyeshlerdiń birewiniń mánisi, mısalı $\beta_2 = \frac{\pi}{2}$ shamasına teń etip alsaq, onda

$$H = k' 2\pi n I \cos \beta_1$$

ańlatpasın alamız. Eger solenoid júdá uzın bolsa, onda $\beta_1 \cong 0$ hám

$$H = k' 2\pi n I,$$

yaǵnıy solenoidtıń ushında maydannıń shaması ishindegi maydannıń shamasınan eki ese kishi boladı eken. Maydannıń kernewligi burǵı qaǵıydası boyınsha baǵıtlanǵan. Sonlıqtan, kernewliktiń baǵıtında qarap, biz oramlardaǵı toqlardıń saat strelkasınıń qozǵalıǵı baǵıtında ótip turǵanlıǵın kóremiz.

§ 195. Magnit maydanınıń kernewliginiń ólshem birlikleri. Birliklerdiń absolyut elektromagnitlik sisteması. Eger 193-paragraftaǵı (1)- Bio-Savar-Laplas nızamındaǵı k' koefficientin qanday da bir belgili bolǵan sanǵa teń etip alıw jolı menen magnit maydanınıń kernewliginiń birligin saylap alıwǵa boladı. CGSE-sistemasında toqtıń kúshi CGSE-sistemasında,

al Δl menen r shamaların mánislerin santimetrlerde ólshengen jaǵdayda k' koefficientiniń mánisin birge teń dep boljaydı; usınday jollar menen kernewliktiń *CGSE* -sistemasındaǵı birligi anıqlanadı.

Bunday jaǵdayda Bio-Savar-Laplas formulası mınaday túrge iye boladı:

$$\Delta H = \frac{I \Delta l \sin \alpha}{r^2}. \quad (1)$$

Toq ótip turǵan ayırım Δl elementi tárepinen maydanın belgili bolǵan orında payda etilgen ΔH magnit maydanınıń kernewligin eksperimentte tikkeley tabıwǵa bolmaytuǵın bolǵanlıqtan, magnit maydanınıń kernewligi H tıń birligin anıqlaw ushın qanday da bir orındaǵı belgili forma menen ólshemlerge iye bolǵan ótkizgish arqalı ótip turǵan toq payda etken magnit maydanın qaraw kerek. Usınday ótkizgish sıpatında biz tuwrı jáne júdá uzın ótkizgishti alamız. Bunday ótkizgishten r qashılıqta jaylasqan orındaǵı magnit maydanınıń kernewligi H tıń shaması 193-paragraftaǵı (3)-formulaǵa sáykes, mınaǵan teń:

$$H = k' \frac{2I}{r}.$$

Eger, biziń kelisip alǵanıımızday k' koefficientin birge teń dep alsaq, onda

$$H = \frac{2I}{r} \quad (2)$$

qatnasına iye bolamız.

Toqtıń kúshin *CGSE*-birliklerinde hám r di santimetrlerde ólshesek, onda (2)-teńliktiń tiykarında magnit maydanınıń kernewliginiń *CGSE*-birligin tabamız. Bunday jaǵdayda mınanı alamız: *1 CGSE-birligindegi toq ótip turǵan júdá uzın tuwrı toqtan 2 sm qashılıqtaǵı magnit maydanınıń kernewligi H magnit maydanınıń kernewliginiń 1 CGSE-birligine teń.*

$k' = 1$ bolǵan jaǵdayda 194-paragraftaǵı (1)- hám (4)-formulalar boyınsha radiusı R bolǵan dóńgelek toqtıń orayındaǵı magnit maydanınıń kernewliginiń

$$H = \frac{2\pi I}{R}, \quad (3)$$

shamasına, al uzın hám jińishke solenoidtiń ortańǵı bólimindegi magnit maydanınıń kernewliginiń

$$H = 4\pi n I \quad (4)$$

shamasına teń ekenligin kóremiz. Bul ańlatpalardaǵı n - solenoidtiń uzınlıq birligindegi oramlardıń sanı. (3)-formuladan mınanı alamız: *radiusı $R = 1$ sm bolǵan dóńgelek toq arqalı toqtıń bir CGSE-birligi muǵdarındaǵı toq ótkende ótkizgishtiń orayında kernewliginiń shaması kernewdiń 2π CGSE-birligine teń magnit maydanı payda boladı.*

(4)-formuladan jáne mınaǵan iye bolamız: uzın hám jińishke solenoid arqalı kúshiniń shaması 1 *CGSE*-birlikke teń toq ótkende, onda onıń ortańǵı bóliminde shaması $4\pi n$ *CGSE*-birlikke teń bolǵan magnit maydanınıń kernewligi payda boladı. *CGSE*-sistemadaǵı magnit maydanınıń kernewliginiń ólshemin (2)-, (3)- yamasa (4)-formulalardıń qálegenı boyınsha tabıwǵa boladı:

$$[H] = L^{1/2} M^{1/2} T^{-2}.$$

Magnit maydanınıń kernewliginiń kórsetilgen *CGSE*-birligi salıstırmalı sıyrek paydalanıladı. Fizikada magnit maydanınıń kernewligin ádette elektromagnitlik sistema dep atalatuǵın sistemada ólsheydi (tómende keltirilgen).

191-paragrafta ayılǵanlar boyınsha magnit maydanınıń kernewligin toǵı bar ramkaǵa tásir etetuǵın kúshlerdiń momenti M boyınsha ólshewge boladı. 191-paragraftaǵı (4a) formula boyınsha:

$$H = k \frac{M}{IS}. \quad (5)$$

Bul teńlikte I - ramkadaǵı toqtıń kúshi hám S - ramkanıń betiniń maydanı. k koefficientine belgili bolǵan mánisti berip, M , I hám S shamaların ólshewdiń belgili bolǵan birliklerin paydalanıp, bul formulanı magnit maydanınıń kernewligi H tıń birligin tabıw ushın paydalanıwǵa boladı. Mısalı,

$k = 1$ dep esaplap, qalğan barlıq shamalardı *CGSE*-sistemada ólsheuge, yaǵnıy M di $\text{din}\cdot\text{sm}$ de, S ti sm^2 hám I di toqtır kúshiniń *CGSE*-birliginde ólsheuge boladı.

Magnit maydanınıń kernewligi H tı *CGSE*-birliklerde ólshegende (5)-formuladaǵı k koefficientine belgili ólshemdi hám belgili bolğan san mánisin beriw kerek boladı. Haqıyqatında da, (5)-formula boyınsha ramkaǵa tásir etetuǵın kúshlerdiń momenti M mınaǵan teń:

$$M = \frac{l}{k} HIS. \quad (6)$$

CGSE-sistemadaǵı bul formulada oǵan kiretuǵın barlıq tórt fizikalıq shamalar bolğan M, H, I hám S shamaları ushın ólsheu birlikleri saylap alınǵan; sonlıqtan, k koefficientine iqtıyarlı mánisti beriwge bolmaydı. Demek, k koefficienti belgili bir ólshemge hám belgili bolğan san mánisine teń konstanta bolıp tabıladı. Usı jaǵdaydıń haqıyqatında da orın alatuǵınlıǵın kórsetiw ushın misal retinde solenoidtıń magnit maydanı bir tekli hám kernewligi $H = 4\pi nI'$ shamasına teń bolğan ishki bóliminiń ortasına ramka kirgizilgen dep boljaymız (ramka arqalı ótetuǵın I toǵınan ayırıp kórsetiw ushın solenoidtaǵı toqtır kúshin I' arqalı belgileybiz). Eger bul jaǵdayda ramkaǵa túsirilgen normal solenoidtıń kósherine perpendikulyar bolsa, onda ramkaǵa (6)-formula boyınsha anıqlanatuǵın kúshlerdiń momenti M tásir etedi. Bul formulaǵa H tırn ornına onıń mánisi bolğan $4\pi nI'$ shamasın qoyıp

$$M = \frac{1}{k} 4\pi nI'IS \quad (7)$$

formulasına iye bolamız. Bunnan k koefficientiniń ólshemi ushın mınaday teńlikti alamız:

$$[k] = \frac{[n] \cdot [I^2] \cdot [S]}{[M]}. \quad (8)$$

M hám S shamalarınıń ólshemleri ushın mınaday anlatpalardı alamız: $[M] = ML^2T^{-2}$ hám $[S] = L^2$. *CGSE*-sistemasındaǵı toqtır ólshemi $[I] = M^{1/2}L^{3/2}T^{-2}$. n shaması solenoidtıń uzınlıǵınıń bir birligindegi oramlar sanı bolıp tabıladı. Sonlıqtan $[n] = L^{-1}$. Usı ólshemlerdiń barlıǵın paydalanıp, (8)-teńlikten mınanı alamız:

$$[k] = L^2T^{-2}.$$

Sońǵı anlatpadan k koefficientiniń ólsheminiń tezliktiń kvadratınıń ólshemindey ekenligin kóremiz: $[v^2] = L^2T^{-2}$. Qozǵalıwshı zaryadlardıń magnit maydanın qaraǵanda ayqın bolatuǵın oylar boyınsha (215-paragraf) k nıń ornına $\sqrt{k}$ shamasına teń bolğan basqa c konstantasın kirgiziw hám onı *elektrodinamikalıq turaqlı* dep ataw qabıl etilgen. Elektrodinamikalıq turaqlınıń ólshemi tezliktiń ólshemine sáykes keledi.

Solenoidtıń ishinde jaylastırılǵan ramkaǵa tásir etetuǵın kúshlerdiń momenti M di (7)-formula boyınsha *CGSE*-birliklerinde ólshep, elektrodinamikalıq turaqlı bolğan c shamasınıń mánisin tabıwǵa boladı. Bunday ólsheuler

$$c = \sqrt{k} = 2,998 \cdot 10^{10} \text{ sm/sec}$$

shamasın beredi. Bunday boljawda (7)-formula mınaday túrge enedi:

$$M = \frac{1}{c^2} 4\pi nI'IS. \quad (7a)$$

Biz keyinirek *CGSE*-birliklerinde ańǵartılǵan elektrodinamikalıq turaqlı c nıń san mánisi boyınsha boslıqtaǵı elektromagnit tolqınlarınıń (dara jaǵdayda jaqtılıq tezliginiń) *sm/sec* birliklerindeki tarqalıw tezligine teń ekenligin kóremiz.

Biraq, elektromagnit shamalarınıń birlikleriniń basqa sistemasın dúziwge de boladı. Onıń ushın, misalı, solenoidtıń maydanı tárepinen ramkaǵa tásir etetuǵın kúshlerdiń jubı ushın (7)-formulanı alıp hám ondaǵı k koefficientin birge teń dep alıwǵa boladı. *CGS*-sistemadaǵı kúshlerdiń momenti menen maydanniń birlikleri kirgizilgen bolǵanlıqtan, $k = 1$ teńligin qabıl etiw toqtır kúshi ushın jańa birlikti kirgiziw ushın ǵana kerek boladı. Toqtır kúshiniń bul jańa birligi *elektromagnitlik birlik* dep ataladı. Ol birliklerdiń elektromagnitlik birlikler sisteması - *CGSM*-sistemanıń tiykarına jatqarıladı.

Toqtırn kúshiniń jańa birligi menen $CGSE$ -birligi arasındaǵı qatnastı qaraymız. (7)-formuladan óz-ózin kórinip turǵan teńlikti alamız:

$$\frac{1}{k} 4\pi n I_{CGSE} I'_{CGSE} = 4\pi n I_{CGSM} I'_{CGSM}.$$

Bul teńliktegi $CGSE$ hám $CGSM$ indeksler toqlardıń kúshleriniń qaysı sistemada ólshengenligin kórsetedi. $k = c^2$ teńligin esapqa alıp,

$$\frac{I_{CGSE}}{I_{CGSM}} = c \quad (9)$$

qatnasına iye bolamız, yaǵnıy $CGSM$ -birliklerinde ólshengen toqtırn kúshi $CGSE$ -birliklerinde ólshengen toqtırn kúshinen c ese kishi boladı eken. Demek, toqtırn kúshiniń $CGSM$ -birliginiń ózi toqtırn kúshiniń $CGSE$ -birliginen c ese úlken boladı:

$$\frac{\text{toqtırn kúshiniń } CGSM - \text{birligi}}{\text{toqtırn kúshiniń } CGSE - \text{birligi}} = c = 2,998 \cdot 10^{10} \cong 3 \cdot 10^{10}.$$

Elektrodinamikalıq turaqlı bolǵan c nıń mánisi $c = 2,998 \cdot 10^{10} \text{ sm/sek}$ eksperimentte anıqlanǵan hám, soǵan sáykes, kishi bolsa da, biraq bazı bir qátelikler menen anıqlanǵan (shama menen 0,002%)⁴³. Bunnan toqtırn kúshiniń $CGSE$ - hám $CGSM$ -birlikleriniń arasındaǵı sanlıq qatnastırn absolyut dállikte beriliwiniń múmkin emes ekenligi, al bazı bir juwıqlaw menen beriletuǵınlıǵı kelip shıǵadı. 2,998 sanı 3 ke júdá jaqın bolǵanlıqtan, kópshilik jaǵdaylarda toq kúshiniń 1 $CGSE$ - birligi = toq kúshiniń $3 \cdot 10^{10}$ $CGSE$ -birligi dep esaplawǵa boladı (153-paragrafqa qarańız).

Toqtırn kúshiniń elektromagnitlik birliginiń ólshemin (9)-qatnastan hám elektrodinamikalıq turaqlı c dan alıwǵa boladı:

$$[I_{CGSM}] = \frac{I_{CGSE}}{[c]} = \frac{M^{1/2} L^{3/2} T^{-2}}{L T^{-1}} = M^{1/2} L^{1/2} T^{-1}.$$

Solay etip, $CGSM$ hám $CGSE$ -sistemalarındaǵı toqtırn kúshiniń ólshemleri hár qıylı. Bir fizikalıq shamaniń hár qıylı sistemalarda hár qıylı mánislerge iye bolatuǵınlıǵın eske túsiremiz (I tomdaǵı 30-paragrafqa qarańız).

Toqtırn kúshiniń elektromagnitlik birligin kirgizip, elektr zaryadınıń muǵdarınıń jańa (elektromagnitlik) sistemasın kirgiziwimiz kerek. $Q = It$ teńligi orınlı, al waqıt t nı eki sistemada da sekundlarda ólsheytuǵın bolǵanlıqtan, toqtırn kúshiniń $CGSM$ -birligi toqtırn kúshiniń $CGSE$ -birliginen neshe ese úlken bolsa, elektr zaryadınıń muǵdarınıń $CGSM$ -birligi elektr zaryadınıń muǵdarınıń $CGSE$ -birliginen sonsha ese úlken boladı. Demek:

$$\frac{\text{elektr zaryadınıń muǵdarınıń } CGSM - \text{birligi}}{\text{elektr zaryadınıń muǵdarınıń } CGSE - \text{birligi}} = c \cong 3 \cdot 10^{10}.$$

Elektr zaryadınıń muǵdarınıń $CGSM$ -birliginiń ólshemin $[Q] = [I] \cdot [t]$ qatnasınan tabamız. Bunnan minaday qatnas kelip shıǵadı:

$$[Q_{CGSM}] = M^{1/2} L^{1/2}.$$

Eń arqırında magnit maydanınıń kernewligi H tır $CGSM$ -birligin kirgizemiz. Onıń ushın 193-paragraftaǵı (3)-qatnastan paydalanamız:

$$H = \frac{2I}{r}. \quad (10)$$

Bul qatnastaǵı toqtırn kúshi I di $CGSM$ -birliklerinde, al r qashıqlıǵın burınǵısınsha santimetrlerde ólsheymiz. Usınday jollar menen magnit maydanınıń kernewligi H tır birligin 1820-jılı toqtırn magnitlik tásin baqlaǵan Erstedtiń húrmetine ersted (qısqaşa e) dep ataydı.

(10)-qatnastan, sheksiz uzın tuwrı ótkizgish arqalı shaması 1 $CGSM$ -birligine teń toq ótkende onnan 2 sm qashıqlaqtı kernewligi 1 *erstedke* teń magnit maydanı qozdırıladı. Usınıń menen bir

⁴³ Elektrodinamikalıq turaqlı ushın házirgi waqıtları 299 792 458 m/s shaması qabıl etilgen (Awdarıwshılar).

qatarda biz (4)-formulanıń tiykarında 1 sm de n dana oram bar hám shaması 1 CGSM-birlikke teń toq ótip turǵan uzın, jıńışke solenoidtıń orta bólimindegi magnit maydanınıń kernewliginiń $4\pi n$ erstedke teń ekenligine kóz jetkeremiz. Biz tómende magnit maydanınıń kernewligin erstedlerde jiýi ólsheymiz. Ersted magnit kernewiniń CGSE-birliginen c ese úlken

Bio-Savar-Laplas nızamında

$$\Delta H = \frac{I \Delta l \sin \alpha}{r^2};$$

k' proporcionallıq koefficienti CGSM-sistemada CGSE-sistemadaǵıday birge teń. Sebebi CGSM-sistemada toqtıń kúshi I diń birligi hám magnit maydanınıń kernewligi H tıń birligi CGSE-sistemadaǵıǵa salıstırǵanda birdey shamaǵa artıq (c ese).

CGSM-sistemadaǵı kernewlik H tıń ólshemin (10)-qatnastan tabamız:

$$H = \frac{[I]}{[r]} = M^{1/2} L^{-1/2} T^{-1}.$$

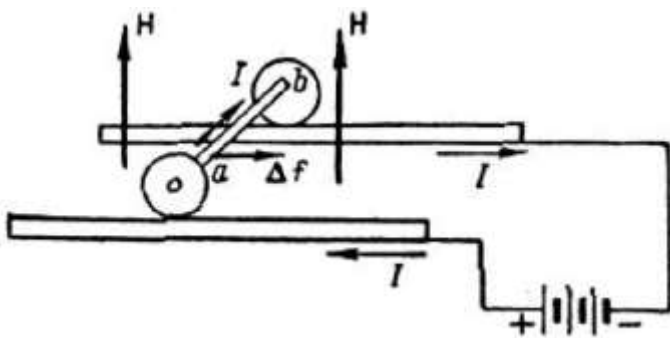
Toqtıń kúshiniń hám magnitlik kernewliktiń birliklerdiń xalıq aralıq sistemasındaǵı birlikleri haqqında 196-paragrafta ayılǵan.

§ 196. Magnit maydanındaǵı toqqa tásir etetuǵın kúsh. Elektrik birliklerdiń xalıq aralıq sisteması. Magnit maydanındaǵı toq ótip turǵan ramkanıń burılıwı boyınsha ótkerilgen tájiriybeler magnit maydanına jaylastırılǵan qálegen ramkaǵa jup kúshtiń tásir etetuǵınlıǵın kórsetedi. Bul juptı magnit maydanında turǵan toqtıń konturınıń hár bir elementine tásir etetuǵın kúsh tárepinen payda etiledi dep boljaw tábiyiy.

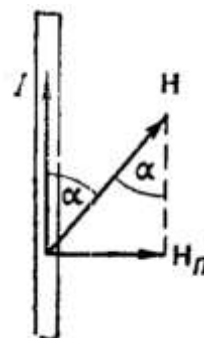
Toq konturınıń ayırım uchastkasına túsken kúshtiń bar ekenligin mınaday dúzilistiń járdeminde baqlaw múmkin: bir birine parallel bolǵan eki metall shına boylap uzınlıǵı Δl shamasına teń tuwrı ab sterjeni menen tutastırılǵan eki rolik domalay aladı (193-súwret). SHinalardıń ushları batareyanıń polyusları menen tutastırılǵan, usınıń saldarınan olar batareya hám ab sterjeni menen toǵı bar tuyıq konturdı payda etedi.

Meyli, ab sterjeni boyınsha baǵıtı 193-súwrette kórsetilgen kúshi I ge teń bolǵan toq ótip turǵan bolsın. SHinalar turǵan tegislikke perpendikulyar baǵıtlanǵan kernewligi H qa teń bolǵan magnit maydanın qozdıramız. Bunday jaǵdayda ab sterjenine kúsh tásir ete baslaydı hám bul kúshtiń tásirinde ol qozǵalısqı keledi. Prujınanıń yamasa qanday da bir mexanikalıq usıldıń járdeminde teńlestirip, bul Δf kúshiniń shamasın ańsat ólshewge boladı. Tájiriybe Δf kúshiniń H hám I ler jatırǵan tegislikke perpendikulyar ekenligin kórsetedi.

Amper Δf kúshiniń shamasınıń toqtıń kúshi I ge, magnit maydanınıń kernewligi H qa hám ótkizgishtiń uchastkasınıń uzınlıǵı Δl ge proporcional ekenligin kórsetti.



193-súwret. Sırtqı H magnit maydanındaǵı toǵı bar ótkizgishe tásir etetuǵın Δf kúshin tabıw.



194-súwret. Magnit maydanınıń toqqa tásiri maydanniń kernewligi H tıń normal qurawshısı boyınsha anıqlanadı.

Sonıń menen birge Δf kúshiniń shaması H vektorınıń baǵıtınan da ǵárezli. Eger H toqtıń kúshi I diń baǵıtına perpendikulyar bolsa, onda birdey bolǵan basqa sharayatlarda Δf kúshi eń úlken

mánisine iye boladı. Eger $\mathbf{H}$ vektorınıń baǵıtı I toǵınıń baǵıtı menen parallel bolsa, onda $\Delta f = 0$. Bul jaǵday bizdi Δf kúshiniń magnit maydanınıń kernewligi $\mathbf{H}$ tıń toqtır kúshi I ge perpendikulyar bolǵan qurawshısı tárepinen payda bolatuǵınlıǵın boljawǵa májbúrleydi. Bunday qurawshınıń mánisi $H \sin \alpha$ shamasına teń (194-súwretke qarańız) bolǵanlıqtan, Amper nızamı ushın eń aqırında

$$\Delta f \sim IH \sin \alpha \cdot \Delta l \quad (1)$$

añlatpasın alamız. Teńlik belgisine ótiw ushın proporcionallıq koefficientin kirgiziw kerek.

Tájiriybelerdiń kórsetiwi hám tómende keltirilgen esaplawlardıń tastıyqlawı boyınsha eger I hám H shamaları elektrostatikalıq birliklerde, al Δf - dinalarda ólshengen bolsa, onda proporcionallıq koefficienttiń mánisi $1/c^2$ shamasına teń boladı.

Sonlıqtan, biz bılayınsha jaza alamız:

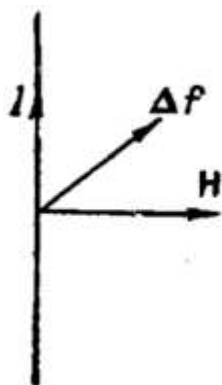
$$\Delta f = \frac{1}{s^2} IH \sin \alpha \cdot \Delta l. \quad (1a)$$

Biz joqarıda Δf kúshiniń I hám H baǵıtları jatqan tegislikke perpendikulyar ekenligin aytqan edik. Eger magnit maydanınıń kernewligi $\mathbf{H}$ vektorınıń baǵıtı I toǵınıń baǵıtına perpendikulyar bolsa, onda Δf kúshiniń baǵıtı 195-súwrette kórsetilgen.

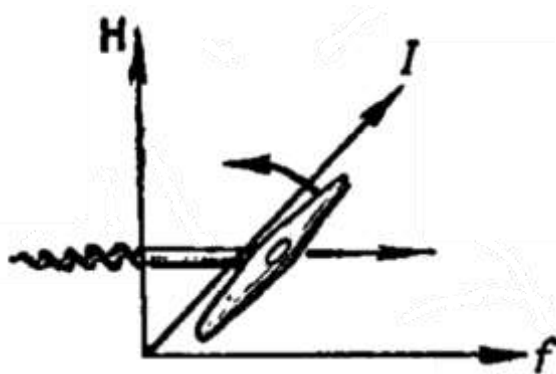
Ulıwma jaǵdayda Δf kúshiniń baǵıtın anıqlaw ushın bir neshe qaǵıyda bar.

Birinshiden, burǵı qaǵıydasın paydalanıwǵa boladı hám bul qaǵıyda bul jaǵdayda bılayınsha paydalanıladı: burǵınıń tutqasın toqtır kúshi I diń baǵıtınan $\mathbf{H}$ vektorınıń baǵıtına qaray buraw kerek (196-súwret); bunday jaǵdayda I hám H lardıń arasındaǵı π den kishi múyeshtiń baǵıtında buraw kerek. Bunday jaǵdayda burǵınıń ilgerilemeli qozǵalı Δf kúshiniń baǵıtın beredi.

Biz beretuǵın ekinshi qaǵıyda shep qol qaǵıydası dep ataladı: eger magnit maydanınıń kernewligi $\mathbf{H}$ tıń Δl ge perpendikulyar bolǵan qurawshısın shep qoldıń alaqańına kiretuǵın etip jaylastırısaq (197-súwret), al sozılǵan tórt barmaq toq kúshi I diń baǵıtında bolsa, onda bas barmaq tıń baǵıtı Δf kúshiniń baǵıtın beredi.



195-súwret. Magnit maydanındaǵı toqqa tásir etetuǵın kúsh Δf tiń baǵıtı.

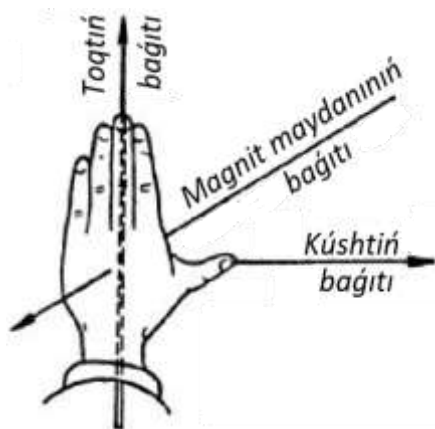


196-súwret. Δf kúshiniń baǵıtın burǵı qaǵıydasınıń járdeminde anıqlaw.

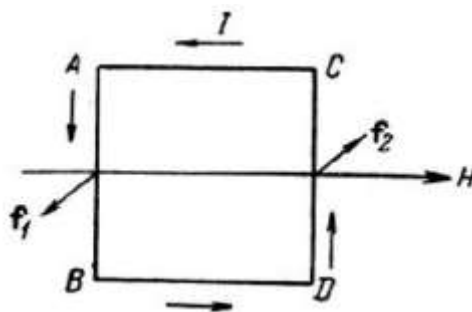
Eger

$$\Delta f = \frac{1}{c^2} I [\Delta \mathbf{l} \times \mathbf{H}] \quad (1b)$$

vektorlıq kóbeymesin paydalansa, onda ótkizgishtiń Δf elementine tásir etetuǵın kústiń shamasın da, baǵıtın da alamız. Bul teńlikte $\Delta \mathbf{l}$ shamasına toqtır baǵıtı beriledi.



197-súwret. SHep qol qaǵıydası.



198-súwret. Magnitlik kernewlik sızıqlarına parallel jaylasqan toǵı bar ramkaǵa tásir etetuǵın kúshler.

Amper formulasınan kelip shıǵıp, barlıǵınan burın, betine túsirilgen normal $\mathbf{H}$ vektorına perpendikulyar bolǵan jaǵdayda tegis tuwrı múyeshli ramkaǵa tásir etetuǵın kúshlerdiń momenti M niń mınaǵan teń ekenligin kóremiz:

$$M = \frac{1}{k} IHS. \quad (2)$$

Meyli, $ABDC$ ramkasına túsirilgen normal (198-súwret) súwret tegisligine perpendikulyar, al magnitlik kernewlik sızıqları sızılmanıń betinde jatatuǵın bolsın. Ápiwayılıq ushın ramkanıń AC hám BD tárepleri magnitlik kernewlik sızıqlarına parallel hám, soǵan sáykes, AC hám BD tárepleri perpendikulyar bolsın. Ramkanıń sheklerinde magnit maydanın bir tekli dep esaplaymız. Ramka arqalı baǵıtı 198-súwrette strelkalar menen kórsetilgen baǵıtta toq ótip turǵan bolsın. SHep qol qaǵıydası boyınsha ramkanıń AB tárepine sızılma tegisligine perpendikulyar hám alǵa qaray baǵıtlanǵan $\mathbf{f}_1$ kúshi tásir etedi. San mánisi boyınsha bul kúsh (1a) formulasına sáykes

$$f_1 = \frac{1}{c^2} I H l_1 \quad (3)$$

shamasına teń. Bul ańlatpada l_1 arqalı ramkanıń AB tárepiniń uzınlıǵı belgilengen.

SHaması usı kúshke teń, biraq sızılma tegisliginiń arǵı tárepine qaray baǵıtlanǵan $\mathbf{f}_2$ kúshi ramkanıń CD tárepine tásir etedi.

Bul kúshler shaması

$$M = f_1 l_2$$

teńligi menen anıqlanatuǵın momenti payda etedi. Bul teńlikte l_2 - ramkanıń BD tárepiniń uzınlıǵı.

Bul teńlikke f_1 kúshiniń ornına onıń (3)-teńliktegi mánisin qoysaq hám $l_1 l_2$ kóbeymesiniń ramkanıń maydanı S ke teń ekenligin ańǵarsaq,

$$M = \frac{1}{c^2} IHS$$

formulasına iye bolamız. $k = c^2$ teńligi orınlanǵan jaǵdayda bul formula (2)-formulaǵa sáykes keledi. Al, 195-paragrafta k hám c coefficientleriniń arasındaǵı usınday baylanıstır bar ekenligi kórsetilgen edi.

Solay etip, ótkerilgen esaplaw magnit maydanındaǵı toq ótip turǵan ramkaǵa tásir etetuǵın kúshlerdiń momenti ushın durıs ańlatpanı berip ǵana qoymay, Amper nızamında I hám H shamaların $CGSE$ -sistemada bergен jaǵdayda $1/c^2$ coefficientiniń turıwınıń kerek ekenligin de kórsetedi.

Amper formulasınan eki sheksiz uzın, parallel hám tuwrı bolǵan ótkizgishler arqalı ótetuǵın toqlardıń óz-ara tásirlesiw kúshlerin de taba alamız. Meyli, ótkizgishlerdiń arasındaǵı qashıqlıq d bolsın hám olar arqalı I_1 hám I_2 toqları ótip turǵan bolsın.

I_1 toǵınıń magnit maydanınıń ekinshi toqtırn uzınıǵı l shamasına teń bolǵan uchastkasına qanday kúsh penen tásir etetuǵınıńın qaraymız.

Onıń ushın I_1 toǵınıń kernewlik vektorınıń sızıqlarınıń koncentrlık dóńgelekler túrine iye bolatuǵınıńın hám eger I_1 toǵı joqarı qaray baǵıtlanǵan bolsa, onda ekinshi ótkizgishtiń noqatlarındagı $\mathbf{H}_1$ kernewliginiń burǵı qaǵıydası boyınsha sızılmanıń arǵı tárepine qaray baǵıtlanǵanlıǵın ańǵaramız (199-súwret). Onıń san mánisi mınaǵan teń:

$$H_1 = \frac{2I_1}{d}. \quad (4)$$

Ekinshi toqtırn l uchastkasına tásir etetuǵın $\mathbf{f}_2$ kúshiniń baǵıtın anıqlaw ushın shep qol qaǵıydasınan paydalanamız. SHep qoldı kernewlik vektorı $\mathbf{H}_1$ alaqańǵa kiretuǵın, al tórt barmaqtı I_2 toǵınıń baǵıtı menen baǵıtlas etip sozamız; bunday jaǵdayda bas barmaqtırn baǵıtı I_2 toǵınıń l uchastkasına tásir etetuǵın $\mathbf{f}_2$ kúshiniń baǵıtın beredi. Eger I_2 toǵı joqarı qaray aǵatuǵın bolsa, onda, kórinip turǵanıday, bul kúsh shep tárepke qaray baǵıtlanǵan, yaǵnıy, I_2 toǵınıń l uchastkası I_1 toǵına qaray tartıladı. $\mathbf{H}_1$ vektorı l ge perpendikulyar bolǵanlıqtan, (1a) boyınsha f_2 tartılıw kúshiniń shaması

$$f_2 = \frac{1}{c^2} I_2 H_1 l$$

yamasa bul ańlatpaǵa H_1 diń (4)-ańlatpa boyınsha mánisin qoysaq,

$$f_2 = \frac{1}{c^2} \frac{2I_1 I_2}{d} l \quad (5)$$

shamasına teń boladı.

Dál usınday tallaw I_2 toǵı tárepinen payda etilgen $\mathbf{H}_2$ maydanınıń uzınıǵı l ge teń bolǵan uchastkanıń sheklerinde oqıwshıǵa qaray baǵıtlanǵanlıǵın, yaǵnıy I_1 toǵınıń l uchastkasınıń I_2 toǵına tartılatuǵınıńın kórsetedi. Tartısıw kúshiniń shaması mınaǵan teń boladı:

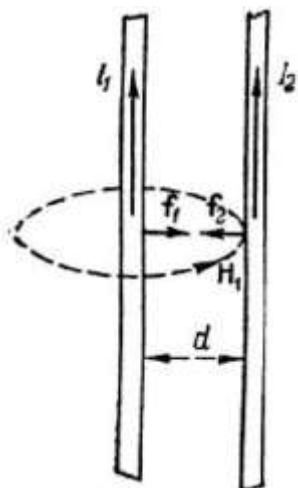
$$f_1 = \frac{1}{c^2} I_1 H_2 l = \frac{1}{c^2} \frac{2I_1 I_2}{d} l.$$

Bul (5)-formula menen ańǵartılatuǵın f_2 kúshine teń.

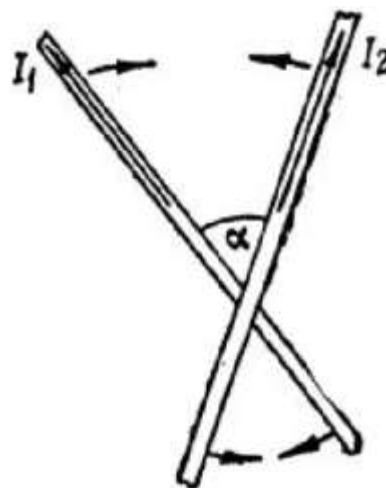
Solay etip, bir birine parallel bolǵan birdey baǵıtta ótetuǵın toqlardıń bir birine tartılatuǵınıńın kóremiz. Hár bir toqtırn uzınıǵı l ge teń bolǵan hár bir uchastkasına (5)-ańlatpa boyınsha toqlardıń kúshiniń kóbeymesine tuwrı proporcional hám olardıń arasındagı qashıqlıqqa kerı proporcional kúsh tásir etedi. Eger (5)-formulada I_1 menen I_2 shamaları CGSE-birliklerde, al l menen d shamaları santimetrlerde ańǵartılǵan bolsa, onda f dinalarda ańǵartıladı.

Tap usınday tallawlar qarama-qarsı baǵıtta ótetuǵın eki parallel toqtırn san mánisi (5)-formula menen anıqlanatuǵın kúsh penen iyterisetuǵınıńın kórsetedi.

Eger toqlar baǵıtları bazı bir α múyeshi menen kesilisetuǵın eki tuwrı ótkizgish arqalı ótetuǵın bolsa, onda usı toqlarǵa olardı bir birine parallel etiwge tırısatuǵın, sonıń menen birge toqlardıń bir baǵıtta ótiwine qaray baǵıtlanǵan kúshler payda boladı (200-súwret).



199-súwret. Eki tuwrı sıızılı sheksiz uzun toqlardıń óz-ara tásirlesiwi.



200-súwret. Bir birine salıstırǵanda α múyeshine burılǵan eki tuwrı sıızılı sheksiz uzun toqlardıń óz-ara tásirlesiwi.

Bul paragrafta keltirilgen barlıq formulalarda elektrlik hám magnitlik shamalar birliklerdiń elektrostatikalıq sistemasında ólshengen dep bolǵandı. Eger magnit maydanınıń kernewligi menen toqtıń kúshin birliklerdiń elektromagnitlik sistemasında ólshese, onda (1a), (1b), (2)-, (3)- hám (5)-formuladardagı $1/c^2$ koefficienti joǵaladı.

Mısalı, Amper nızamı ushın jazılǵan formula mınaday túrge enedi:

$$\Delta f = IH \sin \alpha \cdot \Delta l. \quad (6)$$

Al, parallel toqlardıń arasındagı óz-ara tásirlesiw kúshi

$$f_1 = f_2 = \frac{2I_1 I_2 l}{d} \quad (5a)$$

formulasınıń járdeminde beriledi.

Házirgi waqıtlardagı birliklerdiń xalıq aralıq sistemasında (I tomǵa qarańız) toqtıń kúshiniń tiykarǵı elektrlik birliǵı bolǵan amper (5a) formulaniń tiykarında tabıladı. Bul birlik bılayınsha anıqlanadı: *boslıqta bir birinen 1 m qashıqlıqta jaylasqan bir birine parallel bolǵan eki sheksiz uzun ótkizgishterdiń arasında uzınlıqtıń hár bir metrinde $2 \cdot 10^{-7}$ nyuton kúshti payda etetuǵın toqtıń kúshi amper bolıp tabıladı.* Solay etip, (5a) formulaǵa kiretuǵın barlıq shamalardı birliklerdiń xalıq aralıq sistemasında ólshegende, formula mınaday túrge enedi:

$$f(\text{nyuton}) = \frac{2 \cdot 10^{-7} I_1(a) \cdot I_2(a) \cdot l(m)}{d(m)}.$$

1 nyuton = 10^5 dina bolǵanlıqtan, amper menen toqtıń kúshiniń CGSM-birlikleri arasında mınaday qatnastı alamız:

$$1 a = \text{toq kúshiniń } 0,1 \text{ CGSM} - \text{birliǵı}.$$

Bunnan anıqlama boyınsha amperdiń toqtıń kúshiniń CGSM-birliginiń dál onnan birine teń ekenligi kelip shıǵadı.

Amper menen toqtıń kúshiniń CGSE-birliǵı arasındagı qatnastı 195-paragraftagı (9)-qatnas boyınsha alamız:

$$\text{toq kúshiniń } 1 \text{ CGSM} - \text{birliǵı} = \text{toq kúshiniń } c \cdot \text{CGSE} - \text{birliǵı}.$$

$c = 2,998 \cdot 10^{10} \text{ sm/sek}$ bolǵanlıqtan

$$1 a = \text{toqtıń kúshiniń } 2,998 \cdot 10^9 \text{ CGSM} - \text{birliǵı} \cong \\ \cong \text{toqtıń kúshiniń } 3 \cdot 10^9 \text{ CGSE} - \text{birliǵı}.$$

Birliklerdiń xalıq aralıq sistemasında basqa barlıq elektrlik hám magnitlik birlikler amper arqalı tabıladı. Mısalı, elektr zaryadınıń muǵdarı sıpatında kulon qabil etilgen, ol shaması 1 a bolǵan toq ótip turǵan ótkizgishtiń kese-kesim arqalı 1 sek waqıttıń ishinde aǵıp ótken elektr

zaryadların muğdarına teń (153-paragrafqa qarańız). Álbette, kulon menen elektr zaryadların muğdarların *CGSM*- hám *CGSE*-birlikleri arasında mınaday qatnaslar orın aladı:

$$\begin{aligned} 1 \text{ kulon} &= \text{elektr zaryadınıń muğdarınıń } 2,998 \cdot 10^9 \text{ CGSE} - \text{birligi}, \\ 1 \text{ kulon} &= \text{elektr zaryadınıń muğdarınıń } 2,998 \cdot 10^9 \text{ CGSE} - \text{birligi} \cong \\ &\cong \text{elektr zaryadınıń muğdarınıń } 3 \cdot 10^9 \text{ CGSE} - \text{birligi}. \end{aligned}$$

Birliklerdiń xalıq aralıq sistemasında magnit maydanınıń kernewliginiń birligi sıpatında shaması 1 a bolğan toq ótip turğan sheksiz uzun tuwrı ótkizgishten $\frac{1}{2\pi} m$ qashıqlıqtaǵı magnit maydanınıń kernewligi qabıl etilgen. Bul birlik "bir metrdegi amper" dep ataladı (qısqasha a/m). $1 \text{ a/m} = 4\pi \cdot 10^{-3} e$ teńliginiń orınlı ekenligin ańsat kóriwge boladı.

Eger arnawlı túrde ayılğan bolmasa, onda biz bunnan bılay magnit shamaların *CGSE*-birliklerde ólsheymiz.

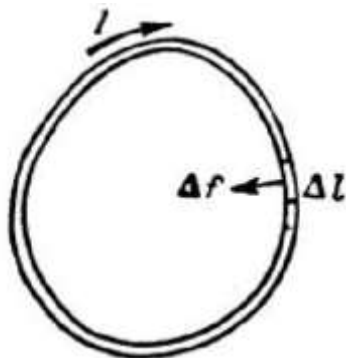
§ 197. Magnit maydanındaǵı toǵı bir tuyıq kontur. 196-paragrafta biz Amper nızamınan kelip shıqqan halda magnit maydanındaǵı tegis tuwrı múyeshli plastinkaǵa tásir etetuǵın kúshlerdiń momenti ushın ańlatpanı keltirip shıǵardıq.

Endi magnit maydanınıń iqtıyarlı formaǵa iye tegis toǵı bar konturlarǵa tásin qaraymız. Usınıń menen birge barlıq elementlerine magnit kúshleri tásir etkende kontur ózgerissiz qaladı, yaǵnıy ol qattı deneniń qásiyetindey qásiyetke iye dep esaplaymız.

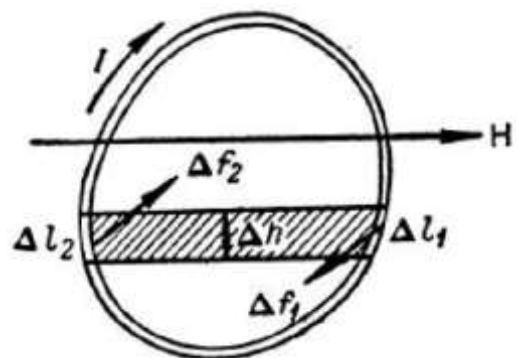
1. Bir tekli magnit maydanındaǵı toǵı bar tuyıq kontur. Iqtıyarlı formaǵa iye bolğan hám I toǵı ótip turğan tegis kontur kernewligi H qa teń bolğan hám konturdiń tegisligine perpendikulyar baǵıtlanğan magnit maydanında jaylastırılğan dep boljayıq (201-súwret). Konturda iqtıyarlı túrde Δl elementin alamız hám oǵan tásir etetuǵın Δf kúshin anıqlaymız. H kernewligi Δl ge perpendikulyar bolǵanlıqtan, 196-paragraftaǵı (6)-formula boyınsha *CGSE*-sistemasında mınaday ańlatpanı jaza alamız:

$$\Delta f = IH\Delta l.$$

Δf kúshiniń baǵıtın shep qol qaǵıydası boyınsha anıqlaymız: eger maydan súwret tegisligine perpendikulyar alǵa qaray baǵıtlanğan hám konturdaǵı toq saat strelkasınıń qozǵalı baǵıtında aǵatuǵın bolsa, onda kúsh konturdiń orayına qaray baǵıtlanğan boladı (201-súwret). Maydanniń bir tekli bolıwına baylanıslı konturdiń barlıq elementlerine tásir etetuǵın kúshlerdiń barlıǵı san mánisi boyınsha birdey hám konturdı bir tekli qısıw jaǵdayında boladı. Eger magnit maydanınıń baǵıtı qarama-qarsı tárepke qaray ózgeritse, onda Δf kúshiniń baǵıtı da keri tárepke qaray ózgeredi hám kontur teń ólshewli sozılıw awhalına keledi. Toqtıń baǵıtı da, magnit maydanınıń baǵıtı da bir waqıtta ózgerse, onda kúshler ózleriniń baǵıtların ózertpeydi.



201-súwret. Magnit maydanınıń kernewligine perpendikulyar qoyılǵan toq ótip turğan konturdiń Δl elementine tásir etetuǵın kúsh.



202-súwret. Magnit maydanınıń kernewligine parallel qoyılǵan toǵı bar konturǵa tásir etetuǵın kúshlerdiń momentin esaplawǵa.

Endi konturdı magnit sıızqları onıń betiniń tegisligine parallel etip jaylastıramız (202-súwret). Kernewliktiń eki parallel sıızqlarınıń arasındaǵı Δl_1 hám Δl_2 elementlerine qanday Δf_1 hám Δf_2

kúshleriniń tásir etetuǵınlıǵın anıqlaymız. Súwrette saylap alınǵan toq penen magnit maydanınıń kernewliginiń baǵıtlarında shep qol qaǵıydası boyınsha Δl_1 elementine kontur tegisligine perpendikulyar hám oqıwshıdan arman qaray baǵıtlanǵan kúsh tásir etedi. Δf_1 kúshiniń shaması mınaǵan teń:

$$\Delta f_1 = I \Delta l_1 \sin \alpha H.$$

$\Delta l_1 \sin \alpha$ shamasınıń Δl_1 hám Δl_2 elementlerin sheklep turǵan tuwrılardıń arasındaǵı Δh qashıqlıǵı ekenligin ańǵarıp Δf_1 ushın jazılǵan ańlatpanı bilayınsha jazamız:

$$\Delta f_1 = IH \Delta h.$$

Sonıń menen birge $\Delta f_2 = IH \Delta h$ teńliginiń orınlı ekenligin de alamız. Bunnan Δf_1 hám Δf_2 kúshleriniń san mánisleri boyınsha bir birine teń ekenligi kelip shıǵadı. Solay etip, Δl_1 hám Δl_2 elementlerine momenti $\Delta M = \Delta f x = IH \Delta h x$ shamasına teń jup kúsh tásir etedi eken. Bul teńlikte x arqalı Δl_1 hám Δl_2 elementleriniń arasındaǵı ortasha qashıqlıq belgilengen. $\Delta h x$ kóbeymesi 202-súwrette shtrixlanǵan oblasttıń maydanı ΔS ke teń. Bunnan ΔM momenti ushın ańlatpanı bilayınsha jazıwǵa boladı:

$$\Delta M = IH \Delta S.$$

Konturdıń barlıǵın Δl_1 hám Δl_2 elementlerine uqsas bolǵan elementlerdiń juplarına bóliwge boladı. Usınıń saldarınan konturdıń barlıǵına momenti elementlerge túsken kúshlerdiń juplarınıń momentleriniń summasına teń bolǵan jup kúsh túsken boladı. Álbette bul moment mınaǵan teń boladı:

$$M = \sum \Delta M = IH \sum \Delta S.$$

Bunnan

$$M = IHS \quad (1)$$

formulasına iye bolamız. Bul teńlikte S - barlıq kontur tárepinen óziniń ishine alınatuǵın maydan.

Kúshlerdiń juplarınıń baǵıtına itibar berip, biz juptıń tásirinde kontur tegisliginiń magnitlik kernewlik sızıqlarına perpendikulyar turıwǵa tırısadı. Bunday jaǵdayda magnit maydanınıń baǵıtında qaraǵanımda konturdaǵı toqtı saat strelkasınıń qozǵalı baǵıtında kóremiz. Bul nátiyjeni basqasha da aytıwǵa boladı: magnit maydanında toq ótip turǵan kontur usı kontardaǵı toq payda etken magnit maydanınıń kernewliginiń baǵıtı sırtqı magnit maydanınıń kernewliginiń baǵıtına parallel bolatuǵınday bolıp jaylasadı.

191-paragrafta biz IS kóbeymesine proporcional bolǵan p_m shamasın ramkanıń magnit momenti dep ataǵan edik. $CGSM$ -sistemada $IS = p_m$ teńligi orınlı boladı⁴⁴. Bunday jaǵdayda (1)-teńlik mınaday túrge enedi:

$$M = H \cdot p_m. \quad (1a)$$

Konturdıń magnit momenti p_m vektorlıq shama bolıp tabıladı. p_m niń baǵıtı sıpatında toǵı bar konturǵa túsirilgen oń normaldıń baǵıtı qabıl etilgen (177-súwretke qarańız).

Endi ulıwma bolǵan jaǵdaydı qaraymız: konturdıń tegisligi menen magnit maydanınıń arasındaǵı múyeshtiń shaması iqtıyarlı. Buringıday, konturdıń qalayınsha turǵanlıǵın usı konturdıń tegisligine túsirilgen N normalı menen anıqlanadı dep esaplaymız. Al normaldıń baǵıtın, buringıday, burǵı qaǵıydasınıń járdeminde anıqlaymız: burǵınıń tutqasın konturdaǵı toqtıń baǵıtında aylandıramız. Bunday jaǵdayda burǵınıń ilgerilemeli qozǵalısinıń baǵıtı normaldıń baǵıtına sáykes keledi. Bul ayılǵanlar boyınsha, konturǵa túsirilgen normaldıń baǵıtı konturdıń magnit momenti vektorı p_m niń baǵıtına sáykes keledi.

Meyli normal menen magnit maydanınıń baǵıtınıń arasındaǵı múyeshtiń shaması α ge teń bolsın. Magnit maydanınıń kernewligi vektorı $\mathbf{H}$ tı bir birine perpendikulyar bolǵan qurawshılardı jikleymiz. Olardıń biri $\mathbf{H}_\perp$ kontur tegisligine perpendikulyar, al ekinshisi $\mathbf{H}_\parallel$ kontur tegisliginde

⁴⁴ $CGSE$ -sistemada $p_m = \frac{1}{c^2} IS$ dep jazıw qabıl etilgen. Bunday jaǵdayda (1a) formulası eki sistemada da óziniń túrin ózgerissiz saqlaydı ($CGSM$ hám $CGSE$ sistemalarında).

jatadı. Bunday jaǵdayda

$$H_{\perp} = H \cos \alpha, \quad H_{\parallel} = H \sin \alpha$$

teńliklerine iye bolamız. Joqarıda ayılǵanlar boyınsha, kernewliktiń konturdıń betine parallel bolǵan qurawshısı ǵana momentti payda etedi; normal qurawshısı bolsa konturdıń qısılıwına yamasa sozılıwına ǵana alıp keledi. Demek, eger (1)-formulaǵa magnit maydanınıń kernewligi $\mathbf{H}$ tıń ornını onıń $\mathbf{H}_{\parallel}$ qurawshısını qoyǵan jaǵdayda ǵana M momentin aladı ekenbiz, bunnan mınaday teńlikke iye bolamız:

$$M = IHS \sin \alpha. \quad (2)$$

(2)-formuladan aylandırıwshı M momentiniń eń úlken mánisi $\alpha = \frac{\pi}{2}$ teńligi orınlanatuǵın, yaǵnıy konturdıń tegisligi kernewlik sızıqlarına parallel bolǵan jaǵdayda orınlanatuǵınlıǵın kóremiz; $\alpha = 0$ bolǵan jaǵdayda, yaǵnıy konturdıń tegisligi kernewlikke perpendikulyar bolǵanda momenttiń mánisi nolge teń boladı.

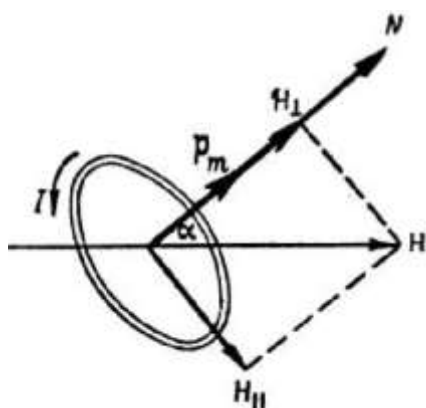
IS kóbeymesiniń ornına p_m magnit momentin kirgizip, (2)-formulanı bilayınsha jazamız:

$$M = Hp_m \sin \alpha. \quad (2a)$$

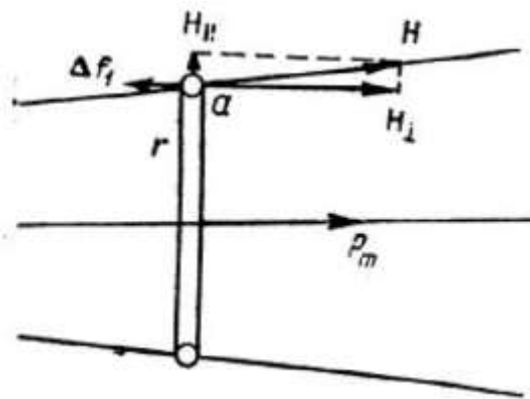
Eger solenoid túrindegi konturlardıń jıynaǵın alsaq, oǵan tásir etetuǵın juptıń momenti ushın tap usınday ańlatpanı alamız. Biraq, bul jaǵdayda solenoidtiń magnit momentin $p_m = NIS$ shamasına teń dep boljawımız kerek. Bul teńlikte N arqalı solenoidtaǵı oramlardıń sanı belgilengen.

Kúshlerdiń jubınıń momenti $\mathbf{M}$ vektorı haqqındaǵı túsinikti paydalanıp (I tomdaǵı 35-paragraf), (2a) teńligin vektorlıq formada jazıwǵa boladı:

$$\mathbf{M} = [\mathbf{p}_m \cdot \mathbf{H}].$$



203-súwret. Maydanniń kernewligi $\mathbf{H}$ tı eki $\mathbf{H}_{\perp}$ hám $\mathbf{H}_{\parallel}$ qurawshılarına jiklew.



204-súwret. Bir tekli bolmaǵan magnit maydanındaǵı toǵı bar kontur.

2. Bir tekli emes magnit maydanındaǵı toǵı bar tuyıq kontur. Ápiwayılıq ushın kernewlik sızıqları radiallıq túrde tarqalatuǵın bir tekli emes magnit maydanındaǵı dóńgelek ramka túrindegi konturdı qaraymız. 204-súwrette bul ramkanıń súwret tegisligi menen kesimi kórsetilgen. Meyli, ramkanıń magnit momentini p_m baǵıtı boyınsha ramkanıń orayındaǵı maydanniń kernewligi $\mathbf{H}$ tıń baǵıtı menen sáykes keletuǵın bolsın. Shepten ońǵa qaraǵan baǵıttı oń baǵıt dep esaplawdı kelisip alayıq. Magnit maydanı tárepinen ramkanıń Δl elementine tásir etetuǵın Δf kúshin qaraymız. Ramkanıń Δl elementin a noqatınıń qasında etip alayıq ol sızilmanıń tegisligine perpendikulyar. Magnit maydanınıń kernewligi $\mathbf{H}$ tı eki qurawshıǵa jikleymiz: ramka tegisligine perpendikulyar bolǵan $H_{\perp}$ hám ramka tegisligine parallel bolǵan $H_{\parallel}$ qurawshısına. $H_{\perp}$ qurawshısı ramkanıń orayınan sırtqa qaray baǵıtlanǵan Δf_2 kúshin payda etedi Ramkanıń barlıq elementlerine túsken bunday kúshlerdiń jıynaǵı ramkanı tek deformaciyalaydı hám hesh qanday aylanbalı yamasa ilgerilemeli qozǵalısqı alıp kelmeydi. Sonlıqtan, bunnan bilay bunday kúshler bizdi qızıqtırmaydı.

Shep qol qağıydası boyınsha maydannıń $H_{||}$ qurawshısı ramkanıń tegisligine perpendikulyar bolǵan Δf_1 kúshiniń payda bolıwına alıp keledi. Bul kúshtiń mánisi mınaǵan teń:

$$\Delta f_1 = -IH_{||}\Delta l. \quad (3)$$

Bul ańlatpada I arqalı ramka arqalı ótip atırǵan toqtıń kúshi belgilengen. Minus belgisi bul kúshtiń shep tárepke qaray baǵıtlanganlıǵın bildiredi. β arqalı α noqatınıń qasında magnit maydanınıń kernewligi H penen ramka tegisligine túsirilgen normaldıń arasındaqı múyeshti belgileymiz. Bunday jaǵdayda $H_{||} = H \sin \beta$. β múyeshin kishi dep esaplap, juwıq túrde $H_{||} = H\beta$ dep boljaymız. $H_{||}$ ushın jazılǵan bul ańlatpanı (3)-ańlatpaǵa qoyıp, mınanı alamız:

$$\Delta f_1 = -IH\beta \cdot \Delta l.$$

Tap usınday Δf_1 kúshleri ramkanıń qalǵan elementlerine de túsedi. Olardıń barlıǵı birdey bolıp baǵıtlanganlıqtan, barlıq ramkaǵa tásir etetuǵın qosındı f kúshi Δf_1 shamalarınń algebralıq summası sıpatında tabıladı:

$$f = \sum \Delta f_1 = -IH\beta \cdot \sum \Delta l. \quad (4)$$

Álbette, ramkanıń barlıq elementleriniń uzınlıqlarınıń qosındısı barlıq ramkanıń konturınıń uzınlıǵına teń, yaǵnıy

$$\sum \Delta l = 2\pi r.$$

Bul ańlatpada r - ramkanıń radiusı.

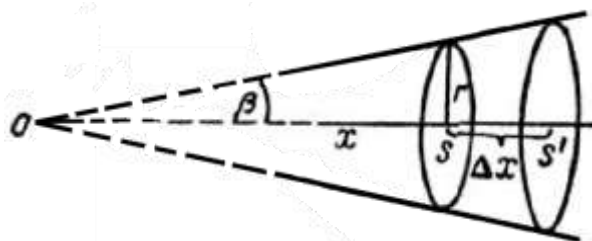
$\sum \Delta l$ shamasınıń bul mánisin (4)-ańlatpaǵa qoyıp ramkaǵa tásir etetuǵın f kúshi ushın mınaday ańlatpa alınadı:

$$f = -2\pi rHI\beta. \quad (5)$$

Solay etip, bir tekli bolmaǵan magnit maydanında ramkaǵa onı jılıstırıwǵa tırısatuǵın kúsh tásir etedi eken.

205-súwret.

Bir tekli emes magnit maydanındaǵı toǵı bar konturǵa tásir etetuǵın kúshti esaplawǵa.



β múyeshin joq qılıp, (5)-ańlatpanı túrlendiremiz. Onıń ushın ramkanıń tegisligin kesip ótetuǵın kernewlik sızıqlarınıń sanın qaraymız (205-súwret). Ramka turǵan orındaǵı magnit maydanınıń kernewligi bolǵan H shaması N menen

$$H = \frac{N}{S} \quad (6)$$

juwıq qatnasınıń járdeminde baylanısqa. Bul qatnastaǵı $S = \pi r^2$ shaması ramkanıń maydanı bolıp tabıladı hám aǵıs ushın jazılǵan ańlatpadaǵı $\cos \beta$ nıń mánisin juwıq túrde birge teń dep alınǵan. Bul kernewlik sızıqlarınıń barlıǵı ramkadan oń tárepinde Δx qashıqlıǵında jaylasqa S' maydanın kesip ótedi. Ramkadan onıń oń tárepinde Δx qashıqlıqta jaylasqa noqattaǵı maydannıń kernewligi H' mınaǵan teń:

$$H' = \frac{N}{S'}.$$

Al, Δx kesindisindegi magnit maydanınıń kernewliginiń ózgerisi ΔH ushın mınaday ańlatpanı jazamız:

$$\Delta H = H' - H = \frac{N}{S'} - \frac{N}{S}.$$

Eger Δx kishi bolsa, onda S' shaması S shamasınan úlken ayırmaǵa iye boladı hám, bunday jaǵdayda, juwıq túrde

$$\Delta H = \frac{N(S - S')}{S^2} \quad (7)$$

ańlatpasına iye bolamız.

Oyımızda kernewlik sızıǵın shep tárepke qarap olar kesiliske O noqatına shekem dawam etemiz. Meyli O noqatı ramkadan x qashıqlıǵında turǵan bolsın. Bunday jaǵdayda β múyeshin kishi dep esaplap, $r = x\beta$ teńligine iye bolamız. Bunnan

$$S = \pi x^2 \beta^2, S' = \pi(x + \Delta x)^2 \beta^2 \cong S \left(1 + 2 \frac{\Delta x}{x}\right)$$

teńliklerine iye bolamız. S penen S' shamalarınıń bul mánislerin (7)-teńlemege qoyıp,

$$\Delta H = -2 \frac{N}{S} \cdot \frac{\Delta x}{x}$$

teńligin alamız yamasa (6)-teńlik boyınsha $\frac{N}{S} = H$ hám $x = \frac{r}{\beta}$ teńlikleriniń orınlı ekenligin esapqa alıp,

$$\Delta H = -2H \frac{\Delta x}{r} \beta$$

ańlatpasın, al bul ańlatpadan

$$\beta = -\frac{1}{2} \frac{r}{H} \left(\frac{\Delta H}{\Delta x}\right)$$

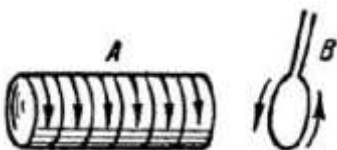
formulasına iye bolamız. β nıń bul mánisin (5)-teńlikke qoyıp, ramkaǵa tásir etetuǵın f kúshi ushın

$$f = \pi r^2 I \left(\frac{\Delta H}{\Delta x}\right)$$

formulasın alamız. $\pi r^2 I = SI$ kóbeymesi ramkanıń magnit momenti p_m bolıp tabıladı. Bunnan mınaday formula kelip shıǵadı:

$$f = p_m \left(\frac{\Delta H}{\Delta x}\right). \quad (8)$$

$\Delta H / \Delta x$ shaması magnit maydanınıń bir tekli emes ekenligin táriyipleydi - bul shama noqattan noqatqa ótkende maydanniń kernewligi H tıń qanday dárejede tez ózgeretuǵınlıǵın kórsetedi: bul shama magnit maydanınıń kernewliginiń gradienti bolıp tabıladı. Solay etip, (8)-ańlatpa boyınsha ramkaǵa tásir etetuǵın f kúshiniń ramkanıń magnit momenti p_m ge hám magnit maydanınıń gradienti bolǵan $(\Delta H / \Delta x)$ shamasına proporcional ekenligin kóremiz. Bir tekli maydan ushın $\left(\frac{\Delta H}{\Delta x}\right) = 0$ hám ramkaǵa hesh qanday qosındı kúsh tásir etpeydi.



206-súwret.

Toǵı bar ramkanıń solenoid penen tásirlesiwı.

Biz qaraǵan jaǵdayda (p_m magnit momenti maydanniń baǵıtı menen baǵıtlas) f kúshi ramkanı maydan kúshlirek bolǵan tárepke qaray jılistıradı. Eger magnit momenti p_m magnit maydanınıń kernewligi H qa qarama-qarsı baǵıtlanǵan bolsa, onda ramka maydan ázzi tárepke karay jılısqan bolar edi. Biraq, ramkanıń bunday jaylasıwı ornıqlı emes.

Bir tekli emes magnit maydanındaǵı iqtıyarlı túrde baǵıtlanǵan toǵı bar ramkaǵa f kúshi de, momenti M ge teń bolǵan aylandırıwshı jup ta tásir etedi; sonlıqtan bir tekli emes magnit maydanında erkin aylana hám jılıy alatuǵın ramka onıń magnit momenti p_m kernewlik sızıqlarına parallel jaylasadı hám bunnan keyin maydan kúshli bolǵan oblastqa qaray tartıladı. Bul jaǵdaydı ańsat demonstraciyalawǵa boladı. Uzun hám qozǵalmaytuǵın etip bekitilgen A solenoidiniń ushınıń qasına eki uzun hám jıńışke sımardıń járdeminde B ramkasın jaylastıramız (206-súwret). Dáslep ramkanıń qalayınsha baǵıtlanǵanlıǵınan ǵárezsiz, ol ózi arqalı ótip turǵan toqtıń baǵıtı solenoidtaǵı ótip turǵan toqtıń baǵıtına parallel bolatuǵınday bolıp burıladı hám bunnan keyin

solenoidqa tartıladı.

Bizler keltirip shıǵarǵan (8)-formulanı ramkanıń momentı p_m menen $\mathbf{H}$ maydannıń kernewliginiń gradienti arasındadıǵı múyeshtiń shaması α ge teń bolǵan jaǵday ushın ańsat ulıwmalastıramız. Bunday jaǵdayda mınaday formulanı alamız:

$$f = p_m \left(\frac{\Delta H}{\Delta x} \right) \cos \alpha. \quad (8a)$$

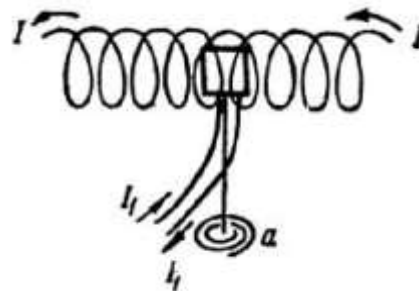
Solay etip, sırtqı elektr maydanında elektr dipoli ózin qalayınsha uslaytuǵın bolsa, magnit maydanındaǵı ramka da ózin tap sonday etip uslaytuǵınlıǵın kóremiz: bir tekli maydanda oǵan tek aylandırıwshı moment tásir etedi, al bir tekli emes maydanda bolsa oǵan maydannıń gradientine proporcional bolǵan kúsh te tásir etedi.

Mısal. 1 sm de 10 oram bar 10 a toq ótip turǵan solenoidtıń ishinde $S = 10 \text{ sm}^2$ maydandı óziniń ishine qamtıytuǵın hám 5 oramǵa iye ramka ornalastırılǵan. a prujinasınıń járdeminde (207-súwret) ramka ózi arqalı toq ótpegen jaǵdayda solenoidtıń kósherine parallel etip uslap turıladı. Eger prujinanı φ múyeshine burıw ushın momentı $M = k\varphi$ shamasına teń bolatuǵın kúshlerdiń jubı kerek bolatuǵın bolsa (bul teńlikte $k = 1 \text{ G sm/rad}$), onda 1 a toq ótip turǵan ramka solenoidtıń kósherine salıstırǵanda qanday φ múyeshine burıladı?

Sheshimi. 195-paragraftaǵı (4)-formula boyınsha solenoidtıń ishindegi magnit maydanınıń kernewligi H mınaday ańlatpanıń járdeminde anıqlanadı:

$$H = 4\pi In. \quad (9)$$

Bul ańlatpada n - solenoidtıń uzınlıǵınıń bir birligindegi oramlar sanı hám I - ondaǵı toqtıń kúshi.



207-súwret.

Solenoidtıń ishindegi toq ótip turǵan ramka.

Ramkanı konturlardıń qabatlasıwı sıpatında qarap, (2)-formula boyınsha oǵan tásir etetuǵın kúshlerdiń momentin tabamız:

$$M = n_1 I_1 S_1 H \sin \alpha.$$

Bul teńlikte n_1 - ramkadaǵı oramlardıń sanı, I_1 - ramkadaǵı toqtıń kúshi, S_1 - onıń betiniń maydanı. Bul ańlatpaǵa H tıń ornına (9)-ańlatpa boyınsha mánisin qoyıp

$$M = 4\pi n n_1 I I_1 S_1 \sin \alpha$$

teńligin alamız. Bul moment prujinanıń burıwshı momentı $k\varphi$ menen teńlestiriliwi kerek. Bunnan

$$4\pi n n_1 I I_1 S_1 \sin \alpha = k\varphi$$

teńligi kelip shıǵadı. $\alpha = \frac{\pi}{2} - \varphi$ ekenligin ańǵarıp hám $4\pi n n_1 I I_1 S$ shamasın b arqalı belgilep,

$$b \cos \varphi = k\varphi$$

teńligin hám bunnan

$$\frac{\cos \varphi}{\varphi} = \frac{k}{b}$$

qatnasına iye bolamız. Juwıq túrdegi $\cos \cong 1 - \frac{\varphi^2}{2}$ teńligi orınlı dep esaplap, φ ǵa qarata kvadrat teńleme alamız:

$$\varphi^2 + 2 \frac{k}{b} \varphi - 2 = 0.$$

Bul teńlemeden φ ushın

$$\varphi = -\frac{k}{b} \pm \sqrt{\frac{k^2}{b^2} + 2}$$

ańlatpasın alamız. I menen I_1 shamaların CGSM-birliklerinde hám k nı din·sm/rad birliginde berip, mınaday shamalı alamız:

$$\frac{k}{b} = \frac{k}{4\pi n n_1 I l_1 S_1} = \frac{980}{4 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 5 \cdot 1 \cdot 0,1 \cdot 10} \cong 1,56.$$

Bunnan φ ushın

$$\varphi = -1,56 \pm 2,11$$

shamasına iye bolamız. Eki sheshimnen $0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$ shártinen kelip shıǵatuǵın mánisti alıwımız kerek. Bunnan $\varphi = 0,55$ rad yamasa $\varphi \cong 31^\circ$ ekenligine kóz jetkeremiz.

§ 198. Magnitlik kernewliktiń cirkulyaciyası. Magnit maydanı magnit maydanların esaplawda úlken ámeliy áhmiyetke iye bolǵan bazı bir ulıwmalıq qatnastırń járdeminde táriyiplewge boladı.

129-paragrafta elektr kernewligi vektorınıń cirkulyaciyası ushın ańlatpanı qaraǵanımda hám elektr qozǵawshı kúshi haqqındaǵı mäseleni tallaǵanda táreplik kúshlerdiń cirkulyaciyası túsinigin kirgizgenimizdi esletip ótemiz.

Tap sol jaǵdaylarǵa sáykes, biz magnit kernewligi vektorı **H** tır cirkulyaciyası ushın ańlatpanı kirgizemiz.

İqtıyarlı túrdegi tuyıq L konturın alamız. H_l arqalı **H** vektorınıń konturdiń elementi Δl diń baǵıtına túsilgen proekciyasın belgileymiz. Tuyıq konturdiń barlıq elementleri ushın $H_l \Delta l$ ańlatpalarınıń summası bolǵan

$$\sum H_l \Delta l$$

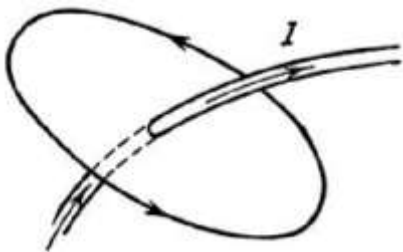
shamasın esaplaymız hám bul summanı **H** vektorınıń L konturı boyınsha cirkulyaciyasınıń summası dep ataymız.

Bio-Savar-Laplas nızamına sáykes, **H** vektorınıń iqtıyardı tuyıq kontur boyınsha cirkulyaciyasınıń usı cirkulyaciya alınıp atırǵan kontur arqalı ótip atırǵan toqtırń 4π ge kóbeymesine teń ekenligin kórsetiwge boladı:

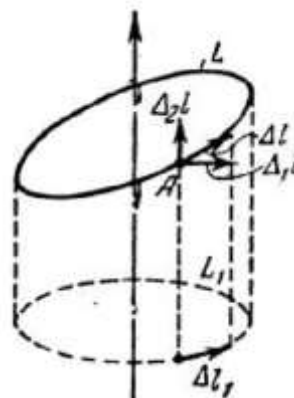
$$\sum H_l \Delta l = 4\pi I. \quad (1)$$

Cirkulyaciyanıń belgisi konturdı qaysı baǵıtta aylanıp shıǵıwǵa baylanıslı: eger aylanıp shıǵıwdıń baǵıtı konturdaǵı toqtırń baǵıtı menen burǵı qaǵıydası boyınsha baylanısqan bolsa, onda cirkulyaciyanı plus belgisi menen alamız, al, cirkulyaciyanı esaplaǵanda konturdı aylanıp shıǵıwdıń baǵıtı ondaǵı toqtırń baǵıtına qarama-qarsı bolsa, onda cirkulyaciya minus belgisi menen alınıadı. 208-súwrette oń cirkulyaciyanı beretuǵın aylanıp shıǵıwdıń baǵıtı kórsetilgen.

Bizler tek sheksiz uzın hám tuwrı ótkizgish arqalı ótetuǵın toq ushın (1)-qatnastırń durıs ekenliginiń dálilin keltiremiz.



208-súwret. Oń cirkulyaciyaǵa toqtırń ótiw baǵıtı.



209-súwret. Magnit kernewligi vektorı **H** tır cirkulyaciyasın esaplawǵa.

I toǵı ótip turǵan tuwrı ótkizgishti óziniń ishine alatuǵın iqtıyarlı túrdegi L konturın alamız (209-súwret). Dáslep L konturı boyınsha cirkulyaciyanıń usı konturdiń toqqa perpendikulyar bolǵan tegislikke túsilgen proekciyası bolǵan L_1 konturı boyınsha cirkulyaciyasına teń ekenligin

kórsetemiz. Haqıyqatında da, $\Delta \mathbf{l}$ elementin toqqa perpendikulyar bolǵan tegislikte jatatuǵın $\Delta_1 \mathbf{l}$ elementi menen toqqa parallel bolǵan tegislikte jatqan $\Delta_2 \mathbf{l}$ elementiniń geometriyalıq qosındısınan turadı:

$$\Delta \mathbf{l} = \Delta_1 \mathbf{l} + \Delta_2 \mathbf{l}.$$

Tuwrı toqtıń konturdıń hár bir noqatındaǵı magnit maydanınıń kernewligi

$$H = \frac{2I}{r}$$

shamasına teń hám toqqa perpendikulyar bolǵan tegislikte jatadı (sonıń menen birge dáslep r ge perpendikulyar bolǵan, r arqalı A noqatına shekemgi qashıqlıq belgilengen). Teń tásir etiwshilerdiń proekciyası haqqındaǵı teorema boyınsha:

$$H_l \Delta l = H \Delta_1 l \cos(H, \Delta_1 l) + H \Delta_2 l \cos(H, \Delta_2 l).$$

Summanıń ekinshi qosındısı nolge teń, sebebi $\mathbf{H}$ vektorı $\Delta_2 \mathbf{l}$ vektorına perpendikulyar. Solay etip, mınanı alamız:

$$H_l \Delta l = H \Delta_1 l \cos(H, \Delta_1 l) = H_{l1} \Delta l_1.$$

Biraq, $\Delta \mathbf{l}_1$ shaması L konturınıń $\Delta \mathbf{l}$ elementiniń toqqa perpendikulyar bolǵan tegislikke túsirilgen proekciyası, yaǵnıy, $\Delta \mathbf{l}_1$ shaması L konturınıń toqqa perpendikulyar bolǵan proekciyası bolǵan L_1 konturınıń elementi bolıp tabıladı. Bunnan mınanı alamız:

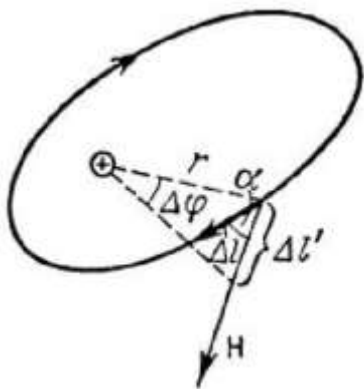
$$\sum_{(L \text{ konturı boyınsha})} H_l \Delta l = \sum_{(L_1 \text{ konturı boyınsha})} H_{l1} \Delta l_1.$$

Demek, ulıwmalıqtı sheklewsiz (1)-qatnastı dálillegende konturdı toqqa perpendikulyar bolǵan tegislikte jaylasqan dep esaplawǵa boladı.

210-súwrette toqqa perpendikulyar bolǵan tegisliktegi kontur keltirilgen. Súwrette kórinip turǵanıday,

$$H_l \Delta l = H \Delta l \cos(H, \Delta l) = \frac{2I}{r} \Delta l \cos \alpha$$

teńligi orınlı boladı.



210-súwret.

Toqtı óziniń ishine alatuǵın tuyıq kontur boyınsha $\mathbf{H}$ vektorınıń cirkulyaciyasın esaplawǵa.

No $\Delta l \cos \alpha$ shaması Δl diń r perpendikulyarına túsirilgen proekciyası bolıp tabıladı, bul ańlatpada r - biz qarap atırǵan noqattan toqqa shekemgi qashıqlıq. Δl diń kishi ekenligine baylanıslı

$$\Delta l \cos \alpha = r \Delta \varphi$$

teńligi orınlanadı dep boljawǵa boladı. Cirkulyaciya ushın mınanı alamız:

$$\sum H_l \Delta l = 2I \sum \Delta \varphi = 4\pi I.$$

Solay etip mınaday nátiyjeni alamız: ıqtıyarlı kontur boyınsha magnitlik kernewliktiń vektorı kontur tárepinen óziniń ishine alınǵan toqtıń kúshin 4π ge kóbeytkenge teń. Eger toq kontur tárepinen qamtıp alınbaǵan bolsa (211-súwret), onda konturdı cirkulyaciya elementleri san mánisi boyınsha teń, belgileri boyınsha qarama-qarsı bolǵan Δl_1 hám Δl_2 jup elementlerine

bóliwge boladı:

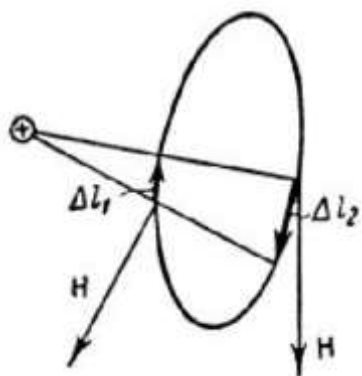
$$H_l \Delta l_1 = -\frac{2I}{r} r \Delta \varphi = -2I \Delta \varphi.$$

$$H_l \Delta l_2 = \frac{2I}{r} r \Delta \varphi = 2I \Delta \varphi.$$

Solay etip, cirkulyaciyanıń ańlatpasındaǵı berliq aǵzalar jup-juptan kompensaciyalanadı hám biz mınaday nátiyjeni alamız: toqtı óziniń ishine almaytuǵın kontur boyınsha **H** vektoriniń cirkulyaciyası nolge teń:

$$\sum H_l \Delta l = 0.$$

Alınǵan nátiyjelerdi iqtıyarlı toqtıń maydanı ushın ulıwmalastırıwǵa boladı. Biraq usınday ulıwmalastırıw quramalıraq bolǵan matematikalıq esaplawlardı talap etedi.



211-súwret.

Toqtı óziniń ishine qamtıp almaytuǵın tuyıq kontur boyınsha **H** vektoriniń cirkulyaciyasını esaplawǵa.

Vektorlıq analizdiń terminlerin paydalanatuǵın bolsaq, onda magnit maydanınıń kernewliginiń cirkulyaciyası mınaday formanı qabıl etedi:

$$\oint H_l dl = 4\pi I.$$

Bul integral I toǵın óziniń ishine qamtıp alatuǵın kontur boyınsha alınadı.

§ 199. Magnitlik kernewliktiń cirkulyaciyası ushın ańlatpanı qullanıw. Aldırıǵı paragrafta alınǵan nátiyjeler olardıń tiykarında alınatuǵın nátiyjeler boyınsha úlken qızıǵıwdı payda etedi. Mısalı, sol nátiyjeler kóp jaǵdaylarda magnit maydanınıń kernewligin ańsat tabıwǵa múmkinshilik beredi. Bazı bir mısallardı qarawǵa ótemiz.

1. Toroidtiń kósherindegi magnit maydanınıń kernewligi. Birdey bolıp baǵıtlanǵan, ulıwmalıq toroidallıq betke bekitilgen birdey dóńgelek toqlardıń sistemasın qaraymız (182-súwret). Oramlardǵı toqtıń kúshin I arqalı, toroidtiń kósheriniń uzınlıǵın l arqalı, oramlardıń ulıwmalıq sanın N arqalı belgileyemiz. l uzınlıǵı toqlardıń sheńberleriniń radiuslarına salıstırǵanda úlken dep boljaymız. Simmetriya kóz-qarasınan toroidtiń kósherindegi magnit maydanınıń kernewligi H tıń turaqlı hám baǵıtınıń usı baǵıtta qaraǵanda toqtıń saat strelkasınıń qozǵalı baǵıtında qozǵalıwına sáykes keledi. H kernewliginiń san mánisin esaplaw ushın toroidtiń orta sızıǵı bolıp tabılatuǵın kontur boyınsha **H** vektoriniń cirkulyaciyasını dúzemiz:

$$\sum H_l \Delta l = \sum H \Delta l = Hl = 4\pi I \quad (H_l = H). \quad (1)$$

Bul ańlatpada I kontur tárepinen óz ishine alınatuǵın tolıq toqtı túsiniw kerek. Álbette, bul toq toroidtiń barlıq oramları arqalı toqlardıń qosındısına teń:

$$I = N\mathcal{J}.$$

Bul ańlatpanı (1)-teńlikke qoyıp,

$$Hl = 4\pi N\mathcal{J}$$

teńligine iye bolamız. Bunnan, l ge qısqartıp, **H** tıń mánisin tabamız:

$$H = 4\pi \frac{N}{l} \mathcal{J} = 4\pi n \mathcal{J}. \quad (2)$$

Bul teńlikte n shaması toroidtıń uzınlıgınıń bir birligindegi oramlardıń sanın ańǵartadı.

Solay etip, toroidtıń kósherindegi magnit maydanınıń kernewligi H toroidtıń uzınlıgınıń bir birligindegi oramlardıń sanına hám oramdaǵı toqtıń kúshi J ge proporcional eken. Eger toroidtıń kósheriniń radiusı sheksiz úlken bolsa, onda onı sheksiz uzın solenoidqa ekvivalent dep esaplawǵa boladı. Demek, (2)-formula sheksiz uzın bolǵan solenoidtıń kósherindegi magnit maydanınıń kernewligin de ańǵartadı eken (194-paragraf).

2. Sheksiz uzın, tuwrı sıızılıq cilindrlik ótkizgish arqalı ótetuǵın toqtıń magnit maydanı. Radiusı R bolǵan cilindr tárizli ótkizgish boyınsha ótkizgishtiń kese-kesimi boyınsha teń ólshewli tarqalǵan kúshi I shamasına teń toq ótip turǵan bolsın. Kósherden r qashıqlıǵında jaylasqan noqattaǵı toqtıń payda etken magnit maydanınıń kernewligi H tı anıqlaymız. Kernewliktiń anıqlanıwı kerek bolǵan A noqatı ótkizgishten sırtta jaylasqan dep boljaymız, yaǵnıy $r > R$. Simmetriya kóz-qarası kósherden birdey r qashıqlıǵında jaylasqan noqatlardıń barlıǵında kernewlik H tıń birdey boladı dep juwmaq shıǵarıwǵa múmkinshilik beredi. Cilindrlik toqtı elementar tuwrı toqlardıń qosıwdıń nátiyjesi dep qarawǵa bolatuǵın bolǵanlıqtan, kernewlik vektorı $\mathbf{H}$ ótkizgishtiń kósherine perpendikulyar tegislikte jatadı hám r ge perpendikulyar baǵıtlanǵan.

Orayı cilindrdiń kósherinde jaylasqan sheńber boyınsha kernewligi izlenip atırǵan noqattaǵı $\mathbf{H}$ vektorınıń cirkulyaciyasın dúzemiz (212-súwretke qarańız). $\mathbf{H}$ kernewligi r ge perpendikulyar bolǵanlıqtan sheńberdiń elementlerine parallel boladı, sonlıqtan cirkulyaciya ushın jazılǵan ańlatpa mınaday túrge iye boladı:

$$\sum H_l \Delta l = H \cdot 2\pi r = 4\pi I \quad (H_l = H). \quad (3)$$

Bul jerde, tap joqarıdaǵı sıyaqlı, I cirkulyaciya alınıp atırǵan kontur tárepinen óz ishine alınatuǵın tolıq toqtı ańǵartadı. Toqtıń sırtında jatqan noqat ushın (3)-formuladaǵı I barlıq cilindrlik ótkizgishtegi toqtıń kúshi bolıp tabıladı. Bul jaǵdaydı esapqa alǵan halda mınaǵan iye bolamız:

$$H \cdot 2\pi r = 4\pi I.$$

Bunnan H ushın

$$H = \frac{2I}{r}$$

ańlatpasın tabamız.

Solay etip, cilindrlik toq tárepinen sırtqı noqatlarda payda etilgen kernewlik biz qarap atırǵan cilindrdiń kósheri boyınsha ótetuǵın tap sonday kúshke iye tuwrı toqtıń magnit maydanınıń kernewligindey boladı eken.

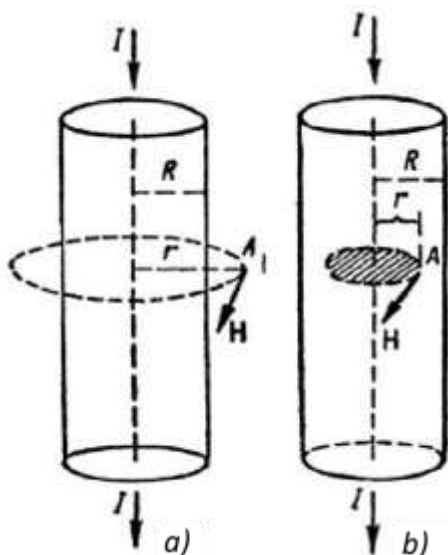
Cilindrdiń ishinde jaylasqan noqat ushın cirkulyaciya alınatuǵın kontur toqtıń bir bólimin ǵana óziniń ishine aladı. Joqarıdaǵıday, r arqalı biz qarap atırǵan noqattan orayǵa shekemgi qashıqlıqtı belgilesek, biz bul jaǵdaydaǵı kontur tárepinen qamtıp alınǵan toqtıń

$$I' = \frac{I}{\pi R^2} \pi r^2$$

shamasına teń bolatuǵınlıǵın kóremiz. Bul ańlatpanı (3)-formulaǵa qoyıp,

$$H = \frac{2Ir}{R^2}$$

formulasına iye bolamız. Bunnan magnit maydanınıń kernewliginiń toqtıń kósherinen qashıqlasqan sayın úlkeyetuǵınlıǵın, al cilindrdiń kósherinde magnit maydanınıń nolge teń ekenligin kóremiz.



212-súwret.
Cilindrlik ótkizgish arqalı ótetuǵın magnet
maydanınıń kernewligin anıqlawǵa.

213-súwrette magnet maydanınıń kernewliginiń cilindrdiń kósherine shekemgi qashıqlıqtan ǵárezligi kórsetilgen.

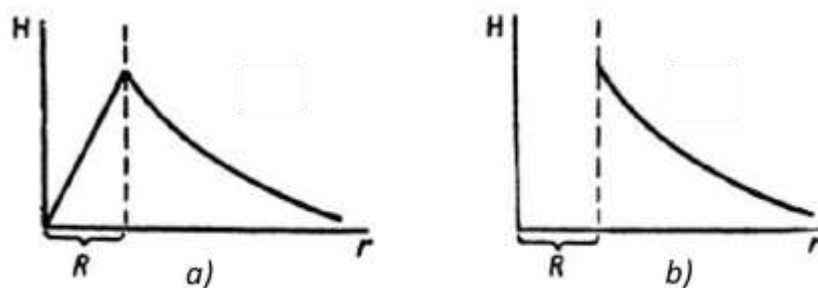
Eger toq tek ótkizgishtiń betindegi juqa qatlam arqalı ótetuǵın bolsa, onda usı ótkizgishtiń sırtındaǵı magnet maydanı toq kese-kesimi arqalı teń ólshewli ótetuǵın ótkizgishtiń payda etetuǵın magnet maydanında bolatuǵınlıǵın ańsat kórsetiwge boladı. Biraq, bunday jaǵdayda ótkizgishtiń ishindegi magnet maydanı nolge teń. Haqıyqatında da, ótkizetuǵın cilindrdiń ishindegi quwıslıqtaǵı $\mathbf{H}$ vektorınıń cirkulyaciyası, bunnan aldınıǵı qaraǵanıımızday, mınaǵan teń:

$$\sum H_l \Delta l = H \cdot 2\pi r = 4\pi I.$$

Biraq, bul jaǵdayda cirkulyaciya konturı toqtı óziniń ishine almaydı, sonlıqtan teńliktiń oń tárepi nolge teń. Bunnan, tikkeley ishki noqatlar ushın

$$H = 0$$

teńligin alamız.



213-súwret. Magnet maydanınıń kernewligi H tır cilindrdiń kósherine shekemgi qashıqlıqtan ǵárezligi. a - ótkizgishtiń kesimi boyınsha teń ólshewli ótetuǵın toq ushın, b - ótkizgishtiń beti arqalı ótetuǵın toq ushın.

Toq cilindr tárizli ótkizgishtiń beti boyınsha ótetuǵın jaǵdaydaǵı H tır r den ǵárezligi 213-b súwrette keltirilgen.

§ 200. Magnetikler. Usı waqıtqa shekem biz boslıqtaǵı, yaǵnıy atomlardıń, elektronlardıń hám zattıń basqa bóleksheleriniń sezilerliktey sanı bolmaǵan keńisliktegi magnet maydanın qaradıq. Endi zatlardıń magnet maydanına tásirin qaraymız hám magnet maydanına tásir ete alatuǵın qábiletlikke iye zattı *magnetik* dep ataymız.

Eń dáslep biz dielektriklerdiń elektrostatalıq maydanǵa tásirin qaraǵanıımızdı eske túsiremiz. Elektrostatalıq maydanniń tásirinde dielektrik biz polyarizaciya dep ataǵan ayırıqsha halǵa keledi. Polyarizaciyanıń saldarınan dielektriktiń shegaralarında hám ol bir tekli bolmaǵan

orınlarda sáykes σ' betlik hám ρ' kólemlik tıǵızlıqlarına iye bolǵan elektr zaryadları payda boladı ("baylanısqa" zaryadlar). Bul zaryadlar óziniń elektrostatikalıq maydanın payda etedi, al bul maydan bolsa dáslepki elektrostatikalıq maydan menen qosıladı ("erkin" zaryadlar payda etken maydan menen).

Eger dáslepki elektrostatikalıq maydanniń kernewligi $\mathbf{E}_0$ shamasına teń bolsa, dielektriktiń polarizaciyasınıń saldarınan payda bolǵan elektrostatikalıq maydanniń kernewligi $\mathbf{E}'$ shamasına teń boladı. Sonlıqtan, maydanniń qosındı kernewligi $\mathbf{E}$ olardıń vektorlıq summasına teń:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}'.$$

Tap sol sıyaqlı, ótkizgishler boyınsha ótetuǵın toqlardıń magnit maydanında turǵan qálegen magnetik ayrıqsha halǵa ótedi, onı *magnitlenedi* dep aytadı. Magnitlengen halda magnetik magnit maydanınıń qosımsha kernewligi $\mathbf{H}'$ tı beredi, al ol ótkizgishler arqalı ótetuǵın toqlar payda etetuǵın kernewligi $\mathbf{H}_0$ bolǵan magnit maydanı menen qosıladı. Bul kernewliklerdiń vektorlıq summası bolǵan $\mathbf{H}_0 + \mathbf{H}'$ shamasın dielektriklerdegi elektr maydanın belgilew ushın kirgizilgen atamaǵa sáykes magnetiktegi magnit maydanınıń kernewligi atamasın kirgiziw kerek boladı. Biraq, tariyxıy xarakterdegi sebeplerge baylanıslı

$$\mathbf{B} = \mathbf{H}_0 + \mathbf{H}' \quad (1)$$

vektori *magnit indukciyası vektori* atamasına iye boldı. Solay etip, *magnit indukciyası vektori* $\mathbf{B}$ *makroskopiyalıq (ortalıqqa salıstırǵanda sırtqı) hám mikroskopiyalıq (ortalıqtıń molekulları payda etken) toqlardıń payda etken kernewlik bolıp tabıladı.*

Tájiriybeler maydan nolge teń emes keńislikti pútkilley toltırıp turatuǵın bir tekli magnetiklerde qosımsha magnit maydanınıń kernewligi $\mathbf{H}'$ tıń baǵıtınıń $\mathbf{H}_0$ diń baǵıtı menen baǵıtlas bolıwınıń da, oǵan qarama-qarsı bolıwınıń da múmkin ekenligin kórsetedi. $\mathbf{H}'$ vektorınıń baǵıtı $\mathbf{H}_0$ vektorınıń baǵıtı menen birdey bolatuǵın magnetiklerdi *paramagnetikler*, al qosımsha magnit maydanınıń kernewligi $\mathbf{H}'$ tıń baǵıtı $\mathbf{H}_0$ vektorınıń baǵıtına qarama-qarsı bolǵan magnetiklerdi *diamagnetikler* dep ataydı. Maydan nolge teń bolmaǵan barlıq keńislikti toltırıp turatuǵın bir tekli dielektriklerdegi qosımsha $\mathbf{E}'$ maydanınıń baǵıtınıń erkin zaryadlar payda etken elektr maydanınıń baǵıtına barlıq waqıtta qarama-qarsı bolatuǵınlıǵın eske túsiremez. Barlıq diamagnetik denelerde hám paramagnetiklerdiń kópshiliginde maydanniń kernewligi bolǵan $\mathbf{H}'$ shaması $\mathbf{H}_0$ ge salıstırǵanda júdá kishi. Biraq $\mathbf{H}'$ tıń shaması $\mathbf{H}_0$ diń shamasınan úlken bolatuǵın zatlardıń toparı da bar. Sonıń menen birge, bunday deneler jáne bir qatar ózgeshelikleri menen de ayrıladı; olar *ferromagnetik* denelerdiń ayrıqsha toparın payda etedi (olardıń qatarına temir kiredi). Olardıń qásiyetlerin biz tómende kóremiz, al házirshe ádettegi paramagnetik hám diamagnetik denelerdi qaraw menen sheklenemiz.

Eń birinshi ret Amper tárepinen ayılǵan gipoteza boyınsha paramagnet zatlardıń molekullarında dóńgelek toqlar boladı; bunday toqlardı *molekulalıq toqlar* dep ataw qabil etilgen. Sırtqı magnit maydanı bolmaǵan jaǵdayda bul toqlardıń kósherleri tártipsiz jaylasqa hám olar tárepinen payda etilgen magnit maydanı ortasha nolge teń. Sırtqı magnit maydanınıń tásirinde bul dóńgelek toqlar belgili baǵıtlarǵa iye boladı, nátiyjede olar tárepinen payda etilgen magnit maydanı ortasha nolge teń bolmaǵan $\mathbf{H}'$ kernewligin beredi hám bul kernewlik magnit maydanınıń eń dáslepki kernewligi $\mathbf{H}_0$ ge qosıladı. Solay etip, paramagnetlik zattaǵı qosındı magnit maydanınıń kernewliginiń úlkeyiwı túsindiriledi. Paramagnetikti magnitlew onıń molekulalıq toqlarınıń belgili bolǵan orientaciyasınıń payda bolıwına alıp keledi.

Házirgi waqıtları, magnetiklerdiń magnitlik qásiyetleriniń tek molekulalıq toqlar menen ǵana emes, al atomlardıń quramına kiretuǵın elementar bólekshelerdiń (elektronlar hám yadrolar) magnitlik qásiyetleri menen baylanıslı dep tastıyıqlawǵa boladı. Tómende elementar bólekshelerdiń olardıń qozǵalıslarınan ǵárezsiz bolǵan magnit momentine iye bolatuǵınlıǵı túsindiriledi. Bul magnit momentin magnit maydanınıń bólekshelerge tási boyınsha tabıwǵa boladı (199-paragrafqa qarańız), biraq, elementar bólekshelerdiń magnit momentleriniń bolıwın qanday da bir qozǵalıslardıń járdeminde modeller kórinisinde túsindiriwdiń múmkinshiligi joq.

Elementar bólekshelerdiń basqa da bir qatar qásiyetlerin klassikalıq mexanikanıń kóz-qaraslarında turıp túsindiriwge bolmaytuǵınlıǵın názerde tutıw kerek (III tomǵa qarańız).

Magnetiklerdiń tiykarǵı qásiyetlerin molekulalıq toqlar haqqındaǵı amperlik kóz-qarastan sapalı túrde túsindiriwge boladı.

Diamagnit zatlardıń molekularında turaqlı dóńgelek toqlar bolmaydı (yamasa hár bir molekulada magnit momentleri bir birin kompensaciyalaytuǵın bir neshe dóńgelek toqlar boladı). Olardaǵı dóńgelek toqlar sırtqı magnit maydanı tárepinen qozdırıladı (indukciyalanadı). XVIII bapta biz bunday indukciyalanǵan toqlardıń baǵıtın sol toqlardı qozdırǵan sırtqı magnit maydanınıń baǵıtına qarama-qarsı bolatuǵınlıǵın kóremiz. Diamagnitlik ortalıқтаǵı magnit maydanınıń qosındı kernewliginiń kishireyiwi usı jaǵday menen baylanıslı.

Barlıq waqıtta dóńgelek toqlar bar bolǵan molekulalarda da keri baǵıttaǵı indukciyalıq toqlar payda boladı. Biraq, eger bul burınnan bolǵan toqlar jetkilikli dárejede kúshli bolsa, onda indukciyalıq toq olardı tek hálisiretedi. Solay etip, diamagnitlik effekt barlıq waqıtta bar boladı, biraq, paramagnetiklerdegi dáslepki toqlardıń baǵıtı menen baylanıslı bolǵan effekt basım keledi. Elektronlıq kóz-qarastan, molekulalardaǵı keri baǵıttaǵı indukciyalanǵan toqlardıń payda bolıwı sırtqı magnit maydanında larmor precessiyası dep atalatuǵın precessiyanıń júzege keliwi menen túsindiriledi (214-paragrafqa qarańız).

Elektrostatikada (143-paragraf) dielektriktegi maydanniń kernewligi $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}'$ ni makroskopiyalıq zaryadlanǵan denegge tásir etetuǵın kúsh boyınsha anıqlawda payda bolatuǵın qıyınshılıq haqqında gáp etip edik. Biz zaryad turǵan orındaǵı maydanniń kernewligi tárepinen payda etiletuǵın kúshler menen bir qatarda (bul kernewlik $\mathbf{E}$ ge sáykes kelmeydi), dielektrikke batırılǵan (kirgizilgen) zaryadlanǵan denegge polarizaciyalanǵan dielektrik tárepinen payda etilgen kúshlerdiń de tásir etetuǵınlıǵın kórdik.

Tap usınday qıyınshılıqlar magnetiktegi magnit indukciyası vektorı bolǵan $\mathbf{B} = \mathbf{H}_0 + \mathbf{H}'$ vektorın anıqlawda da orın aladı.

Magnit maydanınıń tásirinde magnetikte mexanikalıq ózgerisler de júzege keledi (magnitostrikiya, 203-paragraf). Usınıń saldarınan magnetikke jaylastırılǵan toǵı bar sımǵa qosımsha mexanikalıq kúshler tásir etedi. Biraq, toq ótip turǵan simlar sheksiz úlken bir tekli magnetikte jaylastırılǵan bolsa, onda sol simlardıń arasındaǵı óz-ara tásir etisiw kúshleri qosındı magnit maydanınıń kernewligi $\mathbf{H}_0 + \mathbf{H}'$ boyınsha anıqlanadı.

Amper formulası boyınsha, uzınlıǵı Δl shamasına teń bolǵan toq elementine kernewligi H bolǵan sırtqı magnit maydanı tárepinen

$$\Delta f = I \cdot H \sin \alpha \cdot \Delta l \quad (2)$$

shamasına teń Δf kúshi tásir etedi. Bul teńlikte I - toqtıń kúshi hám α - magnit maydanınıń kernewliginiń baǵıtı menen sımdaǵı oń zaryadlardıń qozǵalıw baǵıtı arasındaǵı múyesh.

Joqarıda ayılǵanlar boyınsha, bir tekli sheksiz magnetik bolǵan jaǵdayda biz (2)-formulada magnit maydanınıń kernewligi H tı magnit indukciyası B menen almasıwıp, Δf kúshi ushın minaday ańlatpanı alamız:

$$\Delta f = IB \sin \alpha \cdot \Delta l. \quad (2a)$$

Solay etip, sheklenbegen magnetik bolǵan jaǵdayda biz *magnit maydanınıń toqqa tásiiri magnit indukciyası $\mathbf{B}$ boyınsha anıqlanadı dep esaplaymız.*

Joqarıda ayılǵanlar boyınsha, magnit indukciyası $\mathbf{B}$ kernewliklerdiń summası $\mathbf{H}_0 + \mathbf{H}'$ bolǵanlıqtan, onı $\mathbf{H}_0$ shaması ólshengen birliklerde, yaǵnıy CGSM-sistemada erstedlerde ólshew kerek. Biraq, birliklerdiń CGSM-sistemasında magnit indukciyasınıń birliǵi ushın ayrıqsha atama - gauss qabıl etilgen. Is júzinde gauss erstedke sáykes keledi.

195-paragrafta (2)-formulanıń CGSM-sistemasında durıs ekenligi ayılǵan edi (yaǵnıy toqtıń kúshi CGSM-biriklerinde, H - erstedlerde, Δl - santimetrlerde hám Δf - dinalarda ólshengen jaǵdayda). (2a) formula CGSM-sistemada da, yaǵnıy I di toqtıń kúshiniń CGSM-biriklerinde hám B - gausslarda ólshengen jaǵdayda da durıs.

Principinde (2a) formula maydanniń hár bir noqatındaǵı magnit indukciyası vektorı **B** niń mánisin sımniń elementine tásir etetuǵın Δf kúshi boyınsha anıqlawǵa boladı. Álbette, bunday sımniń sheklerinde maydanniń bir tekli bolıwı ushın, onıń jetkilikli dárejede jıńışke bolıwı kerek hám onıń magnit maydanına alıp keliniwi maydandı payda etetuǵın toqlardıń shamasın da, konfiguraciyların da ózgertpeui kerek, sonıń menen birge magnetiktiń qosımsha magnitleniwine alıp kelmewi kerek. Bul talaplardıń barlıǵı, ásirese qattı magnetik bolǵan jaǵdayda ámeliy jaqtan orınlanbaydı. Misalı, qattı magnetiktegi toǵı bar ramkaǵa magnit kúshleriniń tásirin anıqlaw ushın magnetiktiń ishinde quwıslıqtı payda etiw kerek boladı.

Elektrostatikadagıday, ramkaǵa tásir bul quwıslıqtıń formasınan ǵárezli boladı. **B** vektorın anıqlawdıń múmkinshiligi haqqında biz 207-paragrafta ǵáp etemiz.

§ 201. Molekulalardıń, atomlardıń hám elektronlardıń magnit momentleri. Amperdiń molekulalıq toqlardıń bar ekenligi haqqındaǵı gipotezası atomlar menen molekulalardıń qurılısı haqqındaǵı házirgi kóz-qaraslarına sáykes keledi. Biz usı waqıtqa shekem atomnıń quramalı elektrlik sisteması ekenligin hám elektronlardıń oǵan quramalıq bólim sıpatında kiretuǵınlıǵın bir neshe ret atap óttik. Rezerford tárepinen usınılǵan model boyınsha atom awır hám oń zaryadlangan yadrodan hám onıń dógereginde belgili bolǵan orbitalar boyınsha qozǵalatuǵın elektronlardan turadı. Tuyıq orbita boyınsha qozǵalatuǵın elektron tuyıq kontur boyınsha ótetuǵın toqqa usaydı. Ol magnit maydanın payda etedi hám sırtqı magnit maydanı oǵan baǵıtlawshı tásir jasaydı.

Ápiwayılıq ushın atomnıń izinde radiusı r ge teń bolǵan dóńgelek orbita boyınsha qozǵalatuǵın elektrondı qaraymız. Onıń qozǵalıwı muǵdarınıń mexanikalıq momenti P mınaǵan teń:

$$P = mvr. \quad (1)$$

Bul teńlikte m - elektronnıń massası hám v - onıń tezligi. Dóńgelek orbita boyınsha qozǵalatuǵın elektron toqqa uqsas bolǵanlıqtan, ol p_m magnit momentine de iye boladı. Elektronnıń magnit momentin anıqlaymız. Eger bizler oyımızda orbitanıń kesimin bólip qaraytuǵın bolsaq, onda elektronnıń hár bir aylanıp shıǵıwında bul kesim arqalı elektronnıń zaryadına teń bolǵan e zaryadı alıp ótiledi. Waqıttıń bir birliginde muǵdarı ne kóbeymesine teń bolǵan zaryad ótedi (bul kóbeymede n - elektronnıń waqıt birligindegi orbita boyınsha aylanıp shıǵıwlarınń sanı).

Toqtıń kúshi I san mánisi boyınsha waqıt birligi ishinde alıp ótilgen zaryadqa teń bolǵanlıqtan, orbita boyınsha aylanatuǵın elektron kúshi

$$I = ne$$

shamasına teń toqqa sáykes keledi. Aylanıwlar sanı $n = \frac{v}{2\pi r}$, bunnan

$$I = \frac{v}{2\pi r} e$$

teńligine iye bolamız.

Joqarıda ayılǵanlarǵa sáykes, I toǵı ótip turǵan konturdıń magnit momenti p_m niń shaması IS ke teń, bul kóbeymede S - konturdıń maydanı.

Bunnan, radiusı r ge teń bolǵan dóńgelek orbita boyınsha qozǵalatuǵın elektronnıń magnit momenti

$$p_m = IS = \frac{v}{2\pi r} e \cdot \pi r^2 = \frac{1}{2} v r e \quad (2)$$

shamasına teń boladı. (1)- hám (2)-ańlatpalardı salıstırıp, mınaday ańlatpanı alamız:

$$p_m = \frac{1}{2} \frac{e}{m} P. \quad (3)$$

Demek, tuyıq orbita boyınsha qozǵalatuǵın elektronnıń magnit hám mexanikalıq momentleri **p_m** hám **P** ler bir biri menen tikkeley baylanısqa eken. (3)-formula birliklerdiń elektromagnetlik sistemasında jazılǵan. Eger bul formulada aralas sistemanı paydalanatuǵın bolsaq, atap aytqanda p_m magnit momentin *CGSM*-birliklerde, al elektronnıń zaryadınıń massaǵa qatnası bolǵan e/m

shamasın *CGSM*-birliklerde ólshesek (ádette usınday etip alınadı), onda on tárepte $\frac{1}{c} = \frac{1}{3 \cdot 10^{10}}$ sek/sm koefficientin kirgiziw kerek boladı. Bunday jaǵdayda

$$p_m = \frac{1}{2c} \cdot \frac{e}{m} \cdot P. \quad (3a)$$

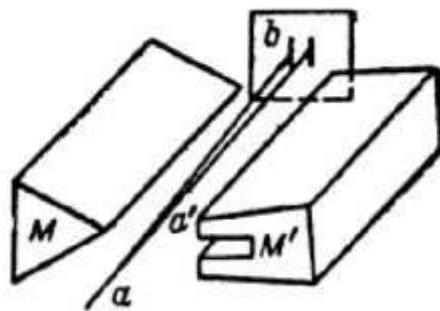
Eger atomda yamasa molekulada hár qıylı orbitada qozǵalatuǵın bir neshe elektron bolatuǵın bolsa, onda ayırım elektronlardıń mexanikalıq momentleri $\mathbf{P}_i$ vektorlıq túrde qosındı $\mathbf{P}$ momentine qosıladı, al ayırım elektronlardıń magnit momentleri $\mathbf{p}_{mi}$ vektorlıq túrde barlıq atomnıń yamasa molekulanıń qosındı magnit momenti bolǵan $\mathbf{P}_m$ shamasına qosıladı.

Paramagnit zatlardıń ishindegi belgili magnitlik hám mexanikalıq momentler menen baylanıslı bolǵan molekulalıq toqlardıń bolatuǵınlıǵı 1915-jılı Eynshteyn hám De-Gaaz tárepinen dálillendi. Paramagnit zattan islengen sterjendi sırtqı magnit maydanında magnitlegende molekulalardıń magnit momentleri maydannıń baǵıtında burıladı. Bul jaǵday olardıń mexanikalıq momentleri $\mathbf{P}$ nıń ózgeretuǵınlıǵına alıp keledi. Biraq, qozǵalıǵ muǵdarınıń tolıq mexanikalıq momenti ózgerissiz qalatuǵın bolǵanlıqtan, sterjen tolıǵı menen keri baǵıttaǵı qozǵalıǵ muǵdarınıń momentin alıwı, yaǵnıy aylanıwǵa keliwi kerek. Bul qubılıs I tomda táriyiplengen taza mexanikalıq qubılısqı uqsas: qozǵalmaytuǵın orınlıqta otırǵan adam qolı menen uslap otırǵan aylanıp turǵan dóńgelektiń kósherin buradı, bunday jaǵdayda adamnıń ózi aylanısqı keledi.

Eynshteynniń hám De-Gaazdıń tájiriybesinde vertikal baǵıttaǵı solenoidtıń kósheri boylap temir sterjen jıńışke sabaqqa ildirilip qoyılǵan (214-súwret). Solenoidtaǵı toqtıń baǵıtı ózgergende sterjen qaytadan magnitlenedi hám usınıń nátiyjesinde aylanıw impulsın aladı. Sterjenniń burılıwı sabaqqa jabıstırılǵan kishkene a aynasında shaǵılısqan jaqtılıq nurlarınıń járdeminde baqlanǵan. Burılıw múyeshin úlkeytiw ushın rezonans principı paydalanıldı: solenoidtaǵı toqtıń baǵıtı sabaqqa ildirilip qoyılǵan sterjenniń terbelis dáwirine teńdey dáwir menen ózgertilgen.



214-súwret. Eynshteyn hám De-Gaaz tájiriybesiniń sxeması.



215-súwret. SHtern hám Gerlax tájiriybesiniń sxeması.

Sterjenniń burılıwınıń baǵıtı elektronnıń zaryadınıń teris mánisine sáykes keledi. (3)-formuladan paydalanıp hám magnitlik hám mexanikalıq momentlerdiń arasındaqı qatnastı ólshep, elektronnıń zaryadınıń onıń massasına qatnasın anıqlawǵa boladı.

Biraq, ólshewlerdiń nátiyjeleri e/m ushın basqa usıllardıń járdeminde alınǵan mánisten ayırmaǵa iye mánis alınadı. Bunday sáykes kelmewdiń sebepleri usı paragraftıń aqırında kórsetiledi.

Házir ǵana táriyiplengen effektke keri bolǵan effekt te bar.

Paramagnetikten islengen sterjendi aylandırǵanda barlıq molekulalıq toqlardıń kósherleri sterjenniń aylanıw kósherine parallel turıwǵa umtılwı kerek. Bul effekt mexanikada baqlanatuǵın giroskoplıq effektke usaydı: eger zırıldawıqtı aylanıp turǵan podstavkanıń ústine jaylastırsa, onda zırıldawıqtıń kósheri podstavkanıń kósherine parallel bolıp turıwǵa tırısadı. Nátiyjede aylanǵanda

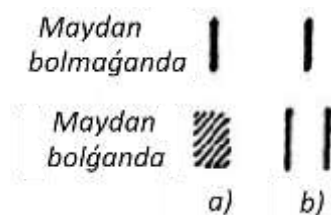
sterjenniñ magnitleniwi kerek. Haqıykatında da, temir sterjendi tez aylandırǵanda onıń magnitlengenligin anıqlawǵa boladı. Solay etip, sapalıq jaqtan bul qubılıs ta tastıyqlanadı; al sanlıq tárepke keletuǵın bolsaq, onda bul tájiriybeler de Eynshteyn hám De-Gaaz tájiriybese sıyaqlı e/m ushın basqa usıllardıń jardeminde alınǵan nátiyjelerden parqı bar nátiyjelerdi beredi.

Paramagnit zattıń ishinde magnitlik hám mexanikalıq momentler menen baylanıslı bolǵan molekualıq toqlardıń bar ekenligi 1917-dılı A.F.Ioffe hám P.L.Kapica tárepinen ótkerilgen tájiriybelerde de dálillendi. Olar turaqlı magnitlerdiń qaldıq magnitlengenliginiń qızdırǵanda joǵalıw faktınan paydalandı (204-paragraf). Magnitlengen nikel sterjen jıńışke sabaqqa ildirilip qoyıldı. Qızdırǵanda molekualardıń magnit momentleriniń barlıq baǵıtlardaǵı tártipsiz tarqalıw orın aladı. Usınıń saldarınan qosındı mexanikalıq moment nolge teń boladı. Bunday jaǵdayda, qozǵalıw muǵdarınıń saqlanıw nızamı boyınsha sterjen qozǵalısqqa keledi.

Atomlar menen molekualardıń magnit momentlerin tikkeley ólshew SHtern hám Gerlax tárepinen ámelge asırıldı⁴⁵. SHtern hám Gerlax tájiriybeseiniń ideyası mınadan ibarat: bir tekli emes magnit maydanında magnit momenti bar bólekshege jılistırıwshı kúsh tásir etedi (197-paragrafqa qarańız). Joqarı vakuumda alınatuǵın atomlıq nur aa' (215-súwret) elektromagnittiń MM' polyuslarınń arasınan ótkerildi Atomlıq nurdıń baǵıtına perpendikulyar baǵıtta keskin túrdegi bir tekli bolmaǵan magnit maydanınıń payda bolıwı ushın elektromagnittiń polyuslarına sáykes forma berildi. Nur b plastinkasına kelip túsip, onda jıńışke jolaq túrindegi iz qaldırǵan. Magnit momenti p_m bolǵan atomǵa tásir etetuǵın kúsh mınaǵan teń (197-paragrafqa qarańız):

$$\Delta f = p_m \left(\frac{\Delta H}{\Delta x} \right) \cos \alpha.$$

Bul teńlikte $(\Delta H/\Delta x)$ — maydanniń gradienti. Solay etip, kústıń shaması Δf atomnıń magnit momenti p_m dan, magnit maydanınıń bir tekli emesliginiń dárejesinen hám p_m menen maydanniń gradientiniń arasındaǵı múyesh α dan ǵárezli eken. Birinshi ret qaraǵanda, jıllılıq qozǵalıslarınıń sebebinen atomlardıń magnit momentleri múmkin bolǵan barlıq baǵıtlarǵa iye bolıwı, sonlıqtan hár qıylı atomlardıń hár qıylı múyeshlerge burılıwı kerek. Nátiyjede bir tekli bolmaǵan magnit maydanı arqalı ótken atomlıq dásteniń sozılıwı kerek (216-a súwret). Al, haqıyqatında tájiriybeler basqa nátiyjelerdi berdi: *atomlıq nur hár qıylı bolǵan bir neshe nurlarǵa bólinedi eken*. Gúmis, natriy, kaliy hám basqa da silteli metallardıń atomlarınıń dástesi simmetriyalı eki dástege ajıraladı eken (216-b súwretke qarańız); al vanadiy atomları tórt dana dástege, marganec atomları altı dástege, al temir atomları toǵız dástege ajıralǵan. Sınap, magniy hám basqa da bir qatar atomlardıń dásteleri hesh qanday dástelerge ajıralmaydı eken. Bunnan, bul elementlerdiń atomlarınıń magnit momentlerine iye emes ekenligi kelip shıǵadı.



216-súwret.

- a) magnit maydanındaǵı atomlıq dásteniń kútilgen keńeyiwi;
b) gúmis atomlarınıń dástesiniń magnit maydanındaǵı eki dástege ajıralıwı.

Atomlıq nurdıń hár qıylı keskin túrde kórinetuǵın dástelerge ajıralıwı sırtqı magnit maydanınıń baǵıtına salıstırǵanda atomlardıń magnit momentleriniń qálegeninshe jaylasa almaytuǵınlıǵın, al magnit maydanınıń baǵıtına salıstırǵanda tek belgili bolǵan múyeshler menen ǵana jaylasatuǵınlıǵın kórsetedi. Misalı, natriy atomları tek eki usıl menen jaylasa aladı: olardıń magnit momentleri maydanniń baǵıtı boyınsha yamasa maydanniń baǵıtına qarama-qarsı jaylasadı; vanadiy atomları boyınsha maydanǵa salıstırǵanda tórt usıl menen baǵıtlanadı h.t.b. Bul fakttıń sebebi kvantlıq mexanikada túsindiriledi (III tomǵa qarańız).

⁴⁵ 1922-jılı (Awdarıwshılar).

Awısıwları ólshepler barlıq atomlardıń magnit momentleriniń proekciyalarınıń tolıq belgili bolǵan p_0 magnit momentleriniń racionallıq bólshek mánisine teń ekenligin kórsetedi:

$$p_m = \frac{q}{r} p_0.$$

Bul teńliktegi q hám r - pútin sanlar; p_0 magnit momenti *Bor magnetonı* dep ataladı. Onıń mánisi mınaǵan teń:

$$p_0 = 0,9272 \cdot 10^{-20} \text{erg/gauss.}^{46}$$

Bazı bir atomlardıń magnit momentleriniń maksimallıq mánisleri XV keste de keltirilgen.

Bul tájiriybelardıń nátiyjelerin tallaw, atomlıq spektrlerdiń qurılısınıń xarakteri sıyaqlı (III tomǵa qarańız) hár bir elektronnıń óziniń belgili bolǵan magnit momentine iye bolatuǵınlıǵına isendiredi. Bunnan, tábiyiy túrde, klassikalıq elektrodinamikanıń sheklerinde mınaday gipoteza payda boldı: elektron óziniń orayı arqalı ótetuǵın kósherdiń dógerinde úziksiz túrde aylanısta boladı; bunday aylanıwǵa elektronnıń qozǵalı muǵdarınıń momentiniń turaqlı mánisi P_e sáykes keledi (ingliz tilindegi *spin* sózi aylanıw degendi ańǵartadı). Qozǵalı muǵdarınıń bunday mánisi menen bir Bor magnetonına teń bolǵan magnit momenti de baylanısqa.

XV keste

Atomlardıń magnit momentleriniń proekciyalarınıń maksimallıq mánisleri
(Bor magnetonınıń úleslerinde)

Atom	$p_{m \max}$
Vodorod	1
Natriy	1
Vanadiy	3/5
Xrom	6
Temir	6
Indiy	1/3

Biraq, bunday kórgizbeli gipoteza júdá ápiwayılastırılǵan gipoteza bolıp tabıladı hám, sonlıqtan, kvantlıq mexanikanıń elektronnıń qásiyetleri haqqındaǵı kóz-qarasları menen almasırdı. Sonıń menen bir qatarda teoriyanıń nátiyjeleri menen tájiriybelardıń nátiyjelerin bir birine sáykes keltiriw ushın elektronnıń magnitlik momenti menen mexanikalıq momentiniń arasında mınaday qatnas bar dep boljawǵa tuwrı keldi:

$$p_m = \frac{e}{m} P_e. \quad (4)$$

Demek, menshikli momentler ushın p_m/P_e qatnasınıń elektronnıń orbitalıq magnit hám mexanikalıq momentleriniń qatnasınan eki ese úlken ekenligi kelip shıqtı. Olardıń arasındaǵı qatnas (3)-teńliktiń járdeminde beriledi.

Atomnıń (yamasa molekulanıń) tolıq magnit momenti elektronlardıń tuyıq orbitalar boyınsha qozǵalıwınıń nátiyjesinde payda bolatuǵın magnit momentleri menen elektronlardıń menshikli magnit momentleri p_m niń qosındısınan turadı. Bunday jaǵdayda, kvantlıq mexanikanıń nızamları boyınsha, ayırım elektronlıq orbitalar menen elektronlardıń ózleriniń magnit momentleri bir

⁴⁶ Magnit momentlerin *erg/gaucs* larda ólshep mınaday jaǵdaydan kelip shıǵadı: toǵı bar konturǵa tásir etetuǵın kúshlerdiń momenti M mınaǵan teń: $M = p_m B \sin \alpha$, bul teńlikte p_m - toqtıń magnit momenti, B - maydannıń magnitlik indukciyası. Bunnan:

$$p_m = \frac{M}{B \sin \alpha}.$$

M shaması *din·sm* de, al B - gauslarda ólshenetuǵın bolǵanlıqtan, p_m shamasınıń ólshem birligi $\frac{\text{din·sm}}{\text{gauss}}$ túrinde jazıladı. Biraq, *din·sm* birligi ergke sáykes keledi, bunnan p_m shamasınıń ólshem birligi *erg/gaucs* atamasın alǵan.

birine salıstırǵanda tek belgili bolǵan múyeshlerde baǵıtlanǵan boladı. Qosındı magnit hám mexanikalıq momentler arasındaǵı baylanıs (3)-formula beretuǵın nátiyjelerge qaraǵanda ádewir quramalı boladı. Bul jaǵday Eynshteyn hám De-Gaaz tájiriybesinde alınǵan nátiyjeler menen teoriyanıń arasında barday bolıp kórinetuǵın qarama-qarsılıqtı túsindiredi.

§ 202. Magnitleniw vektorı. Ortalıqtıń magnitleniw dárejesin shaması ortalıqtıń kólem birliginiń magnit momentine teń bolǵan magnitleniw vektorı dep atalatuǵın vektor menen táriyiplew qabıl etilgen. Magnetiktiń ΔV kóleminde jaylasqan molekullardıń magnit momentleriniń geometriyalıq qosındısı $\sum \mathbf{p}_i$ arqalı belgileybiz. Bunday jaǵdayda bir tekli magnitlengen magnetiktiń magnitleniw vektorı $\mathbf{P}$ mınaday teńliktiń járdeminde anıqlanadı:

$$\mathbf{P} = \frac{\sum \mathbf{p}_i}{\Delta V}. \quad (1)$$

Eger magnetik bir tekli magnitlenbegen bolsa, onda magnitleniw vektorı $\mathbf{P}$ hár qıylı kólemlerde hár qıylı mánislerge iye boladı; bunday jaǵdayda berilgen noqattaǵı magnitleniw dep ΔV kólemi sheksiz kishireygende (1)-ańlatpa umılatuǵın shekke aytamız:⁴⁷

$$\mathbf{P} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\sum \mathbf{p}_i}{\Delta V}. \quad (2)$$

Joqarıda kórgenimizdey, bir bólek magnetiktiń ishindegi magnit maydanınıń kernewligi sırtqı toqlar (magnitlewshi toqlar) payda etken maydannıń kernewligi $\mathbf{H}_0$ den hám magnitlengen zattıń molekulları payda etken kernewlikten qosıladı. Qosındı kernewlik bolǵan

$$\mathbf{B} = \mathbf{H}_0 + \mathbf{H}' \quad (3)$$

shamasın biz magnit indukciyası dep atadıq.



217-súwret.

Magnitlengen ortalıқтаǵı molekulalıq toqlardı qosıw.

Maydan nolge teń bolmaǵan keńislikti pútinley toltırıp turǵan bir tekli magnetik bolǵan jaǵdayda molekullardıń payda etken maydanınıń kernewligi $\mathbf{H}'$ tı magnitleniw vektorı $\mathbf{P}$ menen ańsat baylanıstırıwǵa boladı. Ápiwayı dara jaǵday ushın usı baylanıstı tabamız. Meyli, sheksiz uzın bolǵan solenoidtiń ishi bir tekli magnetik penen toltırılǵan bolsın. Solenoid arqalı toq ótkende magnetik bir tekli magnitlenedi. Onıń magnitleniwi tártiplesken molekulalıq toqlardıń bar bolıwınıń sebebinen payda bolǵan dep esaplaymız. Bul molekulalıq toqlardıń tegislikleri cilindrdiń kósheriniń baǵıtı menen baǵıtlas bolǵan magnitleniw vektorına perpendikulyar (217-súwret). Molekulalıq toqlardı cilindrdiń kesiminde qarap, biz cilindrdiń qalınlıǵında qarama-qarsı baǵıtlanǵan eki toqtıń ótetuǵınlıǵın kóremiz. Olar qarama-qarsı baǵıttaǵı magnit maydanların payda etedi hám olar bir birin kompensaciyalaydı. Toqlar tárepinen payda etilgen cilindrdiń qaptal beti arqalı ótetuǵın maydanlar kompensaciylanbaydı. Bul toqlar solenoidtaǵı toqqa usaydı hám, sonlıqtan, olar cilindrdiń ishinde kernewligi $\mathbf{H}'$ tı 195-paragraftaǵı (4)-formulanıń járdeminde esaplawǵa bolatuǵınday magnit maydanın payda etedi.

⁴⁷ Bul jerde hám usıǵan usaǵan basqa da fizikalıq máselelerde ΔV kóleminiń sheksiz kishireyiwi dep aytıwımızdıń shártli ekenligin túsiniwimiz kerek: shekke ótkende ΔV kólemin berilgen fizikalıq shama (mısalı, magnitleniw) onıń sheklerinde turaqlı bolıp qalatuǵınday dárejede ǵana kishi etip alamız, biraq bul kólem ayırım molekulanıń kólemine salıstırǵanda úlken bolıwı kerek.

Cilindrdiń uzınlıgınıń bir birliginde ótetuǵın toqtı I_0 arqalı belgilep, usı I_0 shamasınıń toqtıń kúshiniń uzınlıqtıń bir birligindegi oramlar sanına kóbeymesine teń orındı iyeletuǵınlıǵın kóremiz hám bunnan

$$H' = 4\pi I_0 \quad (4)$$

formulasına iye bolamız.

I_0 menen magnitleniw vektorınıń arasındadı baylanıstı ańsat tabıwǵa boladı. Magnitleniw vektorı kólemniń bir birliginin magnit momentine teń. Cilindrdiń kesiminiń maydanın S arqalı belgilep, uzınlıǵı l bolǵan cilindrdiń uchastkasınıń kóleminiń Sl ke teń ekenligin kóremiz. Demek, eger biz I_0Sl shamasına teń bolǵan cilindrdiń uchastkasınıń magnit momentin Sl ge bólsek, onda magnitleniw vektorı $\mathbf{P}$ nıń mánisin aladı ekenbiz, yaǵnıy

$$P = \frac{I_0Sl}{Sl} = I_0. \quad (5)$$

Solay etip, magnitleniw vektorı $\mathbf{P}$ san mánisi boyınsha uzınlıqtıń bir birligine tiyisli bolǵan molekualıq toqlardıń qosındısına teń eken. Magnitleniw vektorı $\mathbf{P}$ nıń baǵıtı kernewlik $\mathbf{H}'$ tıń baǵıtı menen baǵıtlas. Bunnan, (4)- hám (5)-formularadı salıstırıp,

$$\mathbf{H}' = 4\pi\mathbf{P} \quad (6)$$

teńligine iye bolamız. $\mathbf{H}'$ tıń bul mánisin magnit indukciyası $\mathbf{B}$ ushın jazılǵan (3)-ańlatpaǵa qoyıp,

$$\mathbf{B} = \mathbf{H}_0 + 4\pi\mathbf{P} \quad (7)$$

ańlatpasın alamız. *Ferromagnitlik emes deneler ushın magnitleniw vektorı $\mathbf{P}$ nı sırtqı toqlar payda etken maydannıń kernewligi $\mathbf{H}_0$ ge (magnitlewshi maydanǵa) proporcional dep esaplawǵa boladı:*

$$\mathbf{P} = \chi\mathbf{H}_0. \quad (8)$$

Berilgen magnetikti táriyipleytuǵın χ shamasın *magnitleniw koefficienti* yamasa *magnitlik sińirgishlik* dep ataydı.

Paramagnetikler ushın magnitleniw vektorı bolǵan $\mathbf{P}$ vektorı $\mathbf{H}_0$ vektorı menen baǵıtlas (olar ushın $B > H_0$) hám, usıǵan sáykes, χ nıń mánisi oń. Diamegnetikler ushın $\mathbf{P}$ penen $\mathbf{H}_0$ qarama-qarsı baǵıtlanǵan (olar ushın $B < H_0$) hám χ nıń mánisi teris.

$\mathbf{P}$ nıń mánisin (8)-ańlatpa boyınsha $\mathbf{H}_0$ arqalı ańlatıp (7)-formulaǵa qoysaq,

$$\mathbf{B} = (1 + 4\pi\chi)\mathbf{H}_0 \quad (9)$$

formulasın alamız. Turaqlı bolǵan $1 + 4\pi\chi$ shamasın bir μ hárıpi menen ańǵartıw, yaǵnıy

$$1 + 4\pi\chi = \mu \quad (10)$$

hám onı *ortalıqtıń magnit sińirgishligi* dep ataw qabıl etilgen. Paramagnit ortalıqlar ushın $\mu > 1$, diamagnitlik ortalıqlar ushın $\mu < 1$, al boslıq ushın $\mu = 1$.

(9)-formuladaǵı $1 + 4\pi\chi$ nıń ornına magnitlik sińirgishlik μ di qoyıp, mınanı alamız:

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}_0. \quad (9a)$$

Formulı (6)-, (7)-, (8)-, (9)- hám (9a) formulalar magnit maydanı nolge teń bolmaǵan keńislikti tolıǵı menen toltırıp turatuǵın bir tekli magnetik ushın durıs. Iqtıyarlı magnetik ushın $\mathbf{H}'$ ushın ulıwmalıq formulanı beriwge bolmaydı. Hár bir ayqın jaǵdayda $\mathbf{H}'$ shaması barlıq molekualıq toqlardı esapqa alıwdıń tiykarında esaplanadı.

Iqtıyarlı magnetik bar bolǵan jaǵdaydı qaraymız (yaǵnıy, bir tekli emes magnetik yamasa bir tekli magnetiktiń ayırım bólekleri). Bunday ortalıqtıń hár bir nóqatında magnitleniw koefficienti χ , sonıń menen birge magnitlik sińirgishlik μ [(10)-formula] óziniń mánisine iye. Házirshe $\mathbf{B}$ vektorın ólshewdiń usılın qarawǵa toqtamastan, biz onı belgili dep esaplaymız.

Berilgen noqatta

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu}\mathbf{B} \quad (11)$$

ańlatpası menen anıqlanatuǵın $\mathbf{H}$ vektorın kirgizemiz, bul teńlikte μ - ortalıqtıń usı noqatındaǵı magnitlik sińirgishligi. $\mathbf{H}$ vektorın *berilgen magnetiktegi magnit maydanınıń kernewlik vektorı dep ataymız.*

Eger magnetik bir tekli hám maydan nolge teń emes barlıq keńislikti tolıǵı menen toltırıp turatuǵın bolsa, onda $\mathbf{H}$ vektorınıń (11)-formula boyınsha anıqlaması menen bir qatarda (9a) formula da bar boladı.

Bul formulalardı salıstırıwdan maydan nolge teń bolmaǵan keńislikti tolıǵı menen toltırıp turatuǵın bir tekli magnetiktegi magnit maydanınıń kernewligi $\mathbf{H}$ tıń berilgen toqlar (magnitleytuǵın) payda etetuǵın kernewlik $\mathbf{H}_0$ ge sáykes keletuǵınlıǵın kóriwge boladı.

Iqtıyarlı magnetik ushın magnit maydanınıń $\mathbf{H}$ kernewlik vektorı $\mathbf{H}_0$ vektorına sáykes kelmewi múmkin (203-paragrafqa qarańız).

Iqtıyarlı ferromagnetik bolmaǵan dene ushın magnitleniw vektorı $\mathbf{P}$ nı magnit maydanınıń kernewligi $\mathbf{H}$ proporcional boladı dep esaplawǵa boladı:⁴⁸

$$\mathbf{P} = \chi \mathbf{H}. \quad (12)$$

Bul teńlikte χ - qarap atırılǵan noqattaǵı magnitleniw koefficienti.

(10)-, (11)- hám (12)-formulalardan

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \mathbf{H} + 4\pi \mathbf{P} \quad (13)$$

teńlikleri kelip shıǵadı. Maydan nolge teń bolmaǵan barlıq keńislikti toltırıp turatuǵın bir tekli magnetik bolǵan dara jaǵdayda $\mathbf{H} = \mathbf{H}_0$ hám (11)-, (12)- hám (13)- formulalar sáykes (9a), (8)- hám (7)-formulalarǵa ótedi.

200-paragrafta ayılǵanlarǵa sáykes, $\mathbf{B}$ vektorı magnetikler bar bolǵan jaǵdaydaǵı toqlardıń arasındaǵı óz-ara tásirlesiwdi anıqlaydı; bul principinde toqlardıń arasındaǵı óz-ara tásirlesiw kúshleriniń ózgerisi boyınsha magnitlik sińirgishlikti anıqlawǵa múmkinshilik beredi. Biraq, ámeliy jaqtan bul usıldı qollanıwdıń múmkinshiligi joq. Sebebi μ shaması birden júdá az shamaǵa ayrıladı, sonlıqtan toqlardıń arasındaǵı joqarıda ayılǵan óz-ara tásirlesiw júdá kishi. Sonlıqtan μ shaması janapay túrde (tuwrıdan-tuwrı emes) forması belgili bolǵan magnetiktiń magnit momenti boyınsha anıqlanadı.

XVI keste

Magnitlik sińirgishliktiń mánisleri
(gazler atmosferalıq basımda alınǵan)

Paramagnit zatlar		Diamagnit zatlar	
Zatlar	$(\mu - 1) \cdot 10^6$	Zatlar	$(1 - \mu) \cdot 10^6$
Azot	0,013	Vodorod	0,063
Kislorod	1,9	Mıs	8,8
Alyuminiy	23	Tas duzı	12,6
Platina	360	Vismut	176

Izertlenetuǵın zattan kesip alınǵan kishkene sharik kernewligi H_0 menen onıń gradienti $\Delta H_0 / \Delta x$ belgili bolǵan kúshli hám bir tekli emes magnit maydanına jaylastırıladı. Maydannıń tásirinde zat magnitlenedi. Eger P_m - onıń magnit momenti bolsa, onda, toǵı bar konturdaǵı sıyaqlı (197-paragraftaǵı 2-punktke qarańız), ol maydannıń gradientine proporcional bolǵan

⁴⁸ Eger magnitleniw vektorı $\mathbf{P}$ qosındı magnit maydanınıń kernewligine, yaǵnıy indukciya vektorı $\mathbf{B}$ ǵa proporcional dep aytıw aqılǵa muwapıq kelgen bolar edi (elektrostatikadaǵıday). Biraq, bir qatar tariyxıy sebeplerge baylanıslı (12)-teńlikti paydalanıw qabıl etilgen.

SHın mánisinde, usı eki kóz-qarastıń arasında principiallıq ayırma joq. Sebebi (11)-ańlatpa boyınsha $\mathbf{H}$ hám $\mathbf{B}$ vektorları bir birine proporcional. Joqarıda keltirilgen tariyxıy sebeplerge baylanıslı elektrostatikadaǵı sáykes formulalardıń túrinen bas tartıw ε hám μ shamalarınń uqsaslıǵına emes, al ε hám $\frac{1}{\mu}$ shamalarınń uqsaslıǵına ǵana alıp keledi [eger (11)-ańlatpanıń ornına $\mathbf{H} = \mu \mathbf{B}$ túrindegi ańlatpanı jazǵanda ne bolǵan bolar edi]. Usınıń menen birge χ_e hám χ_μ shamalarınń uqsaslıǵına emes, al χ_e hám χ_m / μ shamalarınń uqsaslıǵı orın aladı [(12)-ańlatpanıń ornına $\mathbf{P} = \chi \mathbf{B}$ dep jazǵanda qalay bolar edi] (207-paragrafqa qarańız).

$$f = P_m \left(\frac{\Delta H_0}{\Delta x} \right) \quad (14)$$

kúshiniń tásirine ushıraydı.

Shariktiń magnit momenti P_m magnitleniw vektorı P menen baylanısqan bolıwı múmkin. Juwıq túrde, shariktiń sheklerinde magnitlewshi maydan H_0 tı turaqlı dep esaplawğa boladı. Bunday jaǵdayda (sharik hám ellipsoid ushın kórsetiw múmkin bolǵanday) kólem birliginiń magnit momentine teń bolǵan magnitleniw vektorı P turaqlı boladı. Demek,

$$P_m = \frac{4}{3} \pi r^3 P. \quad (15)$$

Bul teńlikte r arqalı shariktiń radiusı belgilengen. Paramagnit sharik ushın P_m maydanniń baǵıtında, al diamagnit sharik ushın - P_m qarama-qarsı. Sonlıqtan, paramagnit sharik maydan kúshli oblastqa qaray, al diamagnit shar bolsa maydan ázzi bolǵan oblastqa qaray tartıladı.

(15)-formulanı (14)-formulaǵa qoyıp hám magnitleniw vektorı P nı shariktegi magnit maydanniń kernewligi H arqalı ańlatpa [(12)-formula], mınaday formulanı alamız:

$$f = \frac{4}{3} \pi r^3 \chi H \left(\frac{\Delta H_0}{\Delta x} \right). \quad (16)$$

Sáykes esaplaw sharik ushın

$$H = \frac{3}{2 + \mu} H_0$$

formulasınıń orınlı ekenligin kórsetedi.

Barlıq dia- hám paramagnit deneler ushın μ birden júdá kishi shamaǵa ayırılatuǵın bolǵanlıqtan, joqarı dálilikte $H = H_0$ teńligi orınlanadı hám (16)-formulanıń ornına mınanı jazıwǵa boladı:

$$f = \frac{4}{3} \pi r^3 \chi H_0 \left(\frac{\Delta H_0}{\Delta x} \right). \quad (17)$$

(17)-formula χ nı sharikke tásir etetuǵın kúshitiń shaması boyınsha anıqlawǵa múmkinshilik beredi.

Magnitleniw koefficienti χ nı hám magnitlik sińirgishlik μ dı anıqlaw ushın sozılǵan aylanıw ellipsoidın da paydalanıwǵa boladı. Ellipsoidtiń magnit momentin teoriyalıq jollar menen esaplawǵa da boladı. Sırtkı bir tekli magnit maydanında bunday ellipsoidqa maydanniń kernewligi sızıǵınıń boyınsha aylandırıwshı kúshlerdiń momenti M tásir etedi.

Bir qatar para- hám diamagnit zatlar ushın magnitlik sińirgishliktiń mánisleri XVI kestede keltirilgen.

§ 203. Ferromagnetizm. 200-paragrafta ayılıp ótilgenindey, paramagnit zatlardıń bir qatarı júdá úlken bolǵan qosımsha H' maydanın bere aladı hám usıǵan sáykes úlken bolǵan μ magnit sińirgishlikke iye boladı; bunday zatlardı *ferromagnit* zatlar dep ataydı. Ferromagnit zatlardıń qatarına temir, nikel, kobalt, gadolinıy hám olardıń quymaları (mısalı, Fe-Ni, jáne Fe-Ni-Al h.t.b.), ferromagnit emes zatlardıń bazı bir quymaları, mısalı 61,5% *Cu*, 23,5% *Mn* hám 15% *Al* quyması jáne marganc-vismuttiń, xrom-tellurdiń h.t.b. quymaları kiredi.

Ferromagnitlik zatlardıń ózgeshelikleri tek μ dıń úlken bolıwı menen sheklenbeydi, al mınaday qásiyetleri menen baylanıslı: 1) ferromagnit zatlar magnitlewshi maydan óziniń tásirin toqtatqannan keyin de magnitlengenlik halın saqlaydı, 2) olar ushın magnitlik sińirgishlik μ (sonıń menen birge magnitleniw koefficienti χ da) turaqlı shama bolıp tabılmaydı, al magnitlewshi maydanniń kernewligi H_0 den gárezli.

Kristallıq ferromagnetikler, mısalı, temirdiń monokristalları, magnitlik qásiyettiń anizotropiyasına iye: kristal bir baǵıtta ekinshi baǵıttaǵıǵa salıstırǵanda ańsat magnitlenedi. Mayda kristallıq strukturaǵa iye bolǵan tap sonday zat magnitlik qásiyetleri boyınsha izotrop⁴⁹.

⁴⁹ "Mayda kristallıq" termininiń ornına "polikristallıq" yamasa "untalǵan kristal" terminleri jiyi ushırasadı (Awdarıwshılar).

Temirdiń magnitlengenliginiń sırtqı maydanniń kernewliginen gárezligi birinshi ret 1872-jılı "Jumsaq temirdiń magnitleniw funkciyasın izertlew" atamasındaǵı miynetin baspadan shıǵarǵan Moskva universitetiniń professorı A.G.Stoletov tárepinen tereń izertlendi. Stoletovtıń eksperimentallıq usılı indukciya qubılısına tiykarlangan (221-paragrafqa qarańız). Bul jerde biz qattı deneler bolıp tabılatuǵın ferromagnitlerdiń magnit indukciyasın ólshewdiń basqa usılın qaraymız. Bizde ishine izertlenetuǵın ferromagnetikten soǵılǵan serdechnik salınǵan toroid túrindegi solenoid bar dep boljaymız.

Ózektiń ishindegi tolıq magnit maydanı solenoidtaǵı toq payda etken magnit maydanınıń kernewligi H_0 hám molekulalıq toqlar payda etken maydanniń kernewligi H' tıń qosındısı bolıp tabılatuǵın indukciya vektorı B menen anıqlanadı:

$$B = H_0 + H'.$$

Eger biz solenoidtıń ózeginiń ishinde ensiz kóldeneń sańlaq payda etsek (218-súwret) hám bul sańlaq $\mu = 1$ teńligi orınlanatuǵın ortalıq penen toltırılǵan (paramagnitlik qásiyeti esapqa alınbaytuǵın hawa menen toltırılǵan) bolǵanlıqtan, bul ortalıqtan indukciya vektorı menen magnit maydanınıń kernewlik vektorı bir birine teń boladı.

Sańlaqqa tiyisli bolǵan shamalardı "s" indeksi menen táriyipleymiz. Bunday jaǵdayda sańlaq ushın mınaǵan iye bolamız:

$$B_s = H_s \quad (1)$$

Ózektiń ishinde indukciya vektorı B toroidtıń kósherine parallel; eger toroidtıń ishindegi sańlaq júdá ensiz bolsa, onda (bul jaǵdaydı biz 207-paragrafta kóremiz), onda bul sańlaq indukciyanı sezilerliktey ózgertedi; demek, ózektiń ishindegi indukciya qanday bolsa, sańlaq oblastındaǵı indukciya da tap sonday boladı:

$$B_s = B.$$

Bunnan, (1)-qatnasqa sáykes

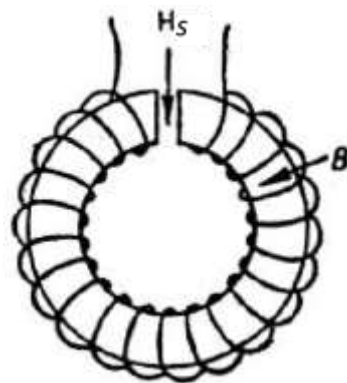
$$H_s = B = H_0 + H',$$

yaǵnıy, sańlaqtıń ishindegi kernewlik H_s ózektiń ishindegi indukciyaǵa teń, basqa sóz benen aytqanda, onıń shaması solenoidtaǵı toq tárepinen hám ózektiń molekulalıq toqları tárepinen payda etiletuǵın maydanlardıń kernewlikleriniń qosındısı $H_0 + H'$ qa teń.

Solay etip, magnitleniwdiń saldarınan ózek sańlaqtıń ishindegi maydanniń kernewligin úlkeytedi eken. Sańlaqtaǵı kernewlik H_s tı ólshep (mısalı, toǵı bar konturǵa tásir etiwı boyınsha), biz ózektegi indukciya V nıń mánisin ólsheymiz.

218-súwret.

Sańlaqtaǵı magnit maydanınıń kernewligi H_s tıń mánisi ferromagnetiktegi magnit indukciyası B nıń mánisindey.



Ferromagnetik zatlar ushın da, para- hám diamagnetik zatlardaǵıday indukciya vektorı B menen maydanniń kernewligi H tıń arasındaǵı baylanıs 202-paragraftaǵı (11)-ańlatpa boyınsha beriledi dep esaplaymız:

$$B = \mu H. \quad (2)$$

Bul ańlapada μ arqalı ferromagnetiktiń magnitlik sińirgishligi belgilengen.

Solay etip, magnitlik sińirgishlik bolǵan μ shamasın bizler

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2a)$$

qatnasınıń járdeminde anıqlaydı ekenbiz.

202-paragraftaǵı (10)-formula menen ańǵartılatuǵın μ menen magnitleniw koefficienti χ nıń arasındaǵı

$$\chi = \frac{\mu - 1}{4\pi}$$

túrindegi baylanıstı paydalanıp, magnitleniw vektori P nıń mánisin tabamız:

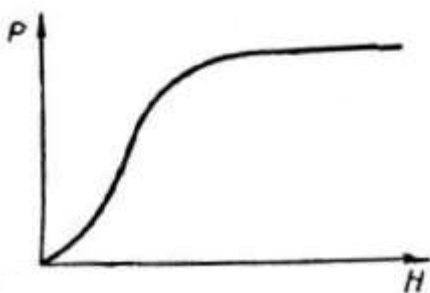
$$P = \chi H = \frac{B - H}{4\pi}. \quad (3)$$

Ózek maydan tárepinen iyelengen barlıq keńislikti ámeliy jaqtan iyeleytuǵın bolǵanlıqtan (ózektegi sańlaq júdá ensiz), toroidta jaylastırılǵan ózektegi magnit maydanınıń kernewligi H ózeksiz toroidtaǵı H_0 qa teń (202-paragrafqa qarańız). Sonlıqtan, solenoid bolǵan jaǵdaydaǵıday, onıń shaması mınaǵan teń:

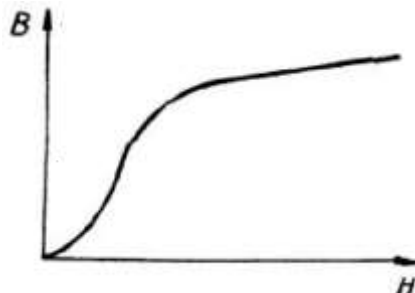
$$H = H_0 = 4\pi In.$$

Bul teńlikte n - toroidtıń uzınlıǵınıń bir birligindegi oramlar sanı. Sonday jollar menen toqtırn hár qıylı kúshleri I ushın H tıń shamaların ólshep hám sańlaqtaǵı magnit maydanınıń kernewligi H_s tı ólshew boyınsha B nıń mánislerin tawıp [(1)-formula], ferromagnetiktegi hár qıylı bolǵan H kernewlikleri ushın (yamasa magnitlewshi maydannıń hár qıylı bolǵan H_0 kernewlikleri ushın) μ menen P lardıń mánislerin tabıwǵa boladı.

Ólshewdiń nátiyjelerin grafikalıq túrde súwretlewge boladı. Dáslep magnitleniwdiń maydannıń kernewligi H tan ǵárezligine toqtaymız (219-súwret). Biz dáslep P magnitlengenliktiń H tıń ósiwi menen dáslep keskin úlkeyetuǵınlıǵın, bunnan keyin úlkeyiwdiń kishireyetuǵınlıǵın hám, eń aqırında, bazı bir H mánisinen keyin onıń bunnan bılay ósiwiniń P nıń úlkeyiwine alıp kelmeytuǵınlıǵın kóremiz. Bul jaǵday grafiktiń gorizont baǵıtındaǵı uchastkasına sáykes keledi. A.G.Stoletov tárepinen ashılǵan bul qubılıstı *magnitlik toyınıw* dep ataydı. P nıń H tan ǵárezliginiń usınday xarakterin bılayınsha túsindiriwge boladı: dáslep úlkeyiwshi magnitlewshi maydannıń tásirinde molekualıq magnit momentleriniń maydannıń baǵıtındaǵı baǵıtlanıwınıń dárejesi úlkeyedi, biraq, bul effektitiń úlkeyiwi menen ele baǵıtlanbaǵan momentlerdiń sanları kem-kemnen azayadı; eń aqırında, barlıq molekualıq momentler maydan boyınsha baǵıtlanǵan jaǵdayda P nıń bunnan bılay ósiwi toqtaydı hám toyınıw qubılısı baslanadı.



219-súwret. Ferromagnetik ushın magnitleniw vektori P nıń kernewlik H tan ǵárezligi.



220-súwret. Ferromagnetik ushın magnit indukciyası B nıń kernewlik H tan ǵárezligi.

Magnit indukciyası B nıń magnitlewshi maydan $H_0 = H$ den ǵárezligi uqsas bolǵan grafik penen kórsetiledi. Biraq, $B = H + H'$ teńligi orın alatuǵın bolǵanlıqtan, bul grafiktiń gorizont baǵıtındaǵı uchastkası bolmaydı. Toyınǵanda H' turaqlı bolıp qaladı, al B bolsa H tıń ósiwi menen sızıqlı túrde ósedi.

Magnit sıırǵıshlıq μ dıń (yamasa magnitleniw koefficienti χ nıń) H tan ǵárezligi bılayınsha táriyiplenedi: olar dáslep magnitlewshi maydannıń kernewliginiń ósiwi menen ósedi, al bunnan

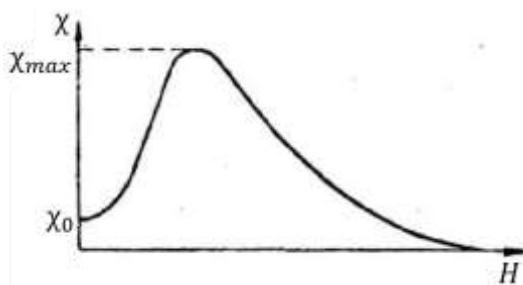
keyin maksimumğa jetip, jáne de kishireydi. Magnitlewshi maydan H tırn úlken mánislerinde μ dırn mánisi birge, al χ nırn mánisi nolge umtıladı. 221-súwrette Stoletovtıń temirdiń magnitleniw koefficienti χ ushın maydannırn kernewligi H tırn funkciyası sıpatındaǵı iymekligi kórsetilgen. μ koefficientiniń bir shamasına umtılıwı magnitlewshi maydan H tırn sonday úlken mánislerinde orın aladı, bunday maydanda

$$B = H + H'$$

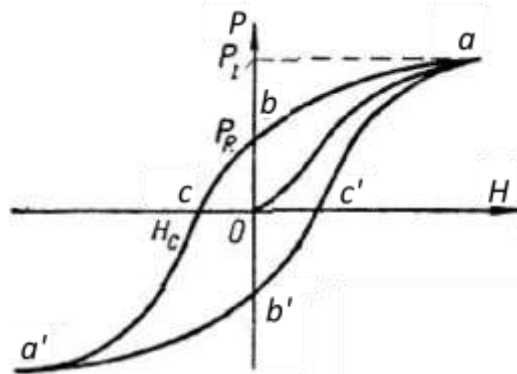
ańlatpasındaǵı molekuralıq maydannırn kernewligi H' tı H qa salıstırǵanda esapqa almawǵa boladı.

Gisterezis dep atalatuǵın jaǵdaydıń orın alıwı ferromagnetiklerdiń júdá áhmiyetli ózgesheligi bolıp tabıladı. Gisterezis qubılısınıń mánisi mınadan ibarat: magnitleniw P (soǵan sáykes magnit indukciyası B da) tek H tırn berilgen momenttegi mánisinen ǵana ǵárezli emes, al onıń bunnan burınǵı mánisinen de ǵárezli. 222 súwrette P nırn H tan ǵárezligi keltirilgen. Iymekliktiń Oa shaqası magnitleniw birinshi ret júzege kelip atırǵandaǵı H maydanı úlkeygendegi magnitleniw P nırn úlkeyiwın beredi. a noqatı toyınıwǵa sáykes keledi (toyınıw óziniń maksimalıq P_1 mánisine shekem úlkeyedi).

Eger, toyınıw júzege kelgennen keyin maydannırn kernewligi H ni kishireytsek, onda magnitlengenlik P nırn mánisi aO iymekligi menen emes, al jańa ab iymekligi menen júredi; kerı baǵıtta júrgendegi H tırn sol mánislerine P nırn úlken mánisleri sáykes keledi. $H = 0$ teńligi orınlanǵanda magnitleniw joq bolmaydı, al Ob kesindisine sáykes keletuǵın qaldıq P_R magnitlengenlik saqlanadı. P nırn bunnan bılayǵı kishireyiwin boldırıw ushın magnitlewshi H maydannırn baǵıtın qarama-qarsı tárepke ózgertiw kerek. Belgili bolǵan bazı bir $H = H_C$ mánisinde P magnitlengenlik joǵaladı. Oc kesindisi menen ańǵartılatuǵın H_C mánisi *koercitivlik kúsh* dep ataladı. H maydannırn kerı baǵıtındaǵı maydandı jáne de úlkeytkende, kerı baǵıttaǵı magnitleniw payda boladı. Bul jaǵdayda da a' toyınıwı júzege keledi. Eger bunnan keyin H magnit maydanın úlkeyewge májbúrlese, onda P nırn H tan ǵárezligi simmetriyalı $a'b'c'a$ iymekliginiń járdeminde súwretlenedi. Bunday jaǵdayda gisterezis tuyıqlanadı dep aytadı.



221-súwret. Ferromagnetik ushın magnitleniw koefficienti χ nırn maydannırn kernewligi H tan ǵárezligi.



222-súwret. Gisterezis qurıǵı.

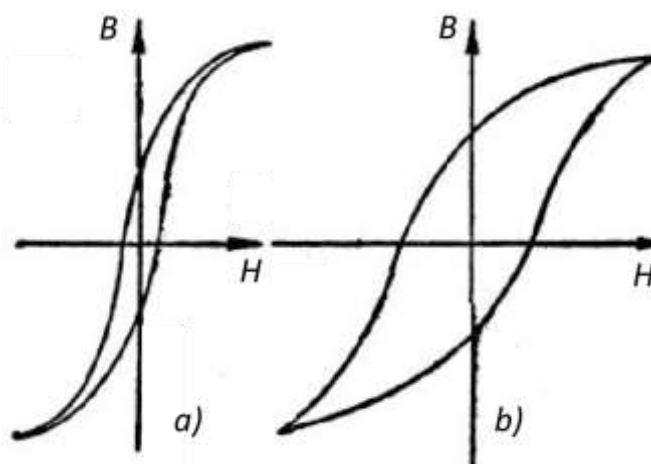
Gisterezis qubılısınıń orın alatuǵınlıǵına baylanıslı magnitlewshi H maydannırn bir mánisine magnitlengenlik P nırn hár qıylı mánisleri sáykes keledi. Mısalı, $H = 0$ mınaǵan sáykes keledi: 1) magnitlengenliktiń joq ekenligine (O noqatı); 2) Ob kesindisi menen súwretlenetuǵın magnitlengenlikke (ózekti magnitlengennen keyin orın aladı); 3) Ob' kesindisi menen súwretlenetuǵın magnitlengenlikke (ózekti qaytadan magnitlengennen keyin orın aladı).

Hár qıylı ferromagnetik zatlar hár qıylı gisterezis qurıqların beredi. Texnikalıq qollanıluwı ushın gisterezistıń hár qıylı tipleri talap etiledi. Kishi koercitivlik kúsh penen táriyiplenetuǵın "jumsaq" magnetik materiallar menen úlken koercitivlik kúshler menen táriyiplenetuǵın "qattı" magnetik

materiallardı ayırıw qabil etilgen. Jumsaq magnitlik materiallardıń qatarına jumsaq temir, kremniyli polat, temirdiń nikel menen quyması (ayırıqsha "permalloy" dep atalatuǵın hám óziniń ishine 78% Ni di alatuǵın quyma) kiredi; bunday materiallardı, mısalı, transformatorlardıń ózeklerin soǵıw ushın paydalanadı. "Qattı" magnitlik materiallardıń qatarına uglerodlı hám arnawlı polatlar (mısalı, quramında Fe, Al, Cu, Ni hám Co bolǵan "magniko" quyması). Bunday qattı materiallar turaqlı magnitlerdi soǵıw ushın paydalanıladı. 223-súwrette "jumsaq" (a) hám "qattı" (b) materiallar ushın gisterezis iymeklikleri kórsetilgen.

XVII kestede kóp ushırasatuǵın bir neshe jumsaq magnitlik materiallar ushın magnit sińirgishliktiń maksimallıq mánisleri bolǵan μ_{max} lar, maksimallıq magnitleniw P_I shamasınıń hám koercitivlik kúsh H_c niń mánisleri keltirilgen. Usınıń menen birge maksimallıq magnitleniw ushın P_I diń 4π ge kóbeytilgen mánisleri berilgen. Sebebi, 202-paragraftaǵı (7)-formula boyınsha magnitlik indukciya B (tikkeley ólshenetuǵın shama) P menen $\mathbf{B} = \mathbf{H}_0 + 4\pi\mathbf{P}$ qatnası boyınsha baylanısqan.

223-súwret.
a) - "jumsaq" materiallar hám b) "qattı" materiallar ushın gisterezis qurıqları.



XVIII kestede bazı bir ádettegi qattı magnit materiallar ushın $4\pi P_I$ kóbeymesiniń san mánisleri (bul kóbeymede P_I - maksimallıq magnitleniw), $4\pi P_R$ kóbeymesiniń san mánisleri (P_R arqalı qaldıq magnitlengenlik belgilengen) hám H_c koercitivlik kúshtiń mánisleri berilgen.

XVII keste

Ádettegi "jumsaq" magnit materiallardıń qásiyetleri

Zat	μ_{max}	$4\pi P_I$, gauslarda	H_c , erstedlerde
Temir (taza)	5000	21500	1,0
Kremniyli temir	10000	20000	0,2
Permalloy	100000	16000	0,05
Supermalloy	900000	8000	0,004

Ferromagnit denelerdiń magnitleniw processı olardıń sıızıqlı ólshemleri menen kólemiń ózgerisi menen júredi. Bul qubılıstı magnitostrikiya dep ataydı. Effekttiń shaması menen belgisi magnit maydanınıń kernewliginen hám maydannıń baǵıtı menen kristallıq kósherdiń arasındaqı múyeshten ǵárezli (monokristallıq denelerde). Uzayıwdıń mánisi úlken emes hám, ulıwma aytqanda, dáslepki uzınlıqtıń júz mıńnan birin quraydı.

XVIII keste

Ádettegi "qattı" magnit materiallardıń qásiyetleri

Zat	μ_{max}	$4\pi P_I$, gauslarda	H_c , erstedlerde

Uglerodli polat	10000	20000	42
Volfram polat	10500	16500	65
Kobalt polat	90000	16300	250
Magniko	12500	14000	575

§ 204 Ferromagnetizmniń tábiyatı. Ferromagnetizm zatlardıń qattı fazası menen ayrıqsha túrde baylanıslı. Ferromagnit elementlerdiń erkin atomları qanday da bir ayrıqsha magnitlik qásiyetlerge iye emes. XV kestden temir menen xromnıń magnit momentleriniń birdey ekenligi kórinip tur. Biraq, temir ádettegi ferromagnitlik zat, al xrom bolsa ádettegi paramagnetik. Ferromagnit emes bolǵan zatlardıń ferromagnit quymaları bar.

Paramagnetikler jetiw múmkin bolǵan magnit maydanlarınıń barlıǵında toyınıw halınan alısta jaylasadı. Bul hátte eń kúshli maydanlarda molekullardıń orientaciyası tolıq emes. Ferromagnetikler bolsa, kerisinshe, toyınıw halına jeńil túrde jetedi.

Qálegen ferromagnetik ushın ferromagnitlik hal joǵalatuǵın $T = \Theta$ temperatura bar. Bul Θ temperaturası Kyuri temperaturası yamasa Kyuri noqatı dep ataladı (usınday noqattıń bar ekenligin ashqan francuz fizigi P.Kyurdiń familiyası boyınsha). Kyuri noqatınan joqarıdaǵı temperaturalarda ferromagnittiń qásiyeti ádettegi paramagnittiń qásiyetindey. Ádettegi paramagnetiklerdiń magnitleniw koefficienti χ temperaturaǵa baylanıslı

$$\chi = \frac{C}{T}$$

nızamı boyınsha ózgeredi. Bul teńlikte C - berilgen zat ushın turaqlı shama (Kyuri turaqlısı). Al ferromagnitler ushın Kyuri noqatınan joqarı temperaturalarda:

$$\chi = \frac{C}{T - \Theta}$$

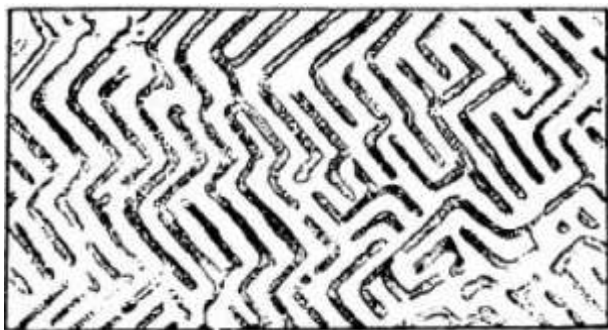
Taza temir hám nikel ushın Kyuri noqatı sáykes 768°C hám 365°C shamalarına teń; bul temperaturalar kórsetilgen zatlardıń balqıw temperaturalarınan ádewir tómén (temir ushın balqıw temperaturası 1530°C). Kyuri noqatında tek denelerdiń magnitlengenligi ǵana joǵalıp qoymaydı, al olardıń bir qatar qásiyetlerindeki anomaliyalar baqlanadı (mısalı jıllılıq sıyımlıǵınıń, elektr ótkizgishliktiń hám basqa da qásiyetlerdiń anomaliyaları); magnitostrikciya joǵaladı. Kyuri noqatınıń bar ekenligin kórsetetuǵın ferromagnetizmniń eń ápiwayı teoriyası Veyss tárepinen islep shıǵıldı.

1892-jılı rus fizigi B.L.Rozing birinshi bolıp denelerdiń ferromagnitlik qásiyetlerin túsindiriwge tırıstı. Ol ferromagnetiklerdiń ishinde qosımsha "molekulalıq magnit maydanları" bar dep boljadı. Onıń boljawı boyınsha, qosımsha maydanlar ferromagnetiktiń magnitlengen kishi oblastlarında ózinen-ózi payda boladı. Sırtqı maydan bolmaǵan jaǵdayda ayırım usınday oblastlardıń magnitleniw vektorları tártipsiz túrde baǵıtlanǵan hám olar bir birin kompensaciyalaydı. Sırtqı maydan bolǵan jaǵdayda vektorlar bir birin kúsheytetuǵınday bolıp burıladı hám qosımsha maydandı beredi. Bul gipoteza keyinirek (1907-jılı) Veyss tárepinen rawajlandırıldı. Házirgi waqıtlardaǵı kóz-qaraslar boyınsha ferromagnetiklerde óz-ózinen ("spontan" túrde) toyınǵanǵa shekem magnitlengen úlken bolmaǵan oblastlar (domenler) boladı. Sırtqı magnit maydanı bolmaǵan jaǵdayda bul "óz-ózinen magnitlengen oblastlar" tártipsiz magnitlengen, usınıń saldarınan dene ortasha magnitlenbegen. Sırtqı maydan ayırım molekullardıń baǵıtın ózgerterdi, al "óz-ózinen magnitlengen oblastlar" dı ózgerterdi. Nátiyjede, ferromagnetikte toyınǵanǵa shekemgi kúshli magnitleniwdi payda ete aladı. N.S.Akulov penen M.V.Dextyar tegislenген betke sebilgen magnit poroshoktıń járdeminde magnitsizlendirilgen ferromagnetiktiń ózinen ózi magnitlengen oblastlarınıń shegaraların ayqınlastıratuǵın figuralardı aldı (224-súwret).

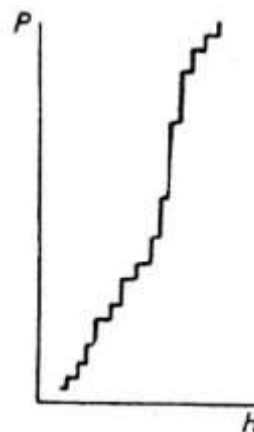
Óz-ózinen magnitlengen oblastlardıń bar ekenligi ázzi maydanlardaǵı magnitleniw

iymekliginiń sekirmeli júrisi boyınsha da dálillenedi. Sırtqı maydan ástelik penen óskende ferromagnetiktiń keskin kóteriliw oblastındaǵı magnitleniwi sekirmeli túrde úlkeyedi (225-súwret). Bul ayırım oblastlardıń magnitlengenliginiń baǵıtınıń ózgeriwi menen júzege keledi. V.K.Arkadev magnitleniwdiń sekirmeli túrde ózgeretuǵınlıǵın anıqlaytuǵın akustikalıq usıldı islep shıqtı.

Óz betinshe magnitlengen oblastlardıń bar bolıwı kóz-qarası menen gisterezis qubılısın ulıwma túrde ayırım oblastlardıń orientaciýaların ózgertiwge kesent beretuǵın ózinshe "súykelis" penen túsindiriwge boladı. Magnitlewshi maydannıń tásiiri toqtaǵannan keyin usınday súykelistiń aqıbetinde óz betinshe magnitlengen oblastlardıń baǵı bir orientaciýası saqlanadı. Óz betinshe magnitlengen oblastlardıń tolıq tártipsiz tarqalıwına "koercitivlik kúsh" kesent beredi. Usı kúshtiń tásin joǵaltıw ushın keri baǵıttaǵı magnit maydanın túsirip, sonıń saldarınan zattı magnitsizlendiwge boladı.



224-súwret. Magnitleniw oblastları.



225-súwret. Ferromagnetiktiń magnitlengenliginiń sekirmeli ósiwi.

Bul kóz-qarastıń durısıǵı ferromagnetlerdi silkiwdiń saldarınan magnitlengenliktiń joǵalıwı menen tastıyıqlanadı. Sonıń menen birge qaldıq magnitleniw, joqarıda aytılıp ótilgenindey, qızdırıwdıń saldarınan joǵaladı (Kyuri noqatında).

Magnitlengen oblastlardıń baǵıtlarınıń ózgeriwine kesent beretuǵın "súykelistiń" bolıwı ferromagnetiklerdiń qásiyetleriniń ózgermeli magnit maydanındaǵı jiyilikten ǵárezli bolatuǵınlıǵına alıp keledi. Bul ǵárezlik V.K.Arkadev hám ol basqarǵan xızmetkerler toparı tárepinen qısqa elektromagnet tolqınlar diapazonına shekemgi jiyilikler ushın tereń úyrenildi. 10^{10} gc hám onnan da joqarı jiyiliklerde μ jiyilikten ǵárezli bolıwın toqtatadı hám birge teń boladı.

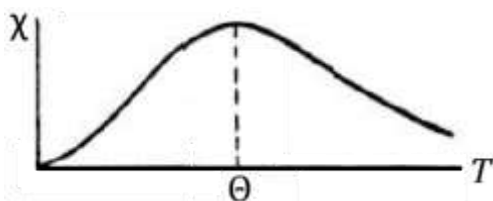
Ferromagnetizmniń tábiyatı tiykarınan atomlıq fizikanıń rawajlanıwı menen anıqlandı. 1927-jılı YA.G.Dorfman ferromagnet denelerdegi tez qozǵalatuǵın elektronlardıń (β -nurlarınıń) awısıwın izertlew boyınsha ótkerilgen tájiriybelerde elektronlardıń atomnıń ishindegi qozǵalıslarınıń saldarınan payda bolǵan magnetlik óz-ara tásirlesiw kúshleriniń óz-ózinen magnitleniwge alıp kele almaytuǵınlıǵın kórsetti. 1928-jılı YA.I.Frenkel birinshi bolıp óz-ózinen magnitleniwdiń kvantlıq mexanikada qaralatuǵın "almasıw kúshleriniń" bar bolıwınıń saldarınan júzege keletuǵınlıǵın atap ótti. Belgili bolǵan sharayatlarda elektronlardıń menshikli magnet momentlerin bir birine parallel etip uslap turadı hám bunday jaǵday óz-ózinen magnitlengen oblastlardıń payda bolıwına alıp keledi. Bul ideya Geyzenberg tárepinen mayda-shúydesine shekem islep shıǵıldı.

Solay etip, ferromagnetlik qubılıslardı elektronlardıń menshikli magnet momentlerin esapqa alǵan halda kvantlıq mexanikanıń tiykarında túsiniwge bolatuǵınlıǵı anıqlandı.

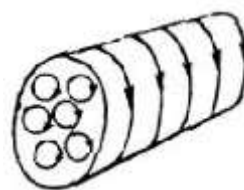
Ferromagnetlik qásiyetler zattıń kristallıq strukturası menen tıǵız baylanısqa bolıp shıqtı. Ayqın materiallardıń magnitleniw iymeklikleri (gisterezis qurıqları) olardıń mayda kristallıq strukturasınan ǵárezli hám sırtqı tásirlerge baylanıslı ózgeredi (mısalı, qızdırıw arqalı qayta

islewden, sozıwdan h.t.b.). Gisterezis qubılısınıń ózi quramalı tábiyatqa iye hám belgili bir dárejede óz-ózin magnitlengen oblastlardıń arasındaǵı shegaralardıń jılısıwı menen de baylanıslı.

Házirgi zaman texnikasında *ferritler* dep atalatuǵın magnitlik zatlar úlken áhmiyetke iye. Olar mınaday ximiyalıq birikpeler bolıp tabıladı: $MeO \cdot Fe_2O_3$, bul formulada *Me* arqalı *Mn, Co, Ni, Cu, Mg, Zn, Cd* metallarınıń biri (yamasa ekewi) belgilengen; misalı $CuO \cdot Fe_2O_3$ yamasa $NiOZnO \cdot Fe_2O_3$ h.t.b. Ferritler jumsaq ferromagnetikler bolıp tabıladı. Usınıń menen birge, olar ózleriniń elektrlik qásiyetleri boyınsha shama menen $10^2 - 10^8$ om·sm omliq qarsılıqqa iye yarım ótkizgishler bolıp tabıladı. Bul jaǵday ferritlerdi elektrotexnikada paydalanǵanda júdá áhmiyetli. Sebebi olarda zıyanlı quyn tárizli toqlar payda bolmaydı (Fuko toqları, 231-paragrafqa qarańız). Ferritlerden transformatorlardıń ózeklerin, indukciyalıq katushkalardıń sterjenlerin h.t.b. soǵadı.



226-súwret. Antiferromagnetik ushın magnitleniw koefficienti χ nıń temperaturadan ǵárezligi.



227-súwret. Turaqlı magnittegi amper toqları.

Magnetiklerdiń ayırıqsha bolǵan túrleriniń qatarına antiferromagnetikler dep atalatuǵın zatlar kiredi. Berilgen ferromagnetik ushın anıqlanǵan Θ temperaturasınan joqarı bolǵan T temperaturalarında antiferromagnetik ádettegi paramagnetikke aylanadı, olardıń magnitleniw koefficienti χ temperatura T nıń tómenelewı menen tómeneleydi hám $T \rightarrow 0$ bolǵan jaǵdayda nolge teń boladı (226-súwret). Θ temperaturası tómengi temperaturalar oblastında jatadı (shama menen 20 - 30 K hám tómene). Antiferromagnetiklerge misal sıpatında $CoCl_2$, $CrCl_3$, Cr_2O_3 hám basqalardı kórsetiwge boladı.

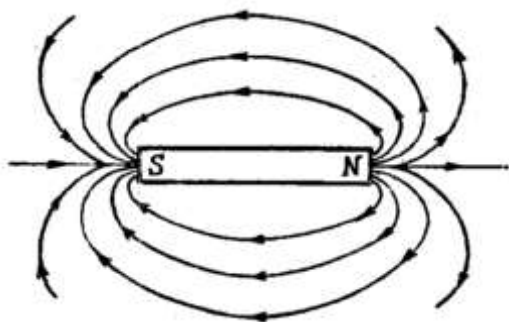
Tek kvantlıq mexanikanıń tiykarında ǵana antiferromagnetiklerdiń qásiyetlerin teoriyalıq jaqtan túsindiriw múmkin.

§ 205. Turaqlı magnitler. Ferromagnet zatlarda qaldıq magnitleniwge iye bolıw múmkinshiligi olardan *turaqlı magnitlerdi* alıwǵa múmkinshilik beredi. Turaqlı magnitler qanday da bir sırtqı dereklerdiń tásirinde payda bolǵan elektr toqları bolmaǵan jaǵdaylarda qorshaǵan ortalıqta magnit maydanın payda etedi.

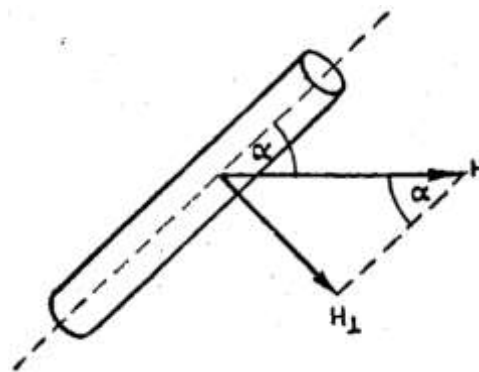
Turaqlı magnitler úlken qaldıq magnitleniwge hám úlken koercitivlik kúshke iye bolǵan ferromagnetiklerden soǵıladı ("qattı" polatlar).

Ferromagnet denelerdegi qaldıq magnitleniw spontan magnitleniw oblastlarınıń saqlanıwı menen baylanıslı. Bizler bunnan aldırǵı paragrafta spontan magnitleniw oblastlarınıń ózleriniń elektronlardıń menshikli magnit momentleri menen baylanıslı ekenligin kórsetiwge bolatuǵınlıǵın aytqan edik. Biraq, qaldıq magnetizmniń qásiyetlerin sapalı túrde túsindiriw ushın tek ǵana elektronlardıń qozǵalısnı hám usınday qozǵalıstıń saldarınan payda bolatuǵın molekulalıq toqlardı qarawǵa boladı. Bunday jaǵdayda qaldıq magnitleniwdi molekulalıq toqlardıń saqlanatuǵın baǵıtı menen baylanıslı dep esaplawǵa boladı. Usınıń saldarınan qosındı molekulalıq toq ortasha nolge teń bolmaydı hám ol magnit maydanın payda etedi. 227-súwrette tuwrı magnittiń kese-kesimi kórsetilgen. 202-paragraftaǵıday tallaw ótkerip, biz magnittiń ishinde molekulalıq toqlar bir birin kompensaciyalaydı dep esaplay alamız. Biraq, onıń betinde kompensaciylanbaǵan qosındı toq qaladı (molekulalıq toq). Bul toq magnittiń beti boyınsha aǵadı hám, solay etip, tuwrı *magnittiń solenoid penen uqsaslıǵın payda etedi*.

Tuwrı hám uzın turaqlı magnittiń maydanınıń magnitlik kernewliginiń sıızqları solenoidtıń sırtındaǵı kernewlik sıızqlarına usaydı (228-súwret). Magnit penen solenoidtıń arasındaǵı ayırma mınalardan ibarat: solenoidta kernewlik sıızqları boyınsha júre alamız hám hár bir sıızqtıń tuyıq iymeklikti payda etetuǵınlıǵına kóz jetkeremiz. Turaqlı magnitte magnittiń denesiniń ishindegi kernewlik sıızqlarınıń júrisin biz tikkeley anıqlay almaymız. Bizge kernewlik sıızqlarınıń magnittiń arqa polyusı dep atalatuǵın ushınan shıǵıp, túslik polyus dep atalatuǵın ushında kiretuǵınday bolıp kórinedi. Tuwrı magnitke misal retinde strelka túrindegi magnitti kórsetiwge boladı (magnitlik strelka).



228-súwret. Tuwrı turaqlı magnittiń kernewlik sıızqları.



229-súwret. Magnittiń kósherine perpendikulyar bolǵan maydanniń kernewligi H tıń qurawshısı.

Tuwrı magnit bir tekli magnit maydanı tárepinen baǵıtlawshı tásirde sezedi, bul tásir magnitti magnit kernewligi H tıń sıızqlarınıń baǵıtına parallel etip jaylastırıwǵa tırısadı. Magnit kernewlik sıızqları baǵıtında jaylasqanda oǵan tásir etetuǵın kúshlerdiń momenti nolge teń boladı ($M = 0$); magnit kernewlik sıızqlarına perpendikulyar jaylasqan jaǵdayda kúshlerdiń momenti M maksimalıq mánisine jetedi.

Bunnan, M momentiniń maydanniń kernewligi H tıń magnittiń kósherine perpendikulyar bolǵan qurawshısı tárepinen payda etiletuǵınlıǵın boljaw tábiyiy:

$$M = p \cdot H_{\perp}.$$

Bul teńlikte p - magnittiń óziniń qásiyetlerinen ǵárezli bolǵan shama. 229-súwretten mınaǵan iye bolamız: $H_{\perp} = H \sin \alpha$, bul teńlikte α - magnittiń kósheri menen maydanniń baǵıtınıń arasındaǵı múyesh; Bunnan

$$M = pH \sin \alpha \quad (1)$$

teńligine iye bolamız. Bul ańlatpanı solenoidqa tásir etetuǵın M momenti ushın arnalǵan formula menen salıstırsaq (192-paragraf), onda olardıń tolıq uqsaslıǵın kóremiz. p shaması magnittiń *magnit momenti dep ataladı*.

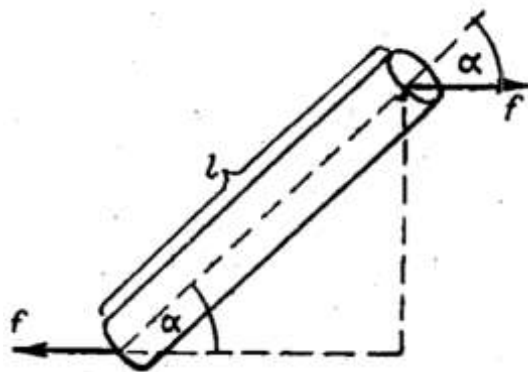
Solay etip, joqarıda ayılǵanlardı juwmaqlap, biz sırtqı magnit maydanı tárepinen toq ótip turǵan konturǵa, solenoidqa yamasa magnit strelkasına tásir etetuǵın kúshlerdiń jubınıń momentiniń bir (1)-formula menen ańlatıladı dep ayta alamız. Toq ótip turǵan kontur, birdey p magnit momentlerine iye bolǵan solenoid hám magnit strelkası berilgen maydanda birdey baǵıtlawshı tásirge ushıraydı. Toq ótip turǵan kontur bolǵan jaǵdayda onıń magnit momenti usı konturdan ótip turǵan toqtıń kúshi I hám S maydan menen anıqlanadı; magnittiń p magnit momenti onıń individuallıq qásiyetlerinen - onıń ólshemlerinen hám "magnitlengenlik dárejesi boyınsha anıqlanadı.

Sırtqı magnit maydanında jaylasqan magnitke tásir etetuǵın kúshler onıń barlıq elementlerine túsedi. Eger magnit strelkasın ekige bólsek, onda onıń hár bir bólimi sırtqı magnit maydanında baǵıtlawshı tásirge ushıraydı. Biraq, bir qatar máselelerdi qaraǵanda bul kúshlerdi lokalizaciylaw

qolaylı. Bunday lokalizaciya mınaday pikirlewlerdiń tiykarında múmkin. Qos kúshlerdiń momentiniń usı qos kúshti payda etetuǵın kúshlerdiń birewi bolǵan f tiń qos kúshtiń iyini bolǵan l shamasına kóbeymesine teń. Sonıń menen birge birdey M momentin payda ete alatuǵın barlıq juplar ushın fl shamarları birdey, óziniń tásiiri boyınsha ekvivalent. Sonlıqtan, magnittiń barlıq elementlerine túsirilgen barlıq kúshler óziniń qosındı momenti boyınsha onıń ushlarına túsetuǵın shamarları birdey bolǵan f kúshlerine ekvivalent. Eger bul kúshler olardıń momenti magnetke haqıyqatında tásir etetuǵın kúshlerge teń etip saylap alınatuǵın bolsa, onda olardıń biri maydanniń baǵıtında, al ekinshisi maydanǵa qarama-qarsı jaylasadı (230-súwret).

230-súwret.

Magnetke tásir etetuǵın kúshlerdiń momentin anıqlawǵa.



Solay etip, biz formallıq jaqtan magnet maydanı tárepinen magnetke onıń ushlarına eki f kúshi tásir etedi dep esaplay alamız. 230-súwrette f qos kúshleriniń iyniniń $l \sin \alpha$ shamasına teń ekenligin kóremiz. Bul ańlatpada l - magnittiń uzınlıǵı; bunnan olardıń momentiniń $M = fl \sin \alpha$ shamasına teń boladı. Bul momentke (1)-formula boyınsha magnet maydanı tárepinen magnetke tásir etetuǵın kúshlerdiń momentin teńlestirsek, mınaday teńlikti alamız:

$$fl \sin \alpha = pH \sin \alpha.$$

Bunnan

$$fl = pH. \quad (2)$$

teńligine iye bolamız.

Bunnan keyin, magnittiń magnet momenti p menen elektr dipoliniń momenti p_q dıń arasındaǵı baǵı bir analogiyanı (uqsaslıqtı) kórsete alamız. Bul analogiya mınaday jaǵdaydan kelip shıǵadı: tuwrı hám uzın magnet ózinen jetkilikli dárejede qashıqtaǵı noqatta maydanınıń kernewligi óziniń magnet momentine proporcional hám oǵan shekemgi qashıqlıqtıń kubına kerı proporcional bolǵan dipol payda etkendey maydanniń kernewligin payda etedi. Biraq, usınday jaǵdayǵa qaramastan, bunday analogiya tek sırtqı hám rásimiy xarakterge iye. Biraq, sonda da bir qatar jaǵdaylarda esaplawlardı ańsatlastıratuǵınlıǵına baylanıslı bul analogiya paydalanıladı. 124-paragrafta biz elektr dipoliniń momentiniń eki deneniń birewiniń zaryadı q dıń olardıń arasındaǵı qashıqlıqqa kóbeymesine teń ekenligin kórdik:

$$p_q = ql.$$

Formallıq jaqtan biz haqıyqatında magnet zaryadlarıń joq ekenligin bilsek te, magnittiń momenti p nı onıń uzınlıǵı l dıń oyımızdaǵı magnet zaryadı m niń (yamasa, ádette magnetlik massaǵa) kóbeymesine teń dep esaplay alamız. Bunday jaǵdayda magnet zaryadı qatnasatuǵın mınaday formulanı jazıwımız kerek:

$$p = ml. \quad (3)$$

Oyımızdaǵı usınday magnetlik massalardıń turǵan orınların polyusler dep ataw qabıl etilgen. (3)-teńlikke sáykes, polyuslar magnittiń ushlarında jaylasqan. (3)-teńlik boyınsha polyusta jaylasqan magnet massası mınaǵan teń

$$m = \frac{p}{l} = p_0. \quad (4)$$

Bul tenlikte p_0 - magnittiń uzınlıǵınıń bir birligine tiyisli bolǵan magnit momenti.

(2)- hám (3)-teńliklerden

$$fl = mHl$$

hám, bunnan

$$f = mH, \quad (5)$$

teńligine iye bolamız. Demek, oyımızdaǵı magnittiń magnit polyusine san mánisi boyınsha polyusta jaylasqan magnit massası m niń sırtqı magnit maydanınıń kernewligi H tıń kóbeymesine teń kúsh tásir etedi. Kernewlik vektóri $\mathbf{H}$ tárepke qaray burılatuǵın magnittiń ushın "arqa", al, qarama-qarsı tárepke qaray burılatuǵın ushtı "túslik" polyus dep ataymız. Eger "arqa polyusta" jaylasqan magnitlik massa m di orń, al "túslik polyusta" jaylasqan magnitlik massanı teris dep esaplasaq, onda (5)-teńlikti vektorlıq túrde jazıwǵa boladı:

$$\mathbf{f} = m\mathbf{H}. \quad (5a)$$

Magnitlik massa m ge tásir etetuǵın kúsh f ti kirgiziw kóp máselelerdi tallawdı ápiwayılastıradı (mısalı magnit strelkalarınń baǵıtı hám tartılıwı máseleleri). Bunnan, haqıyqatında da tábiyatta magnitlik massalar bolmasa da, magnetizm haqqındaǵı tálimattaǵı magnitlik massa haqqındaǵı túsiniktiń bazı bir dárejede saqlanıwınıń sebebi usınıń menen túsindiriledi. Bir tekli magnit maydanında f kúshleri strelkanı maydannıń baǵıtında jaylastırıwǵa umtıladı. Eger strelka kósheriniń baǵıtı magnit maydanlarınń baǵıtı menen baǵıtlas etip jaylastırılǵan bolsa, onda strelkaǵa tásir etetuǵın kúshlerdiń jubınıń momenti nolge teń - strelka teń salmaqlıq halında jaylasadı. Biraq, eger túslik polyustan arqa polyusqa qaraǵan baǵıt magnit maydanlarınń baǵıtına sáykes kelse, onda bul teń salmaqlıq ornıqlı boladı; haqıyqatında da, bul jaǵdayda strelkanı teń salmaqlıq halınan shıǵarǵan jaǵdayda payda bolǵan kúshlerdiń jubı strelkanı dáslepki halına qaytarıwǵa tırısadı (231a súwret). Kerisinshe, eger strelka maydangá parallel jaylasqan bolsa, onda túslik polyustan arqa polyusqa qaraǵan baǵıt maydannıń baǵıtına qarama-qarsı, sonlıqtan onı teń salmaqlıq haldan shıǵarǵanda strelkanı onnan da beter buriwǵa tırısatuǵın kúshler payda boladı (231b súwret).

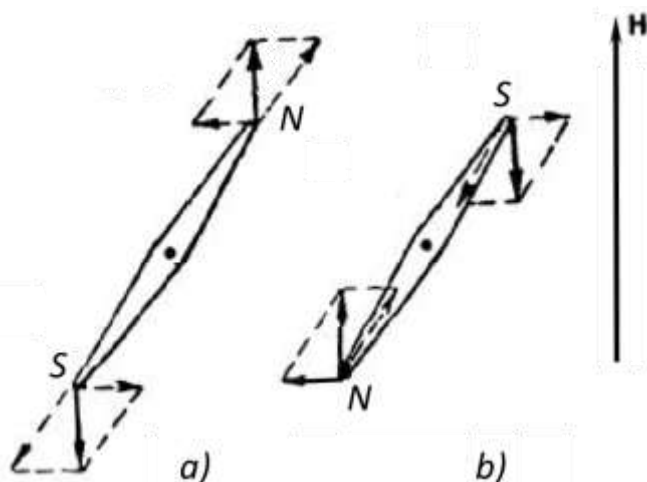
Kórinip turǵanıday, bir tekli magnit maydanında magnit strelkasına (solenoid penen toǵı bar konturǵa da) tek qos kúshler tásir etedi. Magnit strelkası maydan baǵıtında jaylasıw ushın burılıwǵa umtıladı. Eger magnit maydanı bir tekli bolmasa, onda strelkaǵa qos kúshlerden basqa toǵı bar ramkaǵa bir tekli emes maydanda tásir etetuǵın kúsh sıyaqlı onı ilgerilemeli qozǵalıwǵa májbúrleytuǵın kúsh te tásir etedi. Meyli, magnit strelkası sırtqı magnit maydanınıń kernewliginiń baǵıtına salıstırǵanda α múyeshine burılǵan bolsın (232-súwret). Ápiwayılıq ushın, maydannıń kernewligi maydannıń óziniń baǵıtına sáykes keletuǵın baǵıtta ózgeredi dep boljayıq. Meyli, strelkanıń túslik polyusı jaylasqan orındaǵı maydannıń kernewligi H qa teń bolsın; bunday jaǵdayda strelkanıń arqa polyusı jaylasqan orındaǵı maydannıń kernewligi $H' = H + \left(\frac{\Delta H}{\Delta x}\right)x$ shamasına teń boladı. Bul ańlatpada $\left(\frac{\Delta H}{\Delta x}\right)$ shaması maydannıń gradienti bolıp tabıladı. Usıǵan sáykes, strelkanıń polyuslarına tásir etetuǵın kúsh mınaǵan teń boladı:

$$f_S = mH, f_N = mH + m\left(\frac{\Delta H}{\Delta x}\right)x.$$

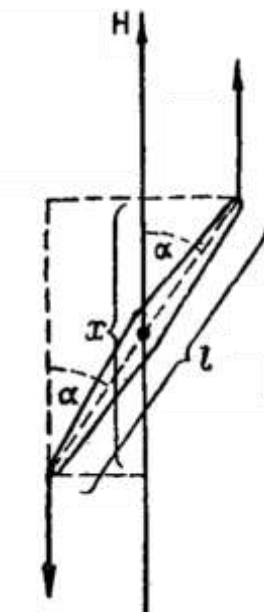
Meyli, $f_N > f_S$ teńligi orınlı bolsın. Bunday jaǵdayda strelkaǵa momenti $M = f_S l \cdot \sin \alpha = pH \sin \alpha$ shamasına teń kúshlerdiń momenti (bul ańlatpada $p = ml$ - strelkanıń magnit momenti) hám

$$\Delta f = f_N - f_S = m\left(\frac{\Delta H}{\Delta x}\right)x$$

shamasına teń kúsh tásir etedi.



231-súwret. Sırtqı magnet maydanında magnet strelkasına tásir etetuǵın kúshlerdiń jubı.



232-súwret. Bir tekli emes magnet maydanındaǵı magnet strelkasına tásir etetuǵın kúsh.

232-súwrette kórinip turǵanıday, $x = l \cos \alpha$, bunnan

$$f_s = ml \left(\frac{\Delta H}{\Delta x} \right) \cos \alpha$$

yamasa

$$\Delta f = p \left(\frac{\Delta H}{\Delta x} \right) \cos \alpha \quad (6)$$

teńliklerine iye bolamız.

Solay etip, bir tekli bolmaǵan magnet maydanında strelkaǵa onıń magnet momenti p ǵa, maydanniń gradienti bolǵan $(\Delta H / \Delta x)$ shamasına proporcional hám α múyeshiniń kosinusınan ǵárezli bolǵan kúsh tásir etedi.

Usı waqıtqa shekem alıńǵan usı paraqraftıń barlıq nátiyjeleriniń tek boslıqta jaylasqan turaqlı magnet ushın ǵana emes, al *magnitiktıń ishine jaylastırılǵan magnet ushın da durıs*. Bunday jaǵdayda barlıq formulalarda H jazılǵanda magnet jaylasqan orındaǵı *magnetiktegi magnet maydanınıń kernewligin názerde tutıw kerek*. Bul jaǵdayǵa túsiniń 209-paraqrafta beriledi.

Bir tekli bolmaǵan maydanǵa jaylastırılǵan magnetke yamasa solenoidqa tásir etetuǵın kúsh magnetlerdiń hám solenoidlardıń óz-ara tartısıwın yamasa iyterisiwın túsindiriedi. Bir tekli magnet maydanında magnet (yamasa solenoidqa) tek baǵdarlawshı tásirdi sezedi. Eger eki magnitti (yamasa solenoidtı) bir birine jaqın jaylastırsaq, onda olardıń hár qaysısı ekinshisiniń bir tekli bolmaǵan magnet maydanında jaylasadı hám usıǵan sáykes, oǵan kúshlerdiń jubınan basqa maydanniń qaysı baǵıtta úlkeyetuǵınlıǵına baylanıslı tartısıw yamasa iyterisiw kúshi de tásir etedi.

Magnittiń (yamasa solenoidtıń) temirdiń bóleklerin tartıwı usılayınsha túsindiriledi. Bul bóleksheler eń dáslep maydanda magnetlenedi, al bunnan keyin magnittiń (yamasa solenoidtıń) qasındaǵı magnet maydanınıń bir tekli emes ekenligine baylanıslı ilgerilemeli qozǵala baslaydı.

§ 206. Magnet indukciyasınıń vektorınıń sızıqları. Magnet indukciyası vektorı menen magnet kernewliginiń vektorınıń cirkulyaciyası. SHegaralıq shártler. Bizlerdiń boslıq ushın magnet maydanınıń kernewliginiń sızıqların kirgizgenimizdey, ulıwma jaǵdayda *magnet indukciyasınıń sızıqların* kirgizemiz. Magnet indukciyası sızıǵı degende hár bir noqatında júrgizilgen urınba usı noqattaǵı indukciya vektorı $\mathbf{B}$ niń baǵıtı menen sáykes keletuǵın sızıqtı túsinemiz.

Indukciya vektorınıń baǵıtına normal baǵıtlanǵan bettiń bir birliǵı arqalı san mánisi boyınsha

usı bettiń sheklerindegi magnit indukciyasına teń indukciya sızıqların ótkeremiz. Indukciya sızıqlarınıń oǵan normal bolǵan ΔS_0 elementar maydan arqalı ótetuǵın tolıq sanı usı bet arqalı ótetuǵın magnit indukciyasınıń $\Delta\Phi$ elementar aǵısını anıqlaydı:

$$\Delta\Phi = B\Delta S_0. \quad (1)$$

İqtıyarlı túrde baǵıtlanǵan ΔS elementar bet bolǵan jaǵdayda usı bet arqalı ótetuǵın indukciyanıń aǵısı $\Delta\Phi$ mınaday teńliktiń járdeminde anıqlanadı:

$$\Delta\Phi = B\Delta S \cos \alpha = B_n \Delta S. \quad (2)$$

Bul teńlikte α arqalı indukciya vektorı $\mathbf{B}$ menen ΔS betine túsirilgen normal $\mathbf{n}$ niń arasındadı múyesh, al B_n arqalı $\mathbf{B}$ niń ΔS ke normal baǵıtqa túsirilgen qurawshısı belgilengen.

(2)-qatnas boyınsha indukciyanıń $\Delta\Phi$ aǵısınıń ΔS_0 beti arqalı ótetuǵın elementar aǵısınıń shaması $\mathbf{B}$ indukciya vektorınıń sızıqları $\mathbf{n}$ normaldıń saylap alınǵan baǵıtı menen súyir yamasa doǵal α múyeshin jasaytuǵınlıǵına baylanıslı oń da teris te bolıwı múmkin. Shekli bet arqalı ótetuǵın indukciyanıń tolıq aǵısı Φ bettiń barlıq elementleri arqalı ótetuǵın elementar aǵıslardıń algebralıq summasına teń, yaǵnıy

$$\Phi = \sum \Delta\Phi = \sum B_n \Delta S. \quad (3)$$

Eger bet tuyıq bolsa, onda normaldıń oń baǵıtı sıpatında kólemnen shıǵatuǵın sırtqı normaldıń baǵıtı qabıl etiledi; demek, berilgen bet penen sheklengen kólemnen shıǵatuǵın sızıqlar oń aǵıstı, al, kólemge kiretuǵın sızıqları teris aǵıstı beredi.

Tájiriybeler magnit indukciyası sızıqlarınıń barlıq waqıtta tuyıq ekenligin kórsetedi; demek, qálegen tuyıq bet ushın indukciyanıń kiretuǵın hám shıǵatuǵın sızıqlarınıń tolıq sanı nolge teń; bunnan qálegen tuyıq bet ushın magnit indukciyasınıń tolıq aǵısınıń nolge teń bolatuǵınlıǵı alınadı:

$$\Phi = 0. \quad (4)$$

Bul elektrostatikadaǵı kólemniń ishinde zaryadlar bolmaǵan jaǵday ushın Ostrogradskiy-Gauss teoremasına uqsas (126-paragrafqa qarańız) hám hesh qanday haqıyqıy magnit zaryadlarınń joq ekenligi faktına sáykes keledi.

192-paragrafta biz boslıqtaǵı magnit maydanında barlıq waqıtta $\operatorname{div} \mathbf{H} = 0$ shártiniń orınlanatuǵınlıǵın kórsettik. Magnetikler bolǵan jaǵdayda indukciya vektorı $\mathbf{B}$ niń tuyıq bet arqalı aǵısı nolge teń:

$$\int_S B_n dS = 0.$$

Bunnan, magnit maydanınıń barlıq waqıtta

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (4a)$$

shártin qanaatlandıratuǵınlıǵı kelip shıǵadı.

Indukciya aǵısın ólshewdiń birlikleri indukciya menen bettiń maydanınıń birliklerin saylap alıwdan ǵárezli. Eger *CGSM*-sistemasın paydalansaq, yaǵnıy indukciyanı gausslarda, al bettiń maydanın kvadrat santimetrlerde ólshesek, onda aǵıs *maksvell*er dep atalatuǵın birlikte alınadı; solay etip, aǵıstıń *CGSM*-birliǵi indukciya sızıqlarına perpendikulyar qoyılǵan 1 sm^2 bet arqalı indukciyası 1 gs bolǵan teń ólshewli magnit maydanınıń indukciya sızıqlarınıń aǵısına teń.

$\mathbf{B}$ vektorınıń cirkulyaciyasın qaraymız. 198-paragrafta iqtıyarlı kontur boyınsha magnit kernewligi vektorınıń cirkulyaciyasınıń $4\pi I$ ge teń ekenligi kórsetildi, bul kóbeymede I - kontur tárepinen óziniń ishine alınatuǵın toqtıń kúshi. Magnetikte makroskopiyaq hám mikroskopiyaq toqlar tárepinen payda etiletuǵın tolıq magnit maydanınıń kernewliginiń $\mathbf{B}$ vektorı menen ańlatılatuǵınlıǵı kórsetildi. Demek, $\mathbf{B}$ vektorınıń cirkulyaciyası $4\pi(I + I_M)$ shamasına teń, bul ańlatpada I hám I_M kontur tárepinen óziniń ishine alınatuǵın makroskopiyaq hám mikroskopiyaq toqlardıń kúshlerin ańǵatadı:

$$\sum B_l \Delta l = 4\pi(I + I_M). \quad (5)$$

Molekulalıq I_M toǵın esaplaymız. Konturdıń ishinde ótetuǵın kompensaciyalanbaǵan toqtırın molekulalıq toqları konturdıń sıızqları menen kesilisetuǵın molekulalar tárepinen payda etiletuǵınlıǵı óz-ózinen túsiniqli. Konturdıń Δl elementi menen kesilisetuǵın qanday molekulalıq toqlarınıń kompensaciyalanbaytuǵın toqlardıń payda etiletuǵınlıǵın qaraymız. Molekulalıq toqlardı kúshi i ge teń bolǵan hám S shamasına teń kontur menen orap alıńǵan maydangá iye dep kóz aldımızǵa elesletemiz. Bunday molekulalıq toqqa san mánisi iS ke teń magnit momenti p_m sáykes keledi; p_m momentiniń baǵıtı konturdıń elementi Δl menen α múyeshin jasadı (233-súwret). Álbette, Δl elementi orayları ultanı S hám jasawshısı Δl ge teń bolǵan cilindrdiń ishindegi molekulalıq toqlardı ǵana kesedi. Eger n_0 - kólem birligindegi molekulalardıń sanı bolsa, onda usınday cilindrdiń ishinde molekulalıq toqlardıń $n_0 S \Delta l \cos \alpha$ dana orayı boladı. Bul molekulalıq toqlar kontur tárepinen onıń Δl uchastkasında qamtıp alınatuǵın kompensaciyalanbaytuǵın toqtı payda etedi. Δl uchastkasındaǵı kompensaciyalanbaǵın toqtırın kúshi mınaǵan teń:

$$in_0 S \Delta l \cos \alpha. \quad (6)$$

Orap alatuǵın barlıq kontur tárepinen qamtıp alınatuǵın molekulalıq toqtırın kúshi I_M di konturdıń barlıq uzınlıǵı boyınsha (6)-ańlatpanı summalaıw jolı menen alamız:

$$I_M = \sum in_0 S \cos \alpha \Delta l. \quad (7)$$

Biraq, aytılp ótilgenler boyınsha, iS shaması molekulalıq toqtırın p_m momentiniń shamasına teń. Demek, $in_0 S$ shaması kólem birliginiń momentı, yaǵnıy $\mathbf{P}_m$ magnitleniw vektorı bolıp tabıladı. Solay etip, (7)-ańlatpa boyınsha mınaǵan iye bolamız:

$$I_M = \sum \mathbf{P}_m \Delta l \cos \alpha = \sum (\mathbf{P}_m)_l \Delta l.$$

Bul ańlatpada $(\mathbf{P}_m)_l$ - magnitleniw vektorınıń Δl elementine túsirilgen proekciyası. I_M niń alıńǵan mánisin $\mathbf{B}$ vektorınıń cirkulyaciyası ushın jazılǵan (5)-ańlatpaǵa qoyıp,

$$\sum \mathbf{B}_l \Delta l = 4\pi \left[I + \sum (\mathbf{P}_m)_l \Delta l \right].$$

teńlemesin alamız. Polyarizaciya vektorınıń proekciyası bar aǵzalardı teńliktiń shep tárepinen shıǵarıp

$$\sum [\mathbf{B}_l - 4\pi(\mathbf{P}_m)_l] \Delta l = 4\pi I$$

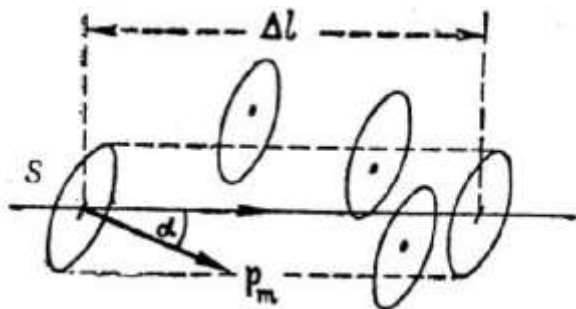
ańlatpasına iye bolamız. Joqarıda ayılǵanday, $\mathbf{B} - 4\pi\mathbf{P}_m$ shaması kernewlik vektorı bolıp tabıladı:

$$\mathbf{B} - 4\pi\mathbf{P}_m = \mathbf{H}.$$

Demek, biz magnitlik kernewlik vektorınıń cirkulyaciyası ushın mınaday ańlatpanı alamız:

$$\sum \mathbf{H}_l \Delta l = 4\pi I.$$

Solay etip, magnetik bolǵan jaǵdayda da, magnitlik kernewlik vektorınıń cirkulyaciyası kontur tárepinen qamtıp alınatuǵın *makroskopiyalıq toqtırın* shamasınıń 4π ge kóbeymesine teń; magnitlik kernewliktiń cirkulyaciyasınıń ańlatpasına molekulalıq toqtırın shaması kirmeydi.



233-súwret.

Molekulalıq toqlardıń sanın esaplawǵa.

Hár qıylı magnitlik sińirgishlikke iye bolǵan eki zattıń shegarasındaǵı indukciya sıızqlarınıń qanday qásiyetke iye bolatuǵınlıǵın qaraymız. Magnitlik sińirgishlikleri μ_1 hám μ_2 shamalarına teń bolǵan zatlardıń arasındaǵı shegaraǵa iyemiz dep boljaymız. Eger biz bólip turatuǵın shegaranıń kishi ΔS uchastkasın alsaq, onda onı tegis, al onıń eki tárepindegi maydandı bir tekli dep esaplay alamız. Magnitlik sińirgishligi μ_1 bolǵan zattaǵı magnit indukciyası vektorınıń mánisin $\mathbf{B}_1$ al magnitlik sińirgishligi μ_2 bolǵan zattaǵı magnit indukciyası vektorınıń mánisin $\mathbf{B}_2$ arqalı belgileybiz. Shegaranıń qasındaǵı noqatlardaǵı magnit indukciyası vektorı $\mathbf{B}$ nı eki qurawshıǵa jayıwǵa boladı. Olardıń biri $\mathbf{B}_n$ ayırıp turǵan shegaraǵa perpendikulyar, al ekinshisi $\mathbf{B}_t$ - shegaraǵa parallel. Bunday jaǵdayda:

$$\mathbf{B}_1 = \mathbf{B}_{1n} + \mathbf{B}_{1t}, \quad \mathbf{B}_2 = \mathbf{B}_{2n} + \mathbf{B}_{2t}.$$

Dáslep magnit indukciya vektorlarınıń shegaranıń eki tárepindegi normal qurawshılarınıń arasındaǵı baylanıstı tabamız. Onıń ushın sırtqı cilindr túrindegi tuyıq bet arqalı ótetuǵın magnit indukciyası aǵısın qaraymız (234-súwret). Bul cilindrdiń ultanları bolǵan ΔS_1 hám ΔS_2 shamaları bir birine teń hám shegaranıń ΔS uchastkasına parallel, al jasawshıları cilindrdiń berilgen bólimi jaylasqan zatlardaǵı indukciya sıızqlarına parallel bolsın. Bul cilindrdiń beti arqalı ótetuǵın tolıq aǵıs, qálegen tuyıq bet arqalı ótetuǵın tolıq aǵıstay, (4)-ańlatpa boyınsha nolge teń boladı.

Bul aǵıs eki bólimnen turadı: ΔS_1 ultanı arqalı ótetuǵın $\Delta\Phi_1$ aǵısı hám ΔS_2 ultanı arqalı ótetuǵın $\Delta\Phi_2$ aǵısınan. Qaptal beti arqalı ótetuǵın aǵıs indukciya sıızqlarına parallel bolǵanlıǵı sebepli nolge teń boladı. Demek, mınaǵan iye bolamız:

$$\Delta\Phi_1 + \Delta\Phi_2 = 0. \quad (8)$$

234-súwrette saylap alıńǵan indukciyanıń sıızqlarınıń baǵıtında $\Delta\Phi_2$ aǵısı oń, al $\Delta\Phi_1$ aǵısı teris. $\mathbf{n}$ normalın bólip turǵan shegarada birinshi zattan ekinshi zatqa qaray baǵıtlaymız. Bunday jaǵdayda ΔS_2 ultanı ushın bul baǵıt sırtqı normal bolıp tabıladı, al ΔS_1 ultanı ushın ol sırtqı normalǵa salıstırǵanda qarama-qarsı boladı. Bunnan ΔS_1 hám ΔS_2 ultanları arqalı ótetuǵın $\Delta\Phi_1$ hám $\Delta\Phi_2$ aǵısları ushın tómendegidey ańlatpalardı alamız:

$$\Delta\Phi_1 = -B_{1n}\Delta S_1, \quad \Delta\Phi_2 = B_{2n}\Delta S_2.$$

Birinshi teńliktegi minus belgisi B_{1n} shamasınıń $\mathbf{B}$ vektorınıń ΔS_1 bet elementine túsirilgen sırtqı normaldıń baǵıtına túsirilgen proekciyası bolǵanlıǵı sebepli payda bolǵan. $\Delta\Phi_1$ hám $\Delta\Phi_2$ shamaların (8)-ańlatpaǵa qoyıp hám $\Delta S_1 = \Delta S_2$ teńliginiń orınlı ekenligin ańǵarıp

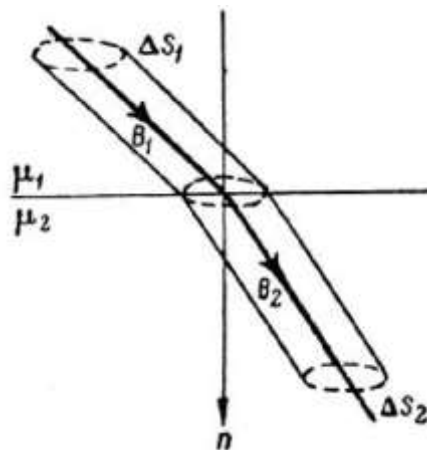
$$-B_{1n} + B_{2n} = 0$$

teńligin jaza alamız hám bunnan minaday teńlikti alamız:

$$B_{1n} = B_{2n}. \quad (9)$$

Solay etip, magnit indukciyasınıń normal qurawshısı bir zattan ekinshi zatqa ótkende ózgeriske ushıramaydı eken.

234-súwret.
 ΔS_1 hám ΔS_2 maydanları arqalı ótetuǵın
indukciya vektorınıń aǵısı.



$\mathbf{B}_1$ hám $\mathbf{B}_2$ vektorlarınıń urınba qurawshılarınıń arasındaǵı qatnastı anıqlaw ushın $\mathbf{H}$

vektorınıń cirkulyaciyası ushın arnalǵan ańlatpaǵa itibar beremiz. Cirkulyaciya alınatuǵın kontur sıpatında tuyıq $abcd$ konturın alamız (235-súwret). Konturdıń ad hám bc tárepleri zattı ayırıp turǵan shegaraǵa parallel, al ab hám dc tárepleri sheksiz kishi. Zatlardıń arasındaǵı shegarada toqlar joq dep esaplanǵanlıqtan, bul kontur boyınsha $\mathbf{H}$ vektorınıń cirkulyaciyası nolge teń. Ekinshi tárepten bul cirkulyaciyanıń eki ortalıqtaǵı $\mathbf{H}$ vektorları arqalı ańlatılıwı múmkin. $abcd$ konturın saat strelkasınıń qozǵalıw baǵıtı boyınsha aylanıp ótemiz hám bóliw shegarasına túsirilgen urınbanıń baǵıtı sıpatında shepten ońǵa qaray baǵıtta alamız (235-súwret). ab hám dc uchastkaların sheksiz kishi bolǵan edik, sonlıqtan barlıq cirkulyaciya bc hám da uchastkalarına tiyisli bolǵan aǵzalar arqalı ańlatıladı. $\mathbf{H}_1$ hám $\mathbf{H}_2$ arqalı sáykes eki zattaǵı kernewliklerdi belgilep, mınanı alamız:

$$H_{1t}bc - H_{2t}da = 0.$$

Ekinshi aǵzadaǵı minus belgisi tómengi ortalıqtaǵı aylanıp shıǵıwdıń baǵıtı urınbanıń baǵıtına qarama-qarsı ekenligi menen baylanıslı. $bc = da$ shamasına qısartıp,

$$H_{1t} = H_{2t}, \quad (10)$$

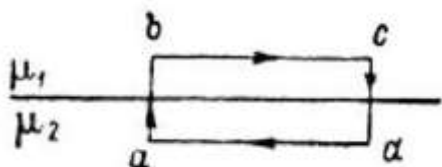
yaǵnıy, kernewlik vektorınıń urınba qurawshısınıń eki azıttıń arasındaǵı shegaradan ótkende ózgermeytuǵınlıǵın kóremiz. Magnit indukciyası vektorına ótip, $\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$ teńliginiń orın alatuǵınlıǵın eske alıp

$$H_{1t} = \frac{B_{1t}}{\mu_1}, \quad H_{2t} = \frac{B_{2t}}{\mu_2}$$

qatnaslarına iye bolamız. Bul qatnaslarda B_{1t} hám B_{2t} shamaları B_1 hám B_2 vektorlarınıń bólip turatuǵın shegaraǵa túsirilgen urınbadaǵı proekciyaları bolıp tabıladı. H_{1t} menen H_{2t} mánislerin (9) ǵa qoyıp, mınanı alamız:

$$\frac{B_{1t}}{B_{2t}} = \frac{\mu_1}{\mu_2}. \quad (11)$$

Solay etip, magnit indukciyası vektorı $\mathbf{B}$ nıń zatlardıń arasındaǵı shegaraǵa urınba baǵıttaǵı proekciyalarınıń qatnası bul zatlardıń magnitlik sińirgishlikleri bolǵan μ lardıń qatnasınday boladı.



235-súwret.

Eki magnetiktiń arasındaǵı shegaranıń qasındaǵı aylanıp shıǵıw konturı.

(9)- hám (11) qatnasları shegara arqalı ótkendegi magnit indukciyası vektorı $\mathbf{B}$ nıń ózgerisin anıqlaydı. Eger shegara indukciya sızıqlarına perpendikulyar bolmasa, onda indukciya sızıqlarınıń sınıwǵa ushıraytuǵınlıǵın ańsat kóriwge boladı. $\mathbf{B}_1$ hám $\mathbf{B}_2$ vektorların shegaraǵa parallel hám shegaraǵa perpendikulyar qurawshılardı jayıp (236-súwret), biz mınanı alamız:

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{\frac{B_{1t}}{B_{1n}}}{\frac{B_{2t}}{B_{2n}}}.$$

Bunnan, (9)- hám (11)-qatnaslardı paydalanıp

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \quad (12)$$

qatnasın tabamız, yaǵnıy indukciya vektorlarınıń eki zattaǵı normallardı salıstırǵandaǵı qıyalıq múyeshleriniń tangensleriniń qatnası zatlardıń magnitlik sińirgishleriniń qatnasınday boladı eken. Magnit sińirgishligi μ kishi bolǵan zattan magnit sińirgishligi úlken bolǵan zatqa ótkende indukciya sızıqları perpendikulyardan awısadı hám qoyıwlanadı, yaǵnıy, olardı normal bolǵan tegislikte bir birigindegi sanı úlkeyedi. Eger bólip turatuǵın bet bir zattaǵı indukciya sızıqlarına perpendikulyar bolsa, onda sızıqları basqa zatqa sınıwsız ótedi. $B_{1t} = 0$ hám $B_{2t} = 0$ teńliklerin orınlı

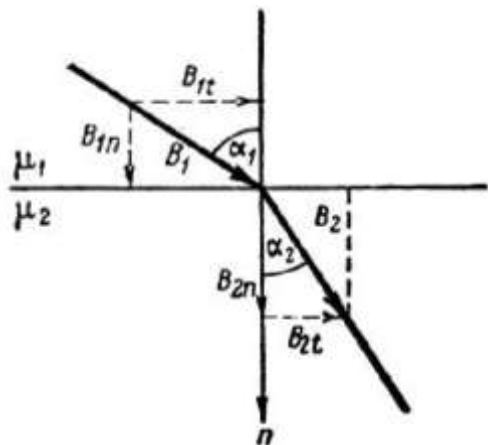
bolğanlıqtan, bul jaǵdayda indukciya vektorları ózleriniń normal baǵıttaǵı qurawshıları boyınsha bir birine teń boladı:

$$B_1 = B_{1n}, B_2 = B_{2n}.$$

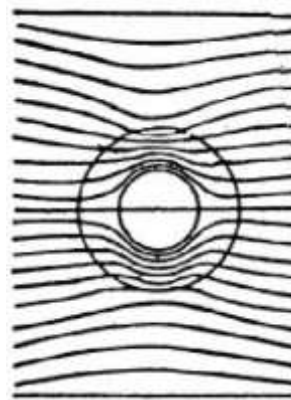
Usınıń menen birge (9)-shártten

$$B_1 = B_2$$

teńligine iye bolamız, yaǵnıy, bul jaǵdayda eki zattıń shegarası arqalı ótkende indukciya vektorı ózgeriske ushıramaydı. Bul qatnastı biz 203-paragrafta paydalanǵan edik.



236-súwret. Eki magnetiktıń arasındaǵı shegaradaǵı **B** magnet indukciyası vektorınıń sızıqlarınıń sınırı.



237-súwret. Ishinde quwıslıq bar denedegi magnet indukciyası sızıqlarınıń jaylasıwı.

Indukciya sızıqlarınıń sınırıw nızamına *magnitlik qorǵaw* dep atalatuǵın qubılıs tiykarlanǵan. Magnitlik qorǵaw mınaday jaǵdaydan júzege keledi: indukciya sızıqlarınıń sınırıwına baylanıslı úlken magnet sińirgishlikke iye bolǵan zattıń ishindegi magnet maydanı nolge jaqın boladı. 237-súwrette ishinde quwıslıǵı bar úlken magnet sińirgishlik μ ge iye zattaǵı indukciya sızıqlarınıń jaylasıwına misal keltirilgen. Quwıslıqtıń ishindegi indukciya sızıqlarınıń siyrek jaylasıwı sol orındaǵı magnet maydanınıń hálisiz ekenligin bildiredi. Ámelge magnitlik qorǵaw ushın úlken massaǵa iye temir qaplar paydalanıladı.

§ 207. Elektrostatikalıq hám magnet maydanlarınń arasındaǵı analogiya. Tariyxıy jaqtan magnetizm haqqındaǵı tálimat turaqlı magnetler haqqındaǵı tálimat sıpatında payda boldı. Saqlanıp kelgen arızlar boyınsha, sharwalar Kishi Aziyadaǵı áyyemgi Magneziya qalasınıń qasında tabılatuǵın temir rudasınıń bólekleriniń bir birine tartılatuǵınlıǵın ańǵarǵan. Magneziya qalasınıń atamasınan magnet sózi kelip shıqqan. Magnitlengen temir rudası (Fe_3O_4) sezilerliktey qaldıq magnitlengenlikke iye hám, sonlıqtan, turaqlı magnetler bolıp tabıladı.

XVII ásirdiń aqırında Kulon noqatlıq elektr zaryadlarınıń arasındaǵı óz-ara tásirlesiw nızamın tapqannan keyin magnetlerdiń arasındaǵı tap sonday tásirlesiw nızamın tabıwǵa tırısqa. Ol haqıyqatında da mınaday jaǵdaydıń orın alatuǵınlıǵın tapqa: eger eki juqa hám uzın magnitti alsa, onda polyuslardıń arasındaǵı qashıqlıq magnetlerdiń uzınlıǵınan kishi hám olardıń keskesiminen úlken bolǵanda olardıń polyuslarınıń arasındaǵı óz-ara tásirlesiw kúshiniń olardıń arasındaǵı qashıqlıqtıń kvadratına kerı proporcional ekenligin taptı. Kulon "magnetizmniń muǵdarı" túsiniǵin kirgizdi, usıǵan baylanıslı bunnan keyingi magnet maydanı haqqındaǵı tálimat elektrostatikalıq maydan haqqındaǵı tálimatqa usaǵan halda rawajlandı. Bul analogiya elektrostatikalıq hám magnetlik maydanlardı táriyipleytuǵın shamalardıń atamalarınń kelip shıǵıwında anıqlawshı áhmiyetke iye boladı: biz elektr maydanınıń kernewligi E hám elektrostatikalıq indukciya D , magnet maydanınıń kernewligi H hám magnet indukciyası B haqqında gáp etemiz. Biraq, bul analogiyalar elektrostatikalıq hám magnet maydanlardıń

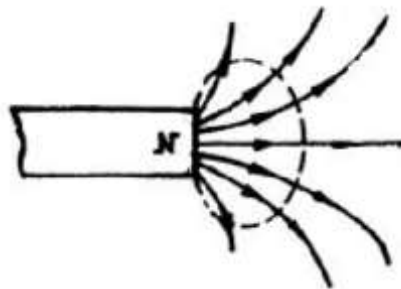
tábiyatına barlıq waqıtta durıs sáykes kele bermeytuǵın bolıp shıqtı.

Biz elektrostatikalıq hám magnit qubılıslarınıń arasında tereń ayırmanıń bar ekenligin kórdik. Elektr zaryadları bar; elektrostatikalıq maydannıń kernewlik sızıqları bir zaryadlarda baslanadı hám ekinshi zaryadlarda tamam boladı yamasa sheksizlikke ketedi. Magnit maydanı bolsa elektr toqlarınıń qasında payda boladı, magnitlik kernewlik sızıqları toqtı iymeklikler túrinde orap aladı yamasa sheksizlikke ketedi; tábiyatta hesh qanday magnit zaryadları joq. Solenoidtıń yamasa tuwrı turaqlı magnittiń magnit maydanı menen (solenoidqa yamasa magnitke qatnası boyınsha sırtqı keńisliktiń oblastında) elektr dipoliniń arasında analogıyanı júrgiziwge boladı.

Bir biri menen tásirlesetuǵın deneler arasındaǵı kúshlerdiń qashılıqtıń kvadratına kerı proporcionallıq nızamı (Kulon nızamı) kernewlik sızıqları bir tekli radiallıq tarqalatuǵın maydanǵa sáykes keledi. Elektr zaryadları menen zaryadlangan deneler, usı denelerdiń ólshemlerinen úlken bolǵan qashılıqlarda kernewlik sızıqlarınıń tap usınday tarqalıwın beredi (16-súwretke qarańız); usı jaǵdayǵa baylanıslı zaryadlangan denelerdiń arasındaǵı óz-ara tásirlesiw kúshleri Kulon nızamı menen júdá dál ańǵartıladı (eger olardıń ólshemleri arasındaǵı qashılıqtan kishi bolsa). Toqlar menen turaqlı magnitlerdiń hesh bir kombinaciyası magnit kernewligi radiallıq teń ólshewli tarqalǵan magnit maydanın bere almaydı. Uzun hám jıńışke magnittiń polyusınıń qasındaǵı sheklengen oblastta ǵana kernewlik sızıqları radiallıq baǵıtlar boylap jayıladı (238-súwret). Usı jaǵdayǵa sáykes, sonıń menen biziń házir ǵana kórsetkenimizdey, magnit polyuslarınıń óz-ara tásirlesiwı ushın Kulon nızamı júdá sheklengen mániske iye boladı.

238-súwret.

Tuwrı hám uzun magnittiń ushınıń qasındaǵı magnitlik kernewlik sızıqları.



Elektrostatikalıq maydan haqqındaǵı tálimatta elektrostatikalıq maydannıń boslıqtaǵı kernewligi $\mathbf{E}$ haqqında gáp etkende biz q zaryadına tásir etetuǵın kúshti názerde tuttıq:

$$\mathbf{f} = q\mathbf{E}. \quad (1)$$

Dielektrik qatnasqan jaǵdayda onıń polarizaciyasınıń tásirinde qosımsha $\mathbf{E}'$ maydanı payda boladı hám sonlıqtan mınaday teńlikti jaza alamız:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}'. \quad (2)$$

Bul teńlikte $\mathbf{E}_0$ - berilgen ("erkin") zaryadlar payda etken maydannıń kernewligi. Elektrostatikalıq indukciya $\mathbf{D}$ haqqında gáp etilgende biz berilgen noqattaǵı maydannıń kernewligi $\mathbf{E}$ menen

$$\mathbf{D} = \varepsilon\mathbf{E}. \quad (3)$$

qatnası boyınsha baylanısqan shamanı túsindik. Polarizaciyalangan dielektriktiń halın biz polarizaciya vektorı menen anıqladıq⁵⁰:

$$\mathbf{P}_e = \chi_e \mathbf{E}. \quad (4)$$

Polarizaciya koefficienti χ_e dielektriklik turaqlı ε menen $\varepsilon = 1 + 4\pi\chi_e$ qatnası túrinde baylanısqan; usı qatnastıń tiykarında (3)- hám (4)-formulalardan

$$\mathbf{D} = \mathbf{E} + 4\pi\mathbf{P}_e \quad (5)$$

teńligin alamız. Maydan menen iyelengen keńislikti toltırıp turǵan bir tekli dielektrik bolǵan jaǵdayda barlıq dielektrikler ushın qosımsha maydannıń kernewligi $\mathbf{E}_0$ vektorına qarama-qarsı

⁵⁰ Sáykes elektrlik hám magnitlik shamalardı bir birinen ayırıw ushın biz e hám m indekslerin paydalandıq.

bağıtlangan hám

$$\mathbf{E}' = -4\pi\mathbf{P}_e \quad (6)$$

teńligin qanaatlandıradı.

Bul jaǵdayda (2)- hám (5)-formulalardı salıstırwdan: $\mathbf{D} = \mathbf{E}_0$ ekenligin, yaǵnıy bir tekli dielektrik maydan bar bolǵan keńislikti tutası menen toltırıp turǵanda elektrostatikalıq indukciya vektory $\mathbf{D}$ nıń boslıqtaǵı erkin zaryadlar payda etken maydannıń kernewligi $\mathbf{E}_0$ ge sáykes keletuǵınlıǵın kóremiz. Ulıwma jaǵdayda bunday sáykes keliw orın almaydı (ayırıqsha simmetriyalı jaǵdaydan basqa jaǵdaylarda; 142-paragraftaǵı snoskaǵa qarańız).

Al magnitlik qubılıslar oblastında (196-paragrafta ayılǵanlarǵa qarańız), biz boslıqtaǵı toq elementine tásir etetuǵın kúshtiń

$$\Delta f = H_0 I \Delta l \sin \alpha \quad (1a)$$

shamasına teń bolatuǵınlıǵın kórdik. Bul teńlikte H_0 - boslıqtaǵı magnit maydanınıń kernewligi. Magnetik bolǵan jaǵdayda tolıq kernewlik (onı magnit indukciyası $\mathbf{B}$ dep ataydı) ótkizgishler arqalı ótetuǵın toqlar tárepinen payda etilgen $\mathbf{H}_0$ kernewligi menen magnetiktiń magnitleniwiniń saldarınan payda bolǵan qosımsha $\mathbf{H}'$ kernewliginiń qosındısınan turadı:

$$\mathbf{B} = \mathbf{H}_0 + \mathbf{H}' \quad (2a)$$

Magnetiktegi magnit maydanınıń kernewligi $\mathbf{H}$ haqqında gáp etilgende biz berilgen noqatta magnit indukciyası $\mathbf{B}$ menen bılayınsha baylanısqa shamasın túsinemiz:

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu} \mathbf{B}. \quad (3a)$$

Magnetiktiń halı magnitleniw vektory menen táriyiplenedi:

$$\mathbf{P}_m = \chi_m \mathbf{H} = \frac{\chi_m}{\mu} \mathbf{B}. \quad (4a)$$

Magnitleniw koefficienti χ_m magnit sińirgishligi μ menen $\mu = 1 + 4\pi\chi_m$ qatnası boyınsha baylanısqa. Usı qatnastıń tiykarında (2a) hám (4a) formulalarınan mınaday teńlikke iye bolamız:

$$\mathbf{H} = \mathbf{B} - 4\pi\mathbf{P}_m. \quad (5a)$$

Maydan bar bolǵan keńislikti tolıǵı menen toltırıp turǵan bir tekli magnetik bar bolǵan jaǵdayda qosımsha maydannıń kernewligi bolǵan $\mathbf{H}'$ vektorınıń baǵıtı $\mathbf{H}_0$ vektorınıń baǵıtına qarama-qarsı (diamagnet deneler), $\mathbf{H}_0$ vektorınıń baǵıtına parallel (paramagnet deneler) bolıwı da múmkin. Eki jaǵdayda da mınaday teńlik orınlı boladı (202-paragraf):

$$\mathbf{H}' = 4\pi\mathbf{P}_m. \quad (6a)$$

Bul jaǵdayda (2a) hám (5a) formulaların salıstırıp $\mathbf{H} = \mathbf{H}_0$ teńligine iye bolamız. Biraq, mına jaǵdaydı názerde tutıw kerek: *magnetiktegi magnit maydanınıń kernewligi $\mathbf{H} = 1/\mu\mathbf{B}$ tıń boslıqtaǵı ótkizgishler arqalı ótetuǵın toqlar payda etken maydannıń kernewligi $\mathbf{H}_0$ menen sáykes keliwı tek bir jaǵdayda - maydan menen iyelengen keńislikti bir tekli magnetik tolıǵı menen toltırıp turǵan jaǵdayda ǵana orın aladı.*

Bunday sáykes keliw bir tekli bolmaǵan magnetik bolǵan ulıwma jaǵdayda orın almaydı. Haqıyqatında da, bir tekli bolmaǵan magnetiktegi magnit maydanınıń kernewligi $\mathbf{H}$ ótkizgishler arqalı ótetuǵın toqlar payda etken hám Bio-Savar-Laplas nızamı boyınsha tabılatuǵın $\mathbf{H}_0$ kernewligine teń emes. 206-paragrafta biz eki magnittiń arasındǵı shegarada indukciya vektory $\mathbf{B}$ nıń normal qurawshısınıń [(6)-formulaǵa qarańız]

$$B_{1n} = B_{2n}$$

shártin qanaatlandıratuǵınlıǵın kórdik. (3a) formulası menen ańlatılatuǵın $\mathbf{B}$ hám $\mathbf{H}$ vektorlarınń arasındǵı qatnastı paydalanıp, mınanı alamız:

$$\frac{H_{1n}}{H_{2n}} = \frac{\mu_2}{\mu_1}.$$

YAǵnıy, *eki magnetikti ayırıp turǵan shegarada magnitlik kernewliktiń normal qurawshısı H_n úziliske túsedı*; usı ózgesheligi boyınsha $\mathbf{H}$ kernewligi $\mathbf{H}_0$ den ózgeshelikke iye ($\mathbf{H}_0$ sıızıqları barlıq orınlarda úziksiz ótedi). Sonıń menen birge bir tekli bolmaǵan, qásiyeti bir noqattan ekinshisine

ótkende ózgeretuǵın magnetikte magnetiktıń bir tekli emes bolǵanlıǵına baylanıslı **H** tıń ózgeriwi orın aladı.

(2)- hám (2a) formulaların salıstırıwdan mınaday jaǵday kelip shıǵadı: **B** *magnit indukciyası elektr maydanınıń kernewligi E ge uqsas*. Ayırma sonnan ibarat, **H'** magnit maydanınıń **H**₀ ge qarama-qarsı baǵıtlanǵan bolıwı da (diamagnitlik deneler), **H**₀ menen baǵıtlas bolıwı da (paramagnitlik deneler) múmkin, bunnan magnit indukciyası **B** nıń **H**₀ den kishi de, úlken de bolıwı múmkin.

Magnetiktegi *magnit maydanınıń kernewligi H elektrostatalıq indukciya D ǵa uqsas*. Bul (3)-, (5)- hám (Za), (5a) formulaların salıstırıwdan kelip shıǵadı. Sol formulalardı salıstırıwdan magnit sińirgishlikke keri bolǵan $1/\mu$ shamasınıń dielektriklik turaqlı ϵ ge uqsas ekenligin kóriwge boladı. (4)- hám (4a) formulalardı salıstırıw χ_m/μ qatnasınıń χ_e ge uqsas ekenligin kórsetedi. Biz jáne elektrostatalıq indukciya vektorı **D** nıń maydan tárepinen iyelengen keńislikti tutası menen toltırıp turatuǵın tek bir ǵana dielektrik bolǵan jaǵdayda erkin zaryadlardıń payda etken elektrostatalıq maydanınıń kernewligi **E**₀ ge sáykes keletuǵınlıǵın kórdik; ulıwma jaǵdayda **D** vektorı **E**₀ vektorınan ózgeshe; demek, bul jaǵdayda da **D** vektorı **H** vektorına usaydı.

Dielektrikler diamagnit zatlarǵa usaydı. Zatlardıń basım kópshiligi ushın dielektriklik turaqlı ϵ nıń mánisi **E** den ǵárezsiz. Usıǵan sáykes elektrostatikada kópshilik deneler gistereziske hám qaldıq elektrostatalıq polyarizaciyaǵa iye bolmaydı. Tek ǵana segnet duzı menen titanniń ayırım duzları bunday dielektriklerdiń qatarına kirmeydi (146-paragrafqa qarańız). Olar gistereziske hám qaldıq elektrizaciyaǵa (polyarizaciyaǵa, *Awdarıwshılar*) iye hám bunday qásiyetleri boyınsha ferromagnit zatlarǵa usaydı⁵¹.

§ 208. Toǵı bar ramkaǵa tásir etetuǵın kúshler boyınsha H hám B vektoraların anıqlaw. 200-paragrafta bizler magnetikke kirgizilgen ótkizgish simlarǵa tásir etetuǵın kúshler boyınsha **B** vektorın anıqlawdıń qıyın ekenligin kórsettik. Qattı magnetiktıń ishinde quwıslıqtı soǵıw kerek; bul quwıslıqqa ramkanı jaylastırıp, onıń ishindegi magnit maydanınıń kernewligin anıqlawǵa boladı. Bul kernewliktiń shaması basqa barlıq sharayatlar birdey bolǵanda quwıslıqtıń forması menen ólshemlerinen ǵárezli boladı.

Endi quwıslıqtıń sonday forması menen ólshemlerin saylap alıwǵa bolatuǵınlıǵın hám bunday jaǵdaylarda ólshengen kernewliktiń shamasınıń magnetiktıń ishindegi noqatlarda **H** shamasına yamasa **B** shamasına teń bolatuǵınlıǵın kórsetemiz. Quwıslıqtıń ishinde usı quwıslıqqa salıstırǵanda sırtqı bolıp esaplanatuǵın magnetiktıń bólimi maydanniń qosımsha kernewligi **H''** tı payda etedi. Usınıń saldarınan ramkaǵa tásir quwıslıqtıń ishindegi

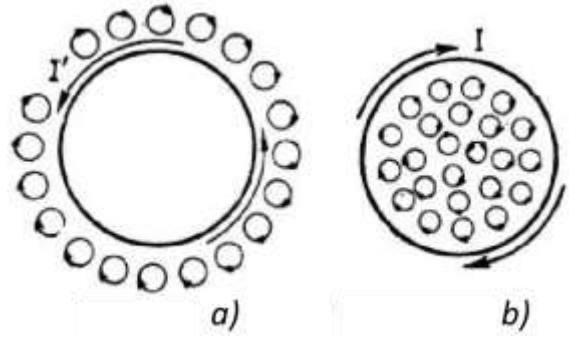
$$\mathbf{H}_{tot} = \mathbf{B} + \mathbf{H}'' \quad (1)$$

shamasına teń maydanniń kernewligi **H**_{tot} boyınsha anıqlanadı.

H'' shaması quwıslıqtıń ólshemleri menen formasınan ǵárezli boladı.

⁵¹ Bunday kristallıq deneler *segnetoelektrikler* dep atalatuǵın dielektrikler menen yarım ótkizgishlerdiń ayırıqsha toparın payda etedi. Segnetoelektrik dep temperaturanıń belgili bolǵan intervalındaǵı spontan polyarizaciyanıń payda bolıwına aytadı. Polyarizacialanǵan oblastlar sırttan túsirilgen elektr maydanınıń tásirinde baǵıtın ózgerter aladı. Usınday qubılıs orın alatuǵın kristallardı segnetoelektrikler dep ataydı (Evropa menen Amerikadaǵı kóp ellerde "ferroelektrikler" ataması jiyi qollanıladı). Segnetoelektrikler menen birge kristallardıń piroelektrikler dep atalatuǵın jáne bir ayırıqsha toparı bar. Segnetoelektrikler piroelektriklerden bazı bir temperaturada (bunday temperaturanı *Kyuridiń dielektriklik noqatı* dep ataydı) kristallıq modifikacyasınıń ózgeretuǵınlıǵı hám usınıń nátiyjesinde spontan polyarizaciyanıń joǵalıwı menen ayrıldı. Házirgi waqıtları segnetoelektrikler menen piroelektrik qásiyetlerge iye bolǵan júdá kóp sanlı kristallar belgili (*Awdarıwshılar*).

239-súwret.
Quwıslıqtıń betindegi molekulalıq toqlardı
qosıw.



Magnetiktiń ishinde jıńışke uzın cilindr túrindegi quwıslıqtı payda etemiz, onıń kósheri **B** vektorına parallel bolsın. Magnetiktiń magnitleniwin molekulalıq toqlardıń birdey baǵıtınıń (orientaciyasınıń) saldarınan payda bolǵan dep esaplaymız. Bunday jaǵdayda quwıslıqtıń shegarasında (239a súwret) kompensaciyalanbaǵan I' toǵı payda boladı. Eger elementar toqlar saat strelkasınıń qozǵalıw baǵıtında júretuǵın bolsa, onda I' toǵı saat strelkasınıń qozǵalıw baǵıtına qarama-qarsı baǵıtlanǵan. Álbette, bul I' toǵı shaması boyınsha magnetiktiń bóleginiń betindegi elementar toqlardıń qosılıwınan payda bolatuǵın hám ólshemleri menen forması boyınsha quwıslıqtıń ólshemleri menen formasına sáykes keletuǵın I toǵınıń shamasına teń hám baǵıtı boyınsha qarama-qarsı (139 b súwret). 202-paragrafta bunday I toǵınıń ózi orap alatuǵın magnetiktiń bóleginiń ishindegi maydanniń mınaday kernewligin payda etetuǵınlıǵı kórsetildi:

$$H' = 4\pi I = 4\pi P_m.$$

Bul teńlikte P_m - magnitleniw vektorınıń san mánisi (Qatań túrde aytqanda, bul formula tek sheksiz uzın cilindr ushın ǵana durıs. Uzunlıǵı shekli bolǵan cilindr ushın onıń ortasında quwıslıqtıń betindegi toqlardıń radiusı uzunlıǵına salıstırǵanda qanshama kishi bolsa, sonshama dál orınlanadı). I' toǵı I toǵına qarama-qarsı baǵıtlanǵan, usıǵan baylanıslı ol quwıslıqtıń ishinde mınaday kernewlikti payda etedi:

$$H'' = -H' = -4\pi P_m.$$

Bunnan, (1)-formula boyınsha kórsetilgen formaǵa iye quwıslıqtıń ishindegi maydanniń kernewligi mınaǵan teń:

$$H_{tot} = B + H'' = B - 4\pi P_m$$

yamasa 207-paragraftaǵı (5a) boyınsha

$$H_{tot} = H$$

teńligine iye bolamız. Demek, quwıslıqtıń ishindegi kósheri **B** vektorına parallel jıńışke, uzın cilindr tárizli quwıslıqtıń orta bólimindegi maydanniń kernewliginiń 207-paragraftaǵı (3a) teńligi menen anıqlanatuǵın **H** kernewligine teń ekenligin alamız.

Eger usınday quwıslıqtıń ishine ramkanı ornalastırsaq, onda oǵan tásir etetuǵın kúshlerdiń momenti **H** tı ólshewge múmkinshilik beredi.

Eger quwıslıqtı ultanı **B** vektorınıń baǵıtına perpendikulyar bolǵan keń qısqa cilindr tárizli etip soqsaq, onda usınday quwıslıqtıń orta bóliminde I' toǵı oǵada kishi bolǵan maydandı payda etedi: $H'' \cong 0$; demek, bunday quwıslıqtıń ishinde:

$$H_{tot} = B.$$

Solay etip, kósheri **B** vektorına parallel bolǵan qısqa, keń cilindr tárizli cilindrdiń orta bólimindegi maydanniń kernewligi magnetiktegi indukciya vektorı **B** ǵa teń boladı eken.

145-paragrafta biz dielektriktiń ishinde payda etilgen jıńışke uzın formaǵa iye bolǵan hám jasawshıları kernewlik sıızqlarına parallel bolǵan quwıslıqtıń orta bólimindegi elektrostatikalıq maydanniń kernewliginiń dielektriktegi maydanniń kernewligi **E** menen sáykes keletuǵınlıǵın kórgen edik.

Eger dielektriktiń ishinde ultanı kernewlik sıızqlarına perpendikulyar bolǵan qısqa cilindr tárizli quwıslıqtı payda etsek, onda usınday quwıslıqtıń orta bólimindegi maydanniń kernewligi

dielektriktegi elektrostatikaliq indukciya $\mathbf{D}$ nıń mánisine sáykes keledi. Bul juwmaqtıń biziń $\mathbf{H}$ vektorı $\mathbf{E}$ vektorına, al $\mathbf{B}$ vektorı $\mathbf{D}$ vektorına usáǵan degen juwmaǵımızǵa qayshı keletuǵınday bolıp kórinedi. Biraq, bul onday emes. Dielektrik bolǵan jaǵdayda uzın jıńışke cilindrdiń ishindegi maydannıń kernewligi $\mathbf{E}$ ge sáykes keledi, sebebi quwıslıqtıń betinde payda bolatuǵın qosımsha betlik σ' quwıslıqtıń ishindegi noqatlar ushın sezilerliktey tásir jasay almaydı. Al magnetik bolǵan jaǵdayda bolsa, quwıslıqtıń betinde payda bolatuǵın qosımsha I' toqları qısqa hám keń cilindr ushın hesh qanday áhmiyetke iye emes. Bunday jaǵdayda maydannıń kernewligi $\mathbf{B}$ ǵa sáykes keledi. Solay etip, $\mathbf{E}$ niń $\mathbf{B}$ ǵa uqsas bolatuǵınlıǵın jáne alınadı. Sonıń menen birge mına jaǵdaydı da esapqa alıw kerek: dielektrik bolǵan jaǵdayda qısqa hám keń cilindr túrindegi quwıslıqtaǵı qosımsha betlik zaryadlar sezilerliktey áhmiyetke iye, al magnetikte bolsa qosımsha toqlar jıńışke hám uzın cilindr formasına iye quwıslıqta sezilerliktey orındı iyeleydi. Bunnan, joqarıda ayılǵanlarǵa sáykes, $\mathbf{D}$ vektorın $\mathbf{H}$ vektorı menen salıstırıw kerek.

Eń aqırında magnitlik indukciya vektorı $\mathbf{B}$ nıń mánisin basqa usıldıń járdeminde, atap aytqanda zatlardıń makroskopiyaalıq strukturasını qarawǵa ótiw arqalı anıqlawdıń múmkin ekenligin kórsetemiz.

$\mathbf{B}$ vektorın toq ótip turǵan qanday da bir makroskopiyaalıq ótkizgishke tásiroi boyınsha anıqlawǵa tırıswdıń ornına, biz qanday da bir zaryadlangan elementar bóleksheniń qozǵalısinan payda bolǵan elementar toqqa tásir boyınsha anıqlay alamız. Mısalı, belgili bir atomda dóńgelek orbita boyınsha qozǵalatuǵın elektrondı qaray alamız. Bunday qozǵalatuǵın elektron dóńgelek toqqa ekvivalent hám ol sırtqı magnit maydanınıń tásirine ushıraydı. Usınday elementar toqtıń járdeminde anıqlanǵan maydannıń kernewligi makroskopiyaalıq ótkizgishler boyınsha ótip turǵan toqlar payda etken $\mathbf{H}_0$ kernewliginen hám qońsılas molekularlar tárepinen payda etilgen magnit maydanınıń kernewliginiń qosındısınan turadı. Bul qosındı maydannıń kernewligin $\mathbf{H}_{mikro}$ arqalı belgileymiz. Biziń elementar toǵımızdıń anıw yamasa mınaw molekuladan qanday qashıqlıqtan jaylasqanlıǵına baylanıslı $\mathbf{H}_{mikro}$ nıń hár qıylı mánisleri alınadı. Biraq, $\mathbf{H}_{mikro}$ shaması kóp sanlı tosınnan saylap alınǵan noqatlar ushın $\mathbf{H}_0$ shamasınıń mánisi hám magnetiktiń ishinde onıń bóleksheleriniń tártiplesken orientaciyası menen baylanıslı bolǵan qosımsha $\mathbf{H}'$ maydanı boyınsha anıqlanadı. Solay etip,

$$\bar{\mathbf{H}}_{mikro} = \mathbf{H}_0 + \mathbf{H}',$$

yaǵnıy $\bar{\mathbf{H}}_{mikro}$ shamasınıń mánisi indukciya vektorı $\mathbf{B}$ nıń mánisine sáykes keledi.

§ 209. Solenoid penen magnittiń arasındaqı ayırma. Bunnan aldınǵı paragrafta kórsetilgen $\mathbf{N}$ hám $\mathbf{B}$ vektorlarınıń arasındaqı ayırmalar solenoidlar menen magnitlerdiń óz-ara tásirlesiwinde anıq túrde kórinedi.

Solenoidtı qanday da bir magnetikke jaylastırǵanda, bul magnetik solenoidtıń ishindegi keńislikti de, solenoidtıń sırtındaǵı keńislikti de toltıradı. Solenoidtı payda etetuǵın simlar magnetikke batırılǵan. Eger magnetik bir tekli hám sheksiz bolsa, onda sırtqı magnit maydanı tárepinen simnıń hár bir elementine 200-paragraftaǵı (2a) formulası boyınsha

$$\Delta f = IB \sin \alpha \cdot \Delta l$$

kúshi tásir etedi. Solenoidqa tásir etetuǵın kúshlerdiń momenti magnit indukciyasınıń shaması boyınsha $B = \mu H$ teńliginiń tiykarında anıqlanadı. Bul teńlikte μ - ortalıqtıń magnitlik sińirgishligi. Magnit maydanın payda etetuǵın toqlardıń shaması ózgerissiz qalǵanda, keńislikti bir tekli sheksiz magnetik penen toltırıw solenoidqa tásir etetuǵın kúshlerdiń momentin μ ese úlkeytedi.

Magnit bolǵan jaǵdaydaǵı awhal basqasha boladı. Magnit qattı dene bolıp tabıladı hám keńisliktiń usı magnit iyelep turǵan bólimin sol waqıtta basqa magnit iyeley almaydı. Basqa sózler menen aytqanda, magnit barlıq waqıtta magnetiktiń ishindegi quwıslıqta jaylastırılǵan boladı. Sonlıqtan, bul quwıslıqtıń iyeleytuǵın ornın esapqa alıw zárúr.

Magnitke quwıslıqtıń ishinde payda bolatuǵın maydan tásir etedi. Meyli uzın hám tuwrı magnit bazı bir toqlar tárepinen payda etilgen magnit maydanında, onıń kernewlik sızıqların parallel etip jaylastırılǵan bolsın. Bizler 208-paragrafta bunday quwıslıqtıń ishindegi maydannıń

kernevliginin H qa teń ekenligin kórdik. Usınıń saldarınan, magnit maydanı tárepinen tuwrı jáne uzın magnitke maydanniń kernewligi H tárepinen anıqlanatuǵın kúsh tásir etedi. Demek, magnetiktin bolıwı magnitke tásir etetuǵın kúshti ózgertpeydi. 205-paragrafta m magnit polyusına tásir etetuǵın kúshtiń

$$f = mH$$

shamasına teń ekenligin kórdik. Endi tuwrı hám uzın magnitti qarap atırǵan jaǵdayda bul formulaniń boslıq ushın da, magnetik bolǵan jaǵdayda da durıs ekenligin kóremiz.

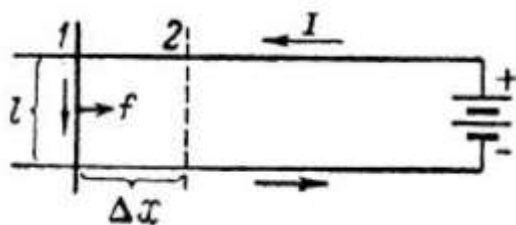
Eger magnit momentleri teń bolsa, onda boslıqta uzın magnit penen solenoid bir birine ekvivalent. Biraq magnetik bolǵan jaǵdayda magnit penen solenoidtin arasındagı ayırma kórinedi. Hakiyatında da, eger biz eki solenoidqa iye bolsaq hám boslıqtaǵı olardıń arasındagı óz-ara tásirlesiw kúshiniń shaması f bolsa, onda keńislikti magnetik penen toltırǵanda tásirlesiw kúshiniń shaması μf ke teń boladı. Eger biz solenoid penen tuwrı hám uzın magnittiń óz-ara tásirlesiwın qaraytuǵın bolsaq, onda olardıń arasındagı óz-ara tásirlesiw kúshi keńislikti magnetik penen toltırǵanda da tap burındıday bolıp qala beredi. Solay etip, bir solenoidtı magnit penen almasırw kúshti μ ese kishireytedi. Eger biz eki solenoidtı da magnetler menen almasıratuǵın bolsaq, onda magnetikte eki quwıslıqtıń bar bolatuǵınlıǵın esapqa alıw zárúr boladı. Bunday jaǵdayda eki tuwrı hám uzın magnetlerdin arasındagı óz-ara tásirlesiw kúshiniń shaması jáne μ ese kemeyedi eken. Solay etip, eger eki tuwrı hám uzın magnit boslıqtan bir biri menen f kúshi menen tásirlesetuǵın bolsa, onda keńislikti magnit sińirgishligi μ ge teń bolǵan magnetik penen toltırǵanda olardıń arasındagı óz-ara tásirlesiw kúshi $\frac{1}{\mu}f$ shamasına teń boladı.

Joqarıda ayılǵanlardı juwmaqlap, mınalardı alamız:

- 1) toqlardıń arasındagı óz-ara tásirlesiw kúshi μ ge tuwrı proporcional;
- 2) tuwrı hám uzın magnit penen toqtıń arasındagı óz-ara tásirlesiw kúshi μ den ǵárezli emes;
- 3) tuwrı hám uzın magnetlerdin arasındagı óz-ara tásirlesiw kúshi μ ge keri proporcional.

Turaqlı magnetler ushın joqarıda kórsetilgen óz-ara tásirlesiw kúshleriniń μ den ǵárezligi tek tuwrı hám uzın bolǵan magnetler ushın ǵana durıs. Iqtıyarlı formaǵa iye bolǵan magnetler ushın kúshlerdin magnit batırılǵan magnetiktin magnit sińirgishligi μ menen hesh qanday ápiwayı ǵárezligin kórsetiwge bolmaydı. Sebebi, joqarıda kórsetilip ótilgendeı, magnetiktin tutqan ornı usı magnetiktin ishinde magnit payda etken quwıslıqtıń formasınan ǵárezli boladı.

§ 210. Magnit maydanında toǵı bar konturdı jılastarǵanda islengen jumıs. 200-paragrafta magnit maydanında turǵan toqtıń elementine $\Delta f = B I \Delta l \sin \alpha$ kúshiniń tásir etetuǵını haqqında ayılǵan edi. Onıń baǵıtı shep qol qaǵıydasınıń járdeminde anıqlanadı. Bunnan, magnit maydanında toǵı bar uchastkanı jılastırıwdıń usı kúshler tárepinen islengen jumıs penen baylanıslı ekenligi kelip shıǵadı. Bul jumıs ushın ańlatpanı tabamız.



240-súwret.

Tuwrı sızıqlı l uchastkası bar kontur.

Biz uzınlıǵı l ge teń tuwrı múyeshli qozǵalmalı konturǵa iyemiz dep boljayıq (240-súwret). Sonıń menen birge, bul kontur baǵıtı sızılma tegisligine perpendikulyar hám sızılmanıń arǵı tárepine qaray baǵıtlanǵan bir tekli magnit maydanında jaylasqan bolsın. Demek, indukciya vektorı $\mathbf{B}$ turaqlı hám l uchastkasına perpendikulyar. SHep qol qaǵıydasın paydalanıp, konturdin qozǵalatuǵın l uchastkasına oń tárepke qaray baǵıtlanǵan f kúshiniń tásir etetuǵınlıǵın kóremiz. $\sin \alpha = 1$ teńligi orınlı bolǵanlıqtan, bul kúshtiń shaması mınaǵan teń:

$$f = IBl.$$

Bul kúshitiń tásirinde uchastka ońǵa qaray qozǵaladı. Toqtır kúshi I di turaqlı dep esaplaymız, bunday jaǵdayda uchastkanı ara qashılıǵı Δx qa teń bolǵan 1-awhaldan 2-awhalǵa kóshirgende f kúshi

$$\Delta A = f \cdot \Delta x = IBl\Delta x$$

jumısın orınlaydı. $l\Delta x$ kóbeymesi l uchastkası kóshirilgende onıń basıp ótetuǵın ΔS maydanına teń. Bunnan mınaday teńlikti alamız:

$$\Delta A = IB \Delta S. \quad (1)$$

(1)-ańlatpaǵa magnit indukciyasınıń aǵısın kirgizip

$$\Delta \Phi = B \cdot \Delta S \quad (2)$$

teńligin alamız hám bunnan jumıs ushın mınaday ańlatpaǵa iye bolamız:

$$\Delta A = I \cdot \Delta \Phi. \quad (3)$$

Bul ańlatpa l kesindisi f kúshine parallel emes qozǵalǵanda da durıs. Bul jaǵdayda mınaday teńlikler orınlı boladı:

$$\Delta A = f \Delta x \cos \beta = IBl\Delta x \cos \beta.$$

Biraq $l\Delta x \cos \beta$ kóbeymesi jáne de l uchastkası basıp ótken maydanǵa teń, bunnan mınaday ańlatpanı alamız:

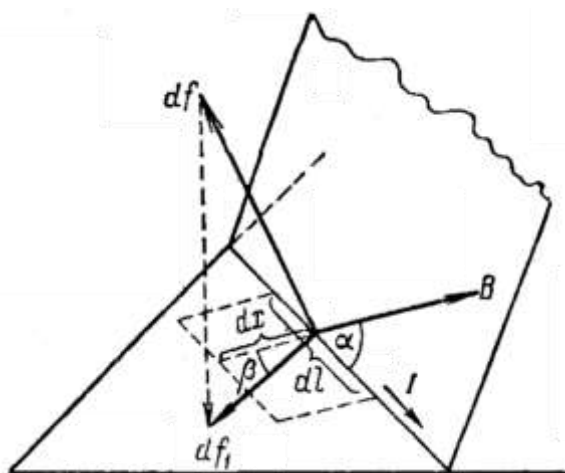
$$\Delta A = IB \Delta S = I \cdot \Delta \Phi.$$

Solay etip *magnit maydanında toǵı bar uchastka qozǵalǵanda islengen jumıs usı uchastkadaǵı toqtır kúshiniń magnit indukciyasınıń kelip ótilgen aǵısınıń kóbeymesine teń boladı.*

Alınǵan nátiyjeni iqtıyarlı maydan menen konturdıń uchastkası menen maydannıń iqtıyarlı óz-ara orientaciyası ushın ulıwmalastırwǵa boladı.

241-súwret.

Magnit maydanında toq ótip turǵan dl uchastkasınıń orın almasıwındaǵı islengen jumıstı esaplawǵa.



Toǵı bar konturdıń kishkene dl uchastkasın alamız hám bul uchastkanıń orın almasıwın kishkene dx awısıwlarına bólemiz; dl hám dx uchastkaların olardıń sheklerinde indukciya vektorı turaqlı bolıp qalatuǵınday dárejede kishi etip alamız. Meyli, $\mathbf{B}$ vektorı menen dl diń baǵıtınıń arasındǵı α múyeshtiń shaması iqtıyarlı bolsın (241-súwret). dl uchastkasına tásir etetuǵın df kúshiniń shaması mınaǵan teń:

$$df = IB \sin \alpha \cdot dl.$$

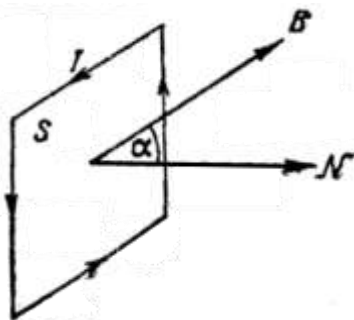
B hám dl lerge perpendikulyar bolǵan df kúshiniń baǵıtın shep qol qaǵıydası boyınsha anıqlaymız. dl kesindisi dx shamasına orın almasıwında ol bazı bir tegis dS maydanın basıp ótedi. Bunday orın almasıwında kúsh mınaday jumıstı orınlaydı:

$$dA = df_1 \cdot \cos \beta \cdot dx.$$

Bul teńlikte df_1 shaması df kúshiniń orın almasıw tegisligine túsirilgen proekciyası, df_1 hám dx kesindileriniń arasındǵı múyesh β . Magnit maydanında toq elementine tásir etetuǵın kúshitiń baǵıtı barlıq waqıtta magnit indukciyasına perpendikulyar bolǵanlıqtan, orın almasıw tegisliginde jatqan kúshitiń proekciyası df_1 diń indukciya vektorınıń orın almasıw tegisligine perpendikulyar etip payda etiletuǵınlıǵı túsiniikli. Bunnan mınanı alamız:

magnit indukciyasınıń ózgerisine teń ekenligin ańsat kóriwge boladı. Haqıyqatında da: $adcc'b'a'$ arqalı ótetuǵın aǵıs quramlıq bólim sıpatında Φ_1 aǵısına da, Φ_2 aǵısına da kiredi, demek, $\Phi_2 - \Phi_1$ ayırması usı bet arqalı ótetuǵın aǵıstı óziniń ishine almaydı. $a'b'c'd'$ hám $abcd$ betleri arqalı ótetuǵın aǵıslardıń ayırması ǵana qaladı. Sonlıqtan, eń aqırında mınaǵan iye bolamız: *ótip turǵan toqtırn shaması turaqlı bolǵan tuyıq konturdı bir awhaldan ekinshi awhalǵa jılistırǵanda islengen mexanikalıq jumıs konturdaǵı toqtırn kúshiniń magnit indukciyasınıń kontur tárepinen dáslepki awhaldaǵı jáne keyingi awhaldaǵı kesip ótilgen aǵıslarınıń ayırmasına teń boladı eken.* Demek, eger kontur tárepinen sheklengen maydandaǵı magnit indukciyasınıń aǵısı ózgermeytuǵın bolsa, onda orın almasıwda islengen jumıs nolge teń boladı. Eger, mısalı, toq ótip turǵan kontur bir tekli magnit maydanında ilgerilemeli qozǵalatuǵın bolsa, onda konturdıń maydanı arqalı ótetuǵın indukciyanıń aǵısı ózgeriske ushıramaydı hám qosındı jumıs nolge teń boladı.

(3)- hám (4)-formulalardı keltirip shıǵarǵanımızda toqtırn kúshi I barlıq waqıtta turaqlı bolıp qaladı dep esapladıq. Keyinirek (XX bapta) biz belgili bolǵan sharayatlarda konturdıń orın almasıwınıń barısında elektromagnitlik indukciya qubılısınıń konturdaǵı toqtırn kúshiniń mánisin ózgerte alatuǵınlıǵın da kóremiz. Sonlıqtan, eger bunday jaǵdaylarda konturdaǵı toqtırn kúshi I di turaqlı etip uslap turıw ushın ilajlar qullanılmasa (mısalı, waqıttırn zárúrli bolǵan momentlerinde qosımsha batareyalardı hám reostatlardı jalǵaw jolı menen), onda (3)- hám (4)-formulalar *usınday sheksiz kishi orın almasırwlar ushın ketken waqıttırn ishinde toqtırn kúshi I di turaqlı dep esaplawǵa bolatuǵın konturdıń sheksiz kishi orın almasırwları ushın ǵana durıs boladı.* Bunday jaǵdayda shekli orın almasırwda islengen jumıstı integrallaw jolı menen anıqlawǵa boladı.



243-súwret.

Ramkanıń maydanı arqalı ótetuǵın magnit indukciyasınıń aǵısın esaplawǵa.

(4)-ańlatpa orınlanǵan jumıstırn tek shamasın ǵana emes, al belgisin de beredi. Onıń ushın indukciyanıń qanday aǵısınıń oń ekenligin anıqlap alıw kerek. Konturdıń betine túsirilgen oń normal menen súyir múyeshti payda etetuǵın magnit indukciyasınıń sıızqları oń aǵıstı payda etedi; N normalınıń oń baǵıtı konturdaǵı toqtırn baǵıtı menen burǵı qaǵıydası boyınsha baylanısqa (243-súwret). Bunday jaǵdayda, eger bettiń maydanı arqalı indukciyanıń aǵısı úlkeyetuǵın bolsa, onda konturdıń elementlerine tásir etetuǵın kúshler oń jumıstı isleydi; eger bettiń maydanı menen sheklengen aǵıs kemeyetuǵın bolsa, onda konturǵa túsetuǵın jumıstırn belgisi teris.

Bazı bir dara jaǵdaylardı qaraymız.

1. Bir tekli magnit maydanındaǵı ramkanı burǵanda orınlanǵan jumıs. Betiniń maydanı S ke teń hám I toǵı ótip turǵan tegis ramkanı qaraymız. Ramkanıń betine baǵıtı burǵı qaǵıydası boyınsha anıqlanatuǵın N normalın júrgizemiz.

Meyli, N normalı B indukciyanıń sıızqları menen α múyeshin jasaytuǵın bolsın. Bunday jaǵdayda ramkanıń betiniń maydanı arqalı ótetuǵın aǵıs Φ mınaǵan teń (243-súwret):

$$\Phi = BS \cos \alpha.$$

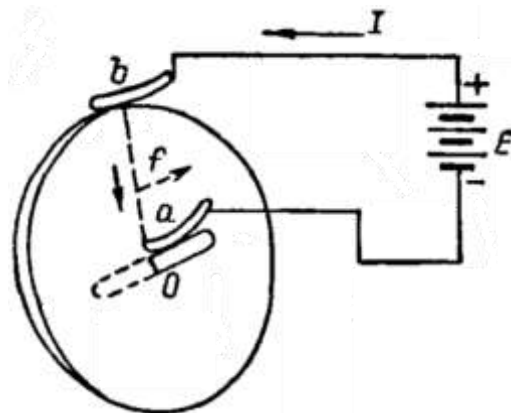
Ramkanı burǵanda mınaday jumıs orınlanadı [(4)-formulaǵa qarańız]:

$$A = IBS(\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1). \quad (5)$$

Bul ańlatpada α_1 hám α_2 arqalı ramkanı burmastań buringı hám burǵannan keyingi normal menen indukciya sıızqlarınıń arasındaǵı múyeshler belgilengen. $IS = p_m$ shamasınıń ramkanıń magnit momenti ekenligin esapqa alıp, (5)-ańtapanı bılayınsha kóshirip jazamız:

$$A = p_m B (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1). \quad (6)$$

244-súwret.
Sırǵanaytuǵın kontaktları bar aylanatuǵın disk.



2. Sırǵanaytuǵın kontaktı bar diskti aylandırǵanda islengen jumıs. Meyli metal disk magnit maydanınıń kúsh sıızqlarına normal baǵıtta qoyılǵan bolsın. Disk óziniń orayı arqalı ótetuǵın kúsh sıızqlarına parallel qoyılǵan O kósheriniń dógerinde aylanatuǵın bolsın (244-súwret). Diskke toq sırǵanaytuǵın a hám b kontaktlarınıń járdeminde alıp kelinedi hám disk boyınsha radiallıq baǵıtta ótedi⁵². Eger magnit maydanı sıızılma tegisliginiń arǵı tárepine qaray baǵıtlanǵan hám toq radius arqalı joqarıdan tómengen qaray ótetuǵın bolsa, onda toqqa maydan tárepten oń tárepke qaray baǵıtlanǵan kúsh tásir etedi hám disk aylana baslaydı. Bul jaǵdayda toqtıń $EbaE$ konturı arqalı ótetuǵın indukciyanıń aǵısı turaqlı bolıp qaladı, biraq, sonda da jumıs orınlanadı. Bunıń sebebi mınadan ibarat: bul jaǵdayda toq belgili bolǵan ótkizgish sımlar arqalı emes, al úziksiz aylanatuǵın disktiń hár qıylı bolǵan radiusları arqalı ótedi. Diskti sheksiz kishi $\Delta\varphi$ múyeshke burǵanda boyı boyınsha toq ótip turǵan radius ta $\Delta\varphi$ múyeshke burıladı hám ol

$$\Delta S = \frac{1}{2} R^2 \Delta\varphi$$

shamasına teń maydandı basıp ótedi. Bul teńlikte R arqalı disktiń radiusı belgilengen. Usı maydan arqalı ótetuǵın indukciyanıń aǵısı $\Delta\Phi = B\Delta S$ shamasına teń. Disktiń úziksiz túrde aylandırǵanda kontaktqa jańa radiuslar kele baslaydı hám olardıń barlıǵı tárepinen basıp ótilgen maydan mınaday formulaniń járdeminde anıqlanadı:

$$S = \sum \frac{1}{2} R^2 \Delta\varphi = \frac{1}{2} R^2 \sum \Delta\varphi.$$

Disktiń bir tolıq aylanıwı ushın $\sum \Delta\varphi = 2\pi$, bunnan $S = \pi R^2$ hám indukciyanıń aǵısınıń ózgerisi $\Phi_2 - \Phi_1 = BS = \pi R^2 B$ shamasına teń. (4)-formula boyınsha bunday jaǵdayda orınlanǵan jumıstıń mánisi

$$A = I(\Phi_2 - \Phi_1) = \pi R^2 IB$$

shamasına teń bolıp shıǵadı.

Bul misal (4)-formulanı sırǵanawshı kontaktlar bar jaǵdayda toq tutas qozǵalatuǵın ótkizgish arqalı ótetuǵın jaǵdayda abaylap paydalanıwdıń kerek ekenligin kórsetedi.

§ 211. Magnit shınjırınıń nızamları. Magnit indukciyasınıń aǵısı ótetuǵın magnetiklerdiń aǵısını *magnit shınjırı* dep ataydı. Eger aǵıs bir ortalıqtan ekinshi ortalıqqa tutası menen ótetuǵın

⁵² Haqıyqatında, toq tek bir radiustıń boyı menen ǵana ótpeydi, biraq, bunday boljaw esaplawdı ápiwayılastırıw ushın islengen.

bolsa, onda birinshi hám ekinshi ortalıqtıń magnit indukciyasınıń aǵıslarınıń izbe-iz jalǵanıwı haqqında gáp etiledi; eger aǵıs bir neshe aǵıslarǵa bólinip, onnan keyin olar qaytadan qosılatuǵın bolsa, onda aǵıslarınıń parallel jalǵanıwı haqqında aytamız.

Toroidtıń oramları arqalı ótetuǵın indukciyanıń aǵısı Φ tarmaqlarǵa bólinbegen magnit shıńırına misal boladı. Toroidtı qaraymız hám onıń oramlarınıń sanın N , kósheriniń uzınlıǵın l , al kese-kesimin S arqalı belgileymiz. Oramlar materialınıń magnit sińirgishligi μ bolǵan serdechnikke oralǵan hám oramlar arqalı I toǵı ótetuǵın bolsın. Toroidtıń kóldeneń kesimi arqalı ótetuǵın aǵıs Φ ushın ańlatpanı jazamız. Maydanda bir tekli hám toroidtıń kósheriniń baǵıtında baǵıtlangan dep esaplap, mınaǵan iye bolamız:

$$\Phi = SB = \mu HS.$$

199-paragraftaǵı (1)-formula boyınsha toroidtıń ishindegi magnit maydanınıń kernewligi H tıń mánisi $4\pi nI$ shamasına teń hám bul ańlatpada n arqalı toroidtıń uzınlıǵınıń bir birligindegi oramlar sanı belgilengen. Bunnan

$$\Phi = 4\pi\mu nIS.$$

$n = \frac{N}{l}$ teńliginiń orınlı ekenligin eske alıp

$$\Phi = 4\pi\mu \frac{N}{l} IS$$

teńligin jaza alamız, al bul teńlikti

$$\Phi = \frac{4\pi NI}{l/\mu S} \quad (1)$$

túrinde jazıwǵa boladı.

Bul formula shıńır uchastkası ushın jazılǵan Oma formulasına formallıq jaqtan usaydı.

Haqıyqatında da, eger $4\pi NI$ ańlatpanı *magnit qozǵawshı kúsh* dep atasaq hám onı $\mathcal{E}_m$ arqalı belgilesek, al bólimindegi $l/\mu S$ shamasın *magnitlik qarsılıq* r_m dep atasaq, yaǵnıy

$$\mathcal{E}_m = 4\pi NI, \quad (2)$$

$$r_m = \frac{l}{\mu S} \quad (3)$$

belgilewin qabıl etsek, onda (1)-formula mınaday túrge enedi:

$$\Phi = \frac{\mathcal{E}_m}{r_m}. \quad (1a)$$

(1a) formuladan mınaday juwmaq shıǵaramız: *magnit indukciyasınıń aǵısınıń san mánisi magnit qozǵawshı kúsh $\mathcal{E}_m$ niń shıńırdań magnitlik qarsılıǵı r_m niń qatnasına teń*. Magnitlik qarsılıqtıń shıńırdań uzınlıǵına tuwrı proporcional hám shıńırdań kese-kesiminiń maydanı menen shıńırdań magnitlik sińirgishligine keri proporcional. Magnit qozǵawshı kúsh NI kóbeymesine tuwrı proporcional, al bul shama magnit shıńır menen orap alınatuǵın toqtıń tolıq kúshine teń.

Eger (1)-formulada toqtıń kúshi I di absolyut elektromagnitlik birliklerde, l menen S ti sáykes santimetr hám santimetrdań kvadratında ańǵartsaq, onda indukciyanıń aǵısı maksvellerde alınadı. Eger (1)-formulada toqtı amperlerde, al aǵıstı burınǵıday maksvellerde ańǵartsaq, onda oǵan 0,1 ge teń bolǵan san túrindegi koefficientti kirgiziw kerek boladı; bunday jaǵdayda:

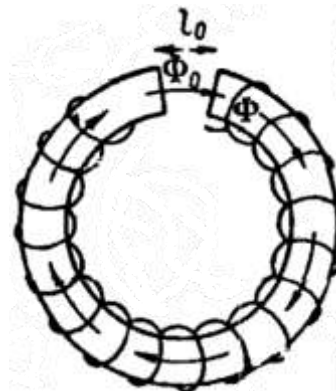
$$\Phi(mks) = 0,1 \frac{4\pi NI(a)}{l\mu S}$$

teńligine iye bolamız. Bul teńlikte l menen S , burınǵıday, santimetrlerde hám santimetrdań kvadratında ańǵartılǵan. Birliklerdiń xalıq aralıq sistemasındaǵı magnit qozǵawshı kúsh $\mathcal{E}_m$ menen magnitlik qarsılıǵınıń birlikleri haqqında tómende ayıladı (223-paragraf).

Magnit qozǵawshı kúsh penen magnitlik qarsılıǵı shamaları sıyaqlı shamalardıń kirgiziliwi elektrlik hám magnitlik shıńırdań arasındaǵı formallıq analogiyanıń ele de bar ekenligi menen baylanıslı. Bul jaǵdaydı kórsetiw ushın magnit shıńırınıń izbe-iz jalǵanǵan uchastkaların qaraymız. Eger biz magnit sińirgishligi μ , uzınlıǵı l_1 bolǵan ózekte uzınlıǵı l_0 , al magnit sińirgishligi μ_0 bolǵan

hawa sańlaǵı bar dep boljasaq, onda aǵıslardıń izbe-iz jalǵanıwına joqarıda qarap ótilgen toroid xızmet ete aladı (245-súwret). Biz házir aǵıstıń mánisin bul sańlaqtıń ádewir ózǵertetuǵınlıǵın kóremiz.

245-súwret.
 l_0 sańlaǵı arqalı ótetuǵın magnit aǵısı.



Bul jaǵdaydaǵı aǵıstı tabıw ushın toroidtıń orta sıızıǵı bolǵan kontur boyınsha $\mathbf{H}$ vektorınıń cirkulyaciyası ushın jazılǵan ańlatpadan paydalanamız. Usı kontur tárepinen qamtıp alınǵan tolıq toq IN ge teń (toroidtıń barlıq oramlarındaǵı toq). Nátiyjede mınaday ańlatpanı alamız:

$$\sum H_l \Delta l = 4\pi IN.$$

Toroidtıń ishindegi magnit maydanınıń kernewligi onıń ortasındaǵı sıızıq penen sáykes bolatuǵın bolǵanlıqtan ózektegi kernew menen sańlaqtaǵı kernewdi $\mathbf{H}$ hám $\mathbf{H}_0$ arqalı belgilep,

$$4\pi NI = Hl_1 + H_0 l_0$$

túrindegi yamasa H hám H_0 shamalarınń ornına $B = \mu H$ hám $B_0 = \mu_0 H_0$ magnit indukciyaların kirgizip, mınaday ańlatpanı alamız:

$$4\pi NI = \frac{B}{\mu} l_1 + \frac{B_0}{\mu_0} l_0. \quad (4)$$

Bul qatnasqa ózekte de, sańlaqta da birdey bolǵan F aǵısın kirgizemiz.

Meyli, toroidtıń oramlarınıń kese-kesiminiń maydanı S ke, al aǵıs ótetuǵın sańlaqtıń kese-kesiminiń maydanı S_0 ge teń bolsın (sańlaqtaǵı aǵıstıń kese-kesimi turaqlı dep boljaymız). Bunday jaǵdayda

$$B = \frac{\Phi}{S}, B_0 = \frac{\Phi}{S_0}$$

hám bunnan keyin (4)-formula mınaday túрге enedi:

$$4\pi NI = \Phi \left(\frac{l_1}{S\mu} + \frac{l_0}{S_0\mu_0} \right). \quad (5)$$

Biraq $4\pi NI$ kóbeymesi magnit qozǵawshı kúsh $\mathcal{E}_m$, al $l_1/S\mu$ hám $l_0/S_0\mu_0$ shamaları bolsa sáykes ózektiń hám sańlaqtıń magnitlik qarsılıqları bola aladı. Bunnan

$$\mathcal{E}_m = \Phi(r_m + r_{m0}) \text{ yamasa } \Phi = \frac{\mathcal{E}_m}{r_m + r_{m0}}$$

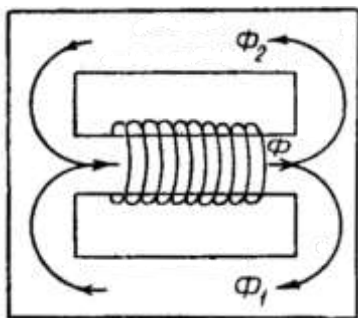
formulaları alınıadı. R_m arqalı qarsılıqlardıń qosındısı bolǵan $r_m + r_{m0}$ shamasın belgilep,

$$\Phi = \frac{\mathcal{E}_m}{R_m} \quad (5a)$$

formulasına iye bolamız.

Φ aǵısı jáne magnit qozǵawshı kúsh $\mathcal{E}_m$ niń magnitlik qarsılıǵı R_m ge qatnası boyınsha anıqlanadı, al *shinjirdiń magnitlik qarsılıǵı R_m bolsa onıń izbe-iz jalǵanǵan uchastkalarınń magnitlik qarsılıqlarınıń qosındısına teń.*

Endi magnitlik shinjirdiń parallel tarmaqlarǵa bóliniwın tallaymız. Usınday tarmaqlanıw 246-súwrette kórsetilgen.



246-súwret.
Magnit shınjırınıń parallel tarmaqlarǵa
bóliniwi.

SHınjırdıń ortańǵı bóliminde $\mathcal{E}_m = 4\pi NI$ magnit qozǵaǵısh kúshiniń payda bolıwına alıp keletuǵın oram qoyılǵan. SHınjırdıń ortańǵı bólimindegi indukciyanıń aǵısı bolǵan Φ shaması shınjırdıń basqa bólimindegi Φ_1 hám Φ_2 aǵıslarǵa tarmaqlanadı, demek,

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2.$$

Bir biri menen parallel tutasqan bólimler ushın minaday qatnaslarǵa iye bolamız:

$$\Phi_1 = \frac{\mathcal{E}_m}{r_{m1}}, \Phi_2 = \frac{\mathcal{E}_m}{r_{m2}}.$$

Bul teńliklerde r_{m1} hám r_{m2} arqalı aǵıslar ótetuǵın uchastkalardıń magnitlik qarsılıqları, al $\mathcal{E}_m$ arqalı magnit qozǵawshı kúsh belgilengen. $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$ teńligi orınlı bolǵanlıqtan,

$$\Phi = \mathcal{E}_m \left(\frac{1}{r_{m1}} + \frac{1}{r_{m2}} \right) = \frac{\mathcal{E}_m}{R_m}$$

teńlikleri kelip shıǵadı. Bunnan parallel tutastırılǵan uchastka ushın tolıq qarsılıq R_m diń parallel tutastırılǵan ótkizgishlerdiń qarsılıǵınday

$$\frac{1}{R_m} = \frac{1}{r_{m1}} + \frac{1}{r_{m2}} \quad (6)$$

qatnasınıń járdeminde anıqlanatuǵınlıǵın kóremiz.

Magnit shınjırınıń joqarıda keltirilgen nızamlarına elektromagnitlerdiń, yaǵnıy intensivli magnit maydanların alıwǵa múmkinshilik beretuǵın ásbaplardıń dúzilisi tiykarlanǵan. Elektromagnitlerde magnit maydanı solenoid boyınsha ótetuǵın toq tárepinen qozdırıladı; maydandı kúsheytıw ushın solenoidqa temir ózekler kirgiziledi. Temir ózektiń tutatuǵın ornın aykınlastırıw ushın minaday jaǵdaydı tallaymız. Meyli, uzınlıǵı l , kese-kesiminiń maydanı S hám oramlardıń ulıwmalıq sanı N bolǵan toroid bolsın. Bunday jaǵdayda kúshi I ge teń bolǵan toq ótip turǵan toroidtiń ishinde kernewligi

$$H = 4\pi \frac{N}{l} I \quad (7)$$

shamasına teń magnit maydanı payda boladı.

Endi toroidtiń ishine onı tolıǵı menen toltırıp turatuǵın temir ózekti kirgizemiz; meyli, tek ensiz juqa sańlaqtı ǵana bos qaldıramız (245-súwret). Sańlaqtıń ishindegi maydannıń kernewligi H_0 tı anıqlaymız. Onıń ushın dáslep toroidtiń ishindegi indukciyanıń aǵısını (5)-formula boyınsha anıqlaymız:

$$\Phi = \frac{4\pi N l}{\frac{l_1}{S\mu} + \frac{l_0}{S_0}}. \quad (8)$$

Bul teńlikte l_1 - temir ózektiń uzınlıǵı, μ - onıń magnitlik sińirgishligi, l_0 - sańlaqtıń keńligi, S_0 - sańlaqtıǵı aǵıstıń kese-kesiminiń maydanı (sańlaqtıǵı hawanıń magnitlik sińirgishligi μ_0 di 1 ge teń dep esaplaymız). Eger sańlaq $l_0 \ll \frac{l_1}{\mu}$ teńsizligi orınlanatuǵınday dárejede juqa bolsa, onda (8)-formulanıń bólimindegi $\frac{l_0}{S_0}$ aǵzasın $\frac{l_1}{S\mu}$ shamasına salıstırǵında esapqa almawǵa boladı hám bunday jaǵdayda aǵıs ushın minaday formulaǵa iye bolamız:

$$\Phi = 4\pi \frac{N}{l_1} IS\mu.$$

Ózektegi indukciya mınağan teń boladı:

$$B = 4\pi \frac{N}{l_1} I\mu.$$

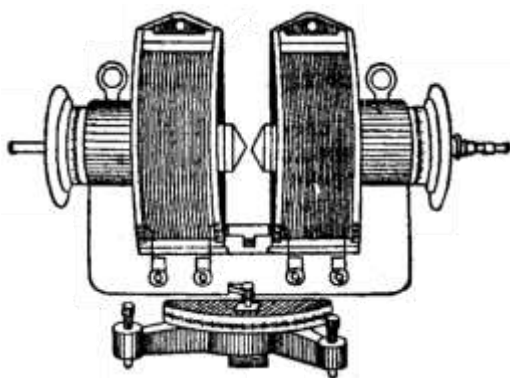
Juqa sańlaqta indukciya sıızqları ózekti sańlaqtan ayırıp turǵan shegaraǵa túsirilgen normaldıń baǵıtında jaylasadı. Sonlıqtan sańlaqtıń ishindegi indukciya B_0 ózektegi indukciya B ǵa teń boladı (206-paragraf).

Magnit sińirgishligi $\mu_0 = 1$ bolǵan sańlaq oblastında magnit maydanınıń kernewligi $H_0 = B_0$; bunnan, juwıq túrde $l_1 = l_0$ teńligi orınlanadı dep esaplap, mınaday formulanı alamız:

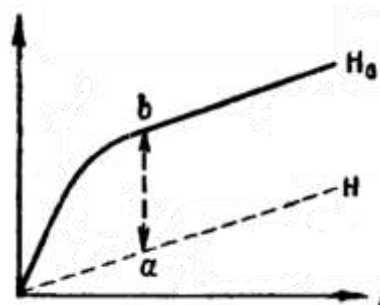
$$H_0 = 4\pi \frac{N}{l} I\mu.$$

Bul ańlatpanı (7)-formula menen salıstırıp, biz jetkilikli dárejedegi ensiz saqlaqtı maydanniń kernewliginiń toroidta ózek bolmaǵan jaǵdaydaǵıdan μ ese úlken bolatuǵınlıǵın kóremiz.

Ózegi bar tap usınday toroid saqıynalı elektromagnit bolıp tabıladı. Ádette, laboratoriyalıq elektromagnitlerge bir qansha basqa túrdi beredi, biraq, temir ózekti paydalanıwdıń effektivli bolıwı ushın magnit shınjırı derlik tuyıq hám hawa sańlaǵınıń eni júdá ensiz bolıwı kerek. 247-súwrette kóp paydalanılatuǵın laboratoriyalıq elektromagnitlerdiń biri kórsetilgen. Elektromagnitlerdegi ózektiń tutqan ornın durıs bahalaw ushın usı ózek soǵılatuǵın temir ushın magnit sińirgishlik μ dıń maydanniń kernewliginen ǵárezli ekenligin este tutıw kerek. Sonlıqtan, maydanniń kernewliginiń hár qıylı kernewliklerindegi ózektiń tutqan ornı hár qıylı. Elektromagnittiń magnit shınjırınıń ensiz sańlaǵı orın alǵanda, ondaǵı magnit maydanınıń kernewligi H san mánisi boyınsha ózektegi indukciya B ǵa teń. Al, ózektegi B nıń maydanniń kernewligi H tan ǵárezligi 220-súwrette kórsetilgendey xarakterge iye. Ózektegi maydanniń kernewligi H elektromagnittiń oramlarındaǵı toqtıń kúshi I ge proporcional. Bunnan oramdaǵı toqtan B nıń ǵárezligi, al demek, sańlaqtaǵı maydanniń kernewligi H_0 dıń ǵárezligi 220-súwrette keltirilgen iymeklikke usaǵan iymeklik penen ańǵartıladı. Ózegi temirdiń belgili bolǵan sortınan islengen belgili bolǵan elektromagnit ushın H_0 dıń I den ǵárezligi 248-súwrette keltirilgen. Tap usı súwrette toqtıń kúshi I dıń ósiwi menen H tıń ósiwin kórsetetuǵın tuwrı da keltirilgen. Eger elektromagnitte ózek bolmaǵanda, onda ol payda etken magnit maydanı H kernewligine iye bolǵan bolar edi. Kórinip turǵanıday, dáslep toqtıń kúshiniń ósiwi menen H_0 kernewligi H qa salıstırǵanda tezirek ósedı. Bul jaǵday toyınıw bolaman degenshe hám temirdiń magnit sińirgishligi μ úlken bolmaǵan jaǵdayda orın aladı. Toyınıw júzege kelgennen keyin H_0 dıń bunnan keyingi ósiwi sıızqlı xarakterge iye boladı, maydanniń kernewligi H_0 barlıq waqıtta H tan ab kesindisiniń uzınlıǵı menen anıqlanatuǵın bir shamaǵa úlken boladı.



247-súwret. Elektromagnit.



248-súwret. Elektromagnittiń polyuslarınń arasındaǵı magnit maydanınıń kernewligi H_0 dıń oramlardaǵı toqtıń kúshi I den ǵárezligi.

Tómendegidey ayqın mısaldı tallaymız. Meyli, toroidtiń temir ózeginiń uzınlıǵı (245-súwret) $l_1 = 60$

sm, sañlaqtıń keńligi $l_0 = 0,1$ sm, toroidtıń kese-kesiminiń maydanı $S = 12 \text{ sm}^2$, oramlardıń tolıq sanı $N = 1000$ hám oramlar arqalı kúshi 1 a bolǵan toq ótip turǵan bolsın. Joqarıda kórsetip ótkenimizdey, ózektiń magnit sińirgishligi μ tek ǵana temirdiń sortınan emes, al toqtıń kúshi I tárepinen anıqlanatuǵın maydannıń kernewligi H tan da ǵárezli. Bul mısaldıń shártı ushın $\mu = 600$ dep boljaymız.

Sañlaqtaǵı magnit maydanınıń kernewligi H_0 di anıqlaymız. Toroidtaǵı indukciyanıń aǵısı:

$$\Phi = \frac{0,4\pi N I_a}{\frac{l_1}{S\mu} + \frac{l_0}{S_0}}.$$

Bul anılatpada I_a - amperlerdegi toqtıń kúshi. Sañlaq ensiz bolǵanda ondaǵı indukciya ózektegi indukciyaǵa teń hám S_0 di S ke teń dep esaplawǵa boladı. Demek, san mánisi boyınsha magnit indukciyasına teń bolǵan sañlaqtaǵı maydannıń kernewligi H_0 diń mánisi aǵıs Φ arqalı anılatıladı, demek:

$$H_0 = \frac{\Phi}{S} = \frac{0,4\pi N I_a}{\frac{l_1}{\mu} + l_0}.$$

Bul anılatpaǵa joqarıda keltirilgen mánislerdi qoyıp, kernewliktiń

$$H_0 = \frac{0,4 \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot 1}{\frac{60}{600} + 0,1} e \cong 6280 e$$

shamasına teń ekenligin tabamız. Eger toroidta temir ózek bolmaǵanda, onda maydannıń kernewligi

$$H = 0,4 \frac{N}{l} I_a = 0,4 \cdot 3,14 \cdot \frac{100}{60} \cdot 1 e \cong 21 e$$

shamasına teń bolǵan bolar edi.

Solay etip, ózek bolǵan jaǵdayda sañlaqtaǵı maydannıń kernewligi 300 ese úlken boladı eken. Keńirek sañlaq bolǵan jaǵdayda sañlaqtaǵı maydannıń ósiwi kemirek boladı.

§ 212. Magnit shınjırı ushın Kirxgof teńlemesi. Quramalı magnit shınjırınıń esapları elektr shınjırı ushın Kirxgof teńlemelerine usaǵan teńlemelerdiń járdeminde islenedi.

246-súwrette parallel tutastırılǵan uchastkalarǵa iye shınjır kórsetilgen. Aǵıs tarmaqlanǵan hár bir orında keletuǵın aǵıstıń shaması usı orınnan ketetuǵın aǵıslardıń qosındısına teń; keletuǵın aǵıslardı oń, al ketetuǵın aǵıslardı teris dep esaplaw shártı qoyılatuǵın bolsa, onda hár bir tarmaqlarǵa bólinetuǵın orın ("túyin") ushın "túyinniń" qasında aǵıslardıń algebralıq aǵısınıń nolge teń bolıwı shártı orınlanadı:

$$\sum \Phi = 0. \quad (1)$$

(1)-teńlik penen anılatılatuǵın teńlemeler tarmaqlanatuǵın toqlar ushın jazılǵan Kirxgoftıń birinshi teńlemelerine sáykes keledi.

Eger biz magnit shınjırında qanday da bir tuyıq konturdı ayırıp alsaq, onda oǵan **H** vektorınıń cirkulyaciyası ushın anılatpanı qollanıp, mınanı alamız:

$$\sum Hl = 4\pi \sum NI. \quad (2)$$

Bul teńlemede summa tuyıq konturdıń barlıq uchastkalarına tarqatılǵan: $\sum NI$ summası kontur tárepinen orap alınǵan oramlar sanı menen olardaǵı toqlardıń kúshlerine kóbeymeleriniń qosındısıń bildiredi; eger orap alıw I toǵı payda etken maydannıń baǵıtında bolsa, onda NI kóbeymesin oń hám oǵan keri bolǵan jaǵdayda teris dep esaplaw kerek. Maydannıń kernewliginiń aǵıs boyınsha anılatpası mınaday túrge iye:

$$H = \frac{\Phi}{S\mu}.$$

Bul anılatpada S - aǵıstıń kese-kesiminiń maydanı, a μ bolsa ortalıqtıń magnit sińirgishligi. (2)-anılatpanı bilayınsha kóshirip jazamız:

$$\sum \frac{\Phi l}{S\mu} = 4\pi \sum NI. \quad (3)$$

Bul anılatpanı bilayınsha da jazıwǵa boladı:

$$\sum \Phi r_m = \sum \varepsilon_m.$$

Bul qatnas Kirxgoftıń ekinshi teńlemeler sistemasına usaydı: tuyıq shınjır ushın magnit aǵıslarınıń magnitlik qarsılıqqa kóbeymeleriniń summası shınjırdaǵı magnit qozǵawshı kúshke teń.

Magnit shınjırı menen elektr shınjırınıń arasındǵı uqsaslıqtıń tek formallıq xarakterge iye ekenligin atap ótiw júdá áhmiyetli. Bun nızamlardaǵı fizikalıq nızamlar arasındǵı ulıwmalıq pútkilley joq.

Joqarıda keltirilgen qatnaslardı qollanıwdaǵı qolaylılıqlardı illyustraciyalaw ushın magnitlik shınjırlardı esaplawǵa mısallar keltiremiz.

1-mısal. Ózegi 249-súwrette kórstilgendey formaǵa iye elektromagnit berilgen. Eger amper-oramlardıń sanı $NI_a = 1800$, sańlaqtıń eni $l_0 = 2$ sm hám sańlaqtıń magnitlik qarsılıǵı shınjırdıń a, b, c uchastkalarınń hár biriniń magnitlik qarsılıǵınan 30 ese úlken bolǵan jaǵday ushın elektromagnittıń hawa sańlaǵındaǵı magnit maydanınıń kernewligin anıqlańız.

Sheshimi. a, b, c uchastkalarındaǵı magnit indukciyasınıń aǵısların Φ_a, Φ_b, Φ_c arqalı, hawa sańlaqtaǵı aǵıstı Φ_0 arqalı belgileymiz. Sańlaqtıń magnitlik sińirgishligi birge teń bolǵanlıqtan, sańlaqtaǵı magnit maydanınıń biz izlep atırǵan kernewligi mınaǵan teń:

$$H_0 = \frac{\Phi_0}{S}. \quad (4)$$

Bul teńlikte S - sańlaqtıń kese-kesimi.

a, c uchastkaları, hawa sańlaǵı jáne a hám b uchastkaları arqalı ótetuǵın tuyıq kontur ushın Kirxgoftıń ekinshi teńlemeler sistemasın dúzemiz:

$$\Phi_a r_m + \Phi_c r_m + \Phi_0 \cdot 30 r_m = 0,4\pi NI_a; \quad (5)$$

$$\Phi_a r_m + \Phi_b r_m = 0,4\pi NI_a. \quad (6)$$

Eki konturdaǵı magnit qozǵawshı kúshler birdey hám I_a toǵınıń shaması amperlerde berilgen degen boljamnıń tiykarında ańǵartılǵan. Magnit indukciyasınıń aǵısınıń úzliksizliginen, mınaǵan iye bolamız:

$$\Phi_0 = \Phi_c. \quad (7)$$

Sebebi c uchastkasınan aǵıstıń barlıǵı hawa sańlaqqa ótedi. A "túyindegi" tarmaqlanıwdı qarap, Kirxgoftıń birinshi áwlad teńlemesin alamız:

$$\Phi_a = \Phi_0 + \Phi_b. \quad (8)$$

(7)- hám (8)-teńlemelerin paydalanıp, (5)- hám (6)-teńliklerdi bılayınsha kóshirip jazamız:

$$\Phi_a r_m + 31\Phi_0 r_m = 0,4\pi NI_a, \quad (5a)$$

$$2\Phi_a r_m + \Phi_0 r_m = 0,4\pi NI_a. \quad (6a)$$

(5a) nı 2 ge kóbeytip hám onnan (6a) nı aǵzama-aǵza alsaq, onda

$$63\Phi_0 r_m = 0,4\pi NI_a \quad (9)$$

teńlemesin alamız. Hawa sańlaqtaǵı magnitlik qarsılıq l_0/S ke teń, al shárt boyınsha uchastkalardıń qarsılıǵı 30 ese kishi, bunnan mınaday teńlikti alamız:

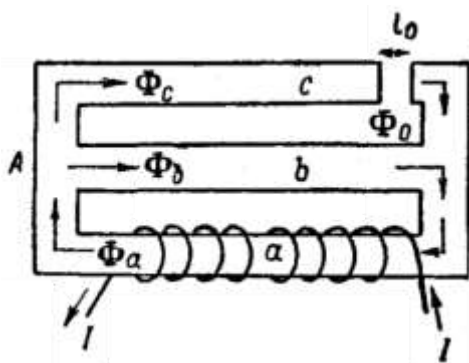
$$r_m = \frac{l_0}{S \cdot 30}. \quad (9)$$

r_m niń bul mánisin (9)-teńlemege qoyıp, indukciyanıń aǵısı ushın

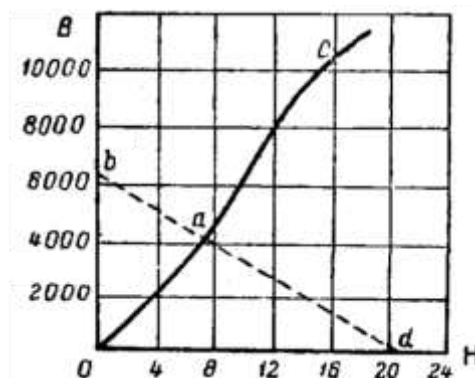
$$\Phi_0 = \frac{0,4 \cdot \pi NI_a}{63 r_m} = \frac{0,4 \cdot \pi NI_a}{63 \cdot \frac{l_0}{S \cdot 30}}$$

ańlatpasın alamız. Bunnan (4)-teńlik boyınsha sańlaqtaǵı magnit maydanınıń kernewligi mınaǵan teń bolatuǵınlıǵın kóremiz:

$$H_0 = \frac{\Phi_0}{S} = \frac{0,4 \cdot \pi NI_a}{63 \cdot \frac{l_0}{S \cdot 30}} = \frac{0,4 \cdot 3,14 \cdot 1800}{63 \cdot \frac{l_0}{S \cdot 30}} e \cong 540 e.$$



249-súwret. Tarmaqlanǵan magnit shınjırına iye elektromagnit.



250-súwret. Elektromagnittegi indukciya B nı tabıwdıń grafikalıq usılı.

2-mısal. 211-paragraftaǵı mısalda tallanǵan saqıyna tárizli elektromagnittiń sańlaǵındaǵı onıń keńligin 0,2 sm ge shekem úlkeytken jaǵdayda maydannıń kernewligi H_0 dıń nege teń bolatuǵınlıǵın anıqlańız. Ózektiń temirindegi magnit indukciyası B nıń maydannıń kernewligi H tan ǵárezligi 250-súwrette keltirilgen 0°C temperaturası ushın qurılǵan iymekliktiń járdeminde beriledi.

Sheshimi. Ózektegi aǵıstı Φ , sańlaqtaǵı aǵıstı Φ_0 hám ózek penen sańlaqtıń magnitlik qarsılıqların sáykes r_m hám r_{m0} arqalı belgilep, elektromagnittiń shınjırı ushın Kirxgoftıń teńlemeleriniń ekinshi sistemasın jazamız:

$$\Phi r_m + \Phi_0 r_{m0} = 0,4\pi N I_a. \quad (10)$$

Burıńıday, ózektegi hám sańlaqtaǵı aǵıslardıń kese-kesimlerin birdey hám S ke teń dep esaplap, mınalardı iye bolamız:

$$\Phi = BS = \mu HS, \quad \Phi_0 = B_0 S, \\ r_m = \frac{l_1}{\mu S}, r_{m0} = \frac{l_0}{S}.$$

Φ , Φ_0 , r_m hám r_{m0} shamaların ıń bul mánislerin (10) ǵa qoyıp,

$$H l_1 + B_0 l_0 = 0,4\pi N I_a$$

yamasa bul ańlatpaǵa l_1 , l_0 , N hám I_a shamaların ıń mánislerin qoyıp,

$$60H + 0,2B_0 = 1256$$

teńligine iye bolamız. Sańlaqtaǵı magnit indukciyası B_0 ózektegi magnit indukciyası B ǵa teń bolǵanlıqtan, bul qatnastı bılayınsha kóshirip jazıwǵa boladı:

$$60H + 0,2B_0 = 1256. \quad (11)$$

Bul teńleme eki belgisizge iye: maydannıń kernewligi H qa hám ózektegi indukciya B ǵa. Ekinshi teńleme xızmetin 250-súwrette keltirilgen H hám B lardıń arasındaǵı baylanıs atqaradı. Bul teńlemelerdi birgelikte sheshiw ushın grafikalıq usıldan paydalanamız, atap aytqanda (11)-teńlemege sáykes keletuǵın bd tuwrısı menen grafiktegi iymekliktiń (250-súwret) kesilisetuǵın a noqatın izleymiz. Bul kesilisiw noqatına $B = 4000$ gs sáykes keledi. $B = B_0$, al B_0 bolsa óz gezeginde san mánisi boyınsha sańlaqtaǵı maydannıń kernewligi H_0 te teń bolǵanlıqtan, biz izlep atırǵan kernewlik

$$H_0 = 4000 \text{ e}$$

shamasına teń. Sańlıqtıń keńligi 0,1 sm bolǵanda kernewlik $H_0 = 6280$ e (211-paragraf). Kórinip turǵanıday, sańlaqtıń keńliginiń úlkeyiwı maydannıń kernewliginiń ádewir kemeyiwine alıp keledi eken.

§ 213. Ólshew ásbapları. Toq ótip turǵan ótkizgishlerdiń arasındaǵı yamasa toq ótip turǵan ótkizgishler menen turaqlı magnitlerdiń arasındaǵı óz-ara tásirlesiwler toqlardıń kúshlerin ólshew ushın xızmet ete aladı. Usınday óz-ara tásirlesiwlerge úsh klassqa bóliwge bolatuǵın kóp sanlı ólshewshi ásbaplardıń dúzilisleri tiykarlanǵan: 1) turaqlı magnitler menen toq ótip turǵan ótkizgishler tásirlesetuǵın ásbaplar (magnitoelektrik); 2) jumsaq temirden islengen bólimi toǵı bar katushkaǵa tartılatuǵın ásbaplar (elektromagnitli); 3) toǵı bar eki katushka tásirlesetuǵın ásbaplar (elektrodinamikalıq).

Birinshi klassqa kiretuǵın eń ápiwayı ásbap tangens-galvanometr bolıp tabıladı. Ol dóńgelek ótkizgishtiń bir neshe oramlarınan turadı, al oramlardıń orayında vertikal baǵıttaǵı kósherdiń dógereginde aylana alatuǵın magnit strelkası jaylasqan (251-súwret). Strelka jaylasqan oblasttaǵı dóńgelek toqtıń oramları payda etken magnit maydannıń kernewliginiń turaqlı bolıwı ushın strelkanıń júdá kishkene bolıwı kerek. Bunday jaǵdayda 194-paragrafta ayılǵanlar boyınsha:

$$H = \frac{2\pi n l}{R}. \quad (1)$$

Bul teńlikte I - oramlar arqalı ótetuǵın toqtıń kúshi, n - dóńgelek ótkizgishtiń uzınlıq birligindegi oramlardıń sanı, R - olardıń radiusı. Toq bolmaǵan jaǵdayda strelka jerdiń magnit meridianınıń boyında jaylasadı; eger bunday jaǵdayda oramlardıń tegisligi meridian tegisliginde jaylasqan bolsa, onda strelka oramlardıń tegisliginde jaylasqan boladı. Toq óte baslaǵanda oramlardıń magnit maydanları H oramlardıń tegisligine perpendikulyar baǵıtlanadı hám usıǵan sáykes magnit strelkası magnit maydanı hám jerdiń magnit maydanınıń gorizont baǵıtındaǵı qurawshısınıń qosındısı payda etken kústıń baǵıtında burıladı. Bunday jaǵdayda, 252-súwrette kórsetilgendey, strelka menen oramlar tegisliginiń arasındaǵı múyesh φ dıń shaması

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{H}{H_j}$$

qatnasınıń járdeminde anıqlanadı. Bul teńlikte H_j - Jerdiń magnit maydanınıń kernewliginiń gorizont bağıtındaǵı qurawshısı. Bul teńlikte H tıń ornına onıń (1)-teńlik boyınsha anıqlanǵan mánisin qoysaq, onda

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\pi n I}{R H_j}$$

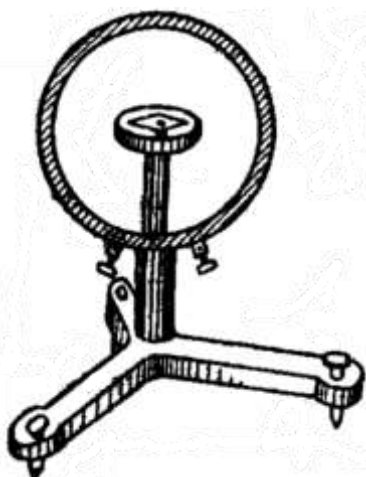
teńligine iye bolamız. Bunnan mınaday teńlik alınadı:

$$I = \frac{R H_j}{2\pi n} \cdot \operatorname{tg} \varphi. \quad (2)$$

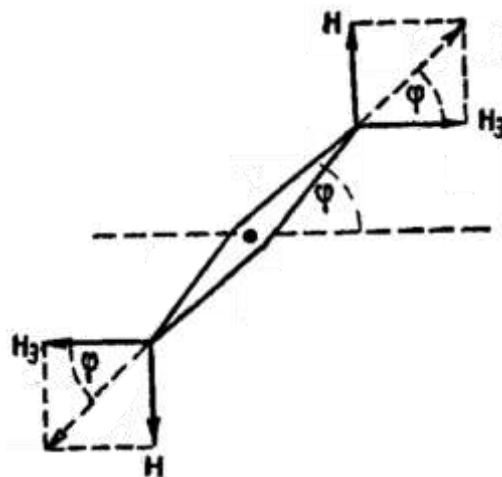
Eger bul qatnasta Jerdiń magnit maydanınıń gorizont bağıtındaǵı qurawshısı H_j erstedte, al R santimetrlerde ólshenetuǵın bolsa, onda toqtır kúshi toqtır kúshiniń elektromagnitlik birliklerinde ólshenedi. Jer sharınıń berilgen noqatında turǵan ásbap ushın $R H_j / 2\pi n$ shaması turaqlı. Bunnan

$$I = C \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (2a)$$

formulasın alamız, yaǵnıy toqtır kúshi I awısıw múyeshi φ diń tangensine proporcional. Galvanometrdiń turaqlısı C nı belgili bolǵan R hám H_j shamalarınń tiykarında esaplaw yamasa galvanometr arqalı kúshi belgili bolǵan toqtı ótkerip graduovkalaw usılı menen anıqlawǵa boladı.



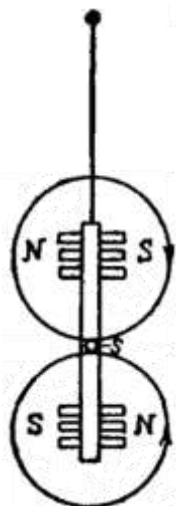
251-súwret. Tangens-galvanometr.



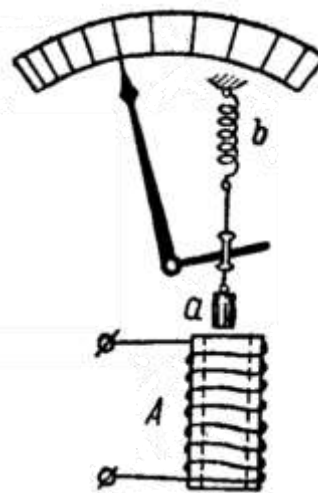
252-súwret. Tangens-galvanometrdiń strekasınıń teń salmaqlıq halın anıqlawǵa.

Magnitlerdiń qozǵalmalı sistemasına iye bolǵan ólshew ásbabınıń túri ózger tilgen tipi 253-súwrette kórsetilgen. Ondaǵı magnitlerdiń sistemasın *astatikalıq* dep ataydı. Bul sistema magnitlerdiń eki toparınan turadı. Olardıń birindegi barlıq magnitlerdiń arqa polyusları bir tárepke, al ekinshisinde qarama-qarsı tárepke qaray bağıtlanǵan. Magnitlerdiń usınday jaylasıwınıń sebebinen olarǵa Jerdiń magnit maydanı tárepinen túsetuǵın tásir kompensaciyalanǵan. Usı magnitlerdiń hár bir toparı ólshemleri arqalı shaması ólshenetuǵın toq ótetuǵın eki katushkanıń biriniń ishinde jaylasadı. Katushkalardaǵı toq qarama-qarsı bağıtlarda ótedi, sonlıqtan katushkalardıń tásirleri qosıladı. Toq bolmaǵan jaǵdayda magnitler sisteması ildirilip qoyılǵan sabaqtıń serpimli kúshleri olardı katushkalardıń tegisliginde uslap turadı. Katushkalar arqalı toq ótkende magnitler sisteması burıladı hám burılıw múyeshiniń shaması toqtır kúshin ólshewge múmkinshilik beredi. Jińishke kvarc sabaqqa ildirilgen magnitlerdiń júdá jeńil sistemasın payda etiw jolı menen hám sabaqqa bekitilgen aynadaǵı jaqtılıq dástesiniń bağıtınıń burılıwın baqlaw jolı menen shaması 10^{-12} a bolǵan júdá kishi toqlardı ólshewge boladı.

Ekinshi tipke sezgirliğı kishi bolğan, biraq júdá keń tarqalğan, al islew principi temirdiń berilgen formaǵa iye bólegi katushkanıń ishine tartılatuǵın ásbaplar kiredi. Bunday ásbap birinshi ret rus elektrotexnigi M.O.Dolivo-Dobrovolskiy tárepinen usınıldı. Bunday ásbaptıń sxeması 254-súwrette kórsetilgen. Onda A -ólshenetuǵın toq ótetuǵın katushka, a arqalı b prujinasına ildirilgen temirden soǵılğan sterjen belgilengen. Katushka arqalı ótetuǵın toq magnit maydanın payda etedi, onıń tásirinde a sterjeni magnitlenedi hám magnit maydan kúshli bolğan oblastqa, yaǵnıy katushkanıń ishine tartıladı. Kishkene sterjenge usı sterjen katushkanıń ishine tartılǵanda burılátuǵın strelka tutastırılğan.



253-súwret. Magnitlerdiń astatikalıq sisteması bar galvanometrdiń sxeması.



254-súwret. Dolivo-Dobrovolskiydiń ampermetri.

Tap usınday principitiń tiykarında házirgi zaman texnikalıq ampermetrleri soǵıladı. 255-súwrette turaqlı toqtıń texnikalıq ampermetriniń kesimi kórsetilgen. Onda: 1 arqalı katushka, 2 arqalı 5 prujinasınıń járdeminde uslap turılátuǵın magnitlengen temirdiń kishkene bólegi belgilengen. Katushka arqalı toq ótkende 2 arqalı belgilengen temirdiń bólegi katushkaǵa tartıladı hám strelkanı buradı. Temirdiń bólegi strelka menen dáwirli terbeliske kelmewi ushın 4 cilindrdiń ishinde júretuǵın 3 porshennen turatuǵın "tınıshlandırıwshı" qollanıladı.

Ólshewshi ásbaplardıń birinshi tipine jılıyatuǵın ramkalı galvanometrler de kiredi. Olarda magnit maydanı taǵa tárizli formaǵa iye turaqlı magnit tárepinen payda etiledi. N hám S polyusları (256-súwret) birdey radiusqa iye bolğan iymeytilgen cilindrlik bet penen bir birine qarap tur. Polyuslardıń arasına bir qansha kishi radiusqa iye bolğan temir cilindr qozǵalmaytuǵınday etip bekitilgen, usınıń saldarınan magnit shınjırı derlik tuyıqlanǵan awhalǵa keledi hám indukciya sızıqları polyuslar menen cilindrdiń arasındaqı cilindrlik sańlaqta koncentracıyalanǵan. Bul sańlaqtan sımniń bir neshe oramınan turatuǵın hám usı oramlar arqalı ólshenetuǵın toq ótetuǵın jeńil ad ramkası jaylastırılǵan. Jińishke prujina ramkanı belgili bolğan halda uslap turadı. Ramka arqalı toq ótkende ol oǵan tásir etetuǵın elektromagnitlik kúshlerdiń momenti menen prujinanıń buralıwınıń saldarınan payda bolğan mexanikalıq moment teńleskenge shekem burıladı. Ramka menen tutastırılǵan jeńil strelka onıń burılıw múyeshin kórsetedi. Ramka jaylasqan sańlaqtaǵı magnit maydanınıń radiallıǵınıń saldarınan keń sheklerde onıń burılıwı toqtıń kúshine proporcional.

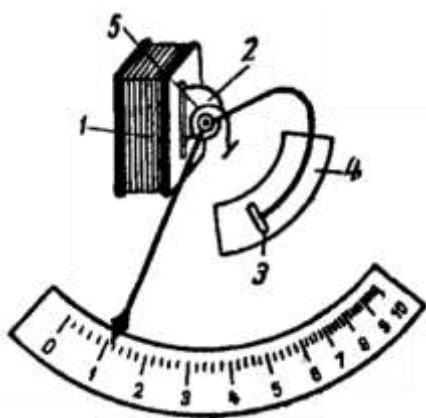
Usınday tiptegi galvanometrler ózleriniń sezgirliginiń turaqlılıǵı hám olardıń kórsetiwleriniń sırtqı maydanlardan ázzi gárezlikke iye bolǵanlıǵı sebepli júdá qolaylı. Olardıń dúzilisleriniń tiykarında jatatuǵın princip turaqlı toqlardı ólshewtuǵın laboratoriyalıq hám texnikalıq ólshew ásbapların soǵıwda qollanıladı. Bunday ásbapqa úlken qarsılıqlardan turatuǵın ramkanı parallel etip jalǵaw jolı menen ampermetr sıpatında yamasa sonday ramkanı izbe-iz jalǵaw jolı menen

voltmetr sıpatında paydalanıwǵa boladı (158-paragrafqa qarańız).

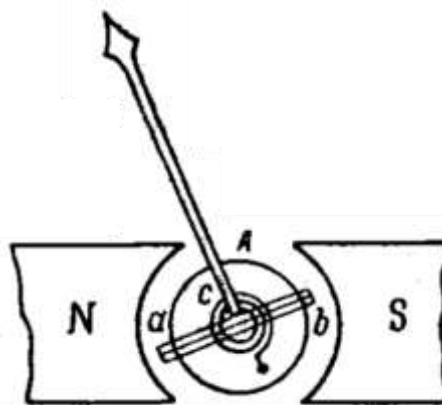
Sezgirligi joqarı bolǵan ásbaplar toǵı bar qozǵalatuǵın ramkanı jıńıshke sabaqqa ildirip qoyıw jolı menen soǵıladı (257-súwret). Ramkanıń burılıw múyeshiniń shaması oǵan jabıstırılıp qoyılǵan aynadaǵı jaqtılıqtıń shaǵılısıwı boyınsha anıqlanadı. Bunday ásbaptı *aynalıq galvanometr* dep ataydı.

Qozǵalıwshı ótkizgishi bar ólshew ásbaplarınıń usınday tipine tarlı galvanometr de kiredi. Ol kúshli magnittiń polyuslarınıń arasına kerip qoyılǵan júdá juqa *ab* simınan turadı (258-súwret). Ótkizgish sim arqalı toq ótkende ol shep qol qaǵıydasına sáykes burıladı (196-paragraf). Sımınıń orınıń ózgerisi magnetiktiń ózegi arqalı ótkerilgen ólshewshı mikroskoptıń járdeminde baqlanadı. Bunday tarlı galvanometrdiń sezgirliginiń 10^{-12} a ge shekem jetkeriwliwı múmkin. Jıńıshke sabaqtıń kishi inerciyasınıń saldarınan tarlı galvanometr waqıt boyınsha ózgeretuǵın toqlardı registraciyalaw hám fotosúwretin túsiriw ushın jaramlı.

Barlıq galvanometrlerdiń sezgirliginiń shegi toq kúshiniń fluktuaciyaları menen sheklengen (186-paragraf).



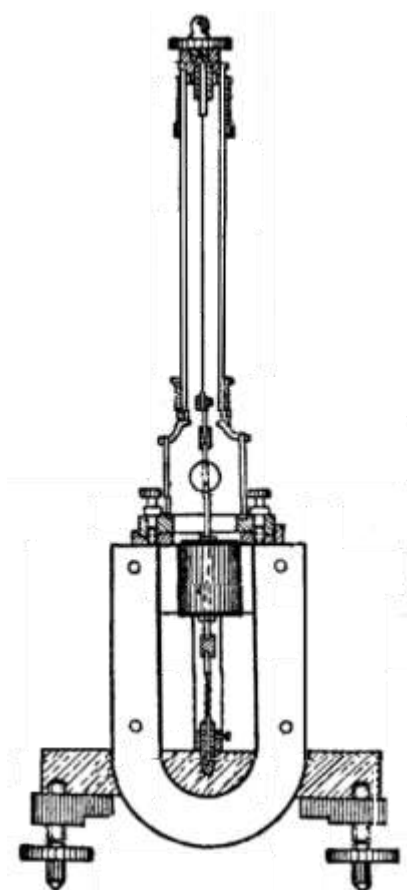
255-súwret. Turaqlı toqtı ólshewge arnalǵan texnikalıq ampermetr.



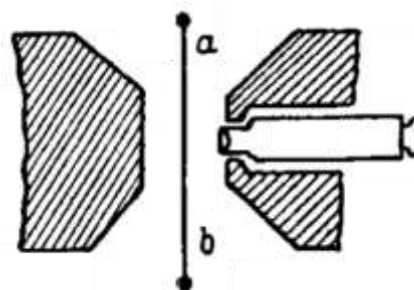
256-súwret. Qozǵalıwshı ramkaǵa iye bolǵan galvanometrdiń sxeması.

Eń aqırında, úshinshi tiptegi ólshewshı ásbaptı soǵıwǵa boladı (elektrodinamikalıq). Onda qanday da bir turaqlı magnetler bolmaydı hám olardıń kórsetiwı toq ótip turǵan ótkizgishlerdiń bir biri menen tásirlesiwine tiykarlanǵan. Bunday ásbaptıń eń ápiwayı bolǵan sxeması solenoidtiń ishine ildirilgen toǵı bar ramka bolıp tabıladı (197-paragrafta ayılǵanlar menen salıstırıńız). Ramkaǵa túsetuǵın aylandırıwshı momenttiń shaması ramka arqalı ótetuǵın I_1 toǵınıń shamasına da, solenoid arqalı ótetuǵın I_2 toǵınıń shamasına da proporcional. Eger ramka boyınsha da, solenoid boyınsha da ólshenetuǵın I toǵı ótetuǵın bolsa, onda ramkanı aylandıratuǵın momenttiń shaması I^2 qa proporcional.

Toǵı bar eki katushkanıń arasındaǵı óz-ara tásirlesiw *vattmetrlerdi*, yaǵnıy shıńjırdıń usı uchastkasında jutilatuǵın quwattı ólsheytuǵın ásbaplardı soǵıw ushın da qollanıladı. SHıńjırdıń berilgen uchastkasındaǵı paydalanılatuǵın quwattıń ondaǵı toqtıń kúshine hám onıń ushlarındaǵı potenciallar ayırması $V_1 - V_2$ ge proporcional ekenligin eske salamız. Wattmetr bir biri menen tásirlesetugin eki katushkadan turadı. Olardıń biri kishi qarsılıqqa iye boladı hám ol shıńjırdıń uchastkası menen izbe-iz jalǵanadı. Al, ekinshi katushka úlken qarsılıqqa iye bolıp, ol shıńjırdıń uchastkası menen parallel jalǵanadı. Birinshi katushkadaǵı toqtıń kúshi shıńjırdagı toqtıń kúshi I ge teń, al ekinshi katushkadaǵı toqtıń kúshi $V_1 - V_2$ potenciallar ayırmasına proporcional. Katushkalardıń hár birine shaması $I \cdot I'$ kóbeymesine, yaǵnıy $I (V_1 - V_2)$ shamasına proporcional bolǵan yamasa, basqa sózler menen aytqanda, shıńjırdıń uchastkasında paydalanılatuǵın W quwatına proporcional aylandırıwshı moment túsedi.



257-súwret. Aynalı galvanometr.



258-súwret. Tarlı galvanometr.

t waqtınıń ishinde paydalanılǵan elektr energiyasınıń shamasın ólsheytuǵın esaplaǵıstıń (schetchiktiń) dúzilisi de usınday eki katushkanı paydalanıw principine tiykarlanǵan.

XIX BAP

ELEKTR HÁM MAGNIT MAYDANLARINDA ZARYADLANGÁN
BÓLEKSHELERDİŇ QOZĞALISI

§ 214. Magnit maydanında qozğalatuğın zaryadqa tásir etetuğın kúsh. 196-paragrafta Amper nızamı boyınsha I shamasındağı toq ótip turğan uzınlığı Δl teń bolğan ótkizgishtiń uchastkasına

$$f = I \Delta l H \sin \alpha \quad (1)$$

kúshiniń tásir etetuğınlğıń kórdik. Bul teńlikte α arqalı toqtıń bağıtı menen magnit maydanınıń kernewliginiń bağıtınıń arasındağı múyesh belgilengen. Bul formulağa kiretuğın barlıq shamalardıń CGSM-sistemada ólsheniwi kerek. f kúshiniń bağıtı shep qol qağıydasınıń járdeminde anıqlanadı (196-paragrafqa qarańız). Biraq, qálegen toq zaryadlangán bólekshelerdiń - elektronlardıń yamasa ionlardıń qozğalısı menen baylanıslı. Bunnan sırtqı magnit maydanı tárepinen toq ótip turğan ótkizgishke tásir etetuğın kúshitiń qozğalatuğın zaryadlangán bólekshelerge tásir etetuğın kúshitiń saldarınan júzege keledi dep boljaw tábiyiy. Bul juwmaqtı tikkeley baqlaw arqalı tekserip kóriwge boladı: eger elektronlardıń ağısı payda bolatuğın trubkanı, misalı, turaqlı magnit payda etken sırtqı magnit maydanına alıp kelsek (259-súwret), onda elektronlar dástesi burıladı. Onı elektronlardıń dástesiniń fluorescenciyanıwshı ekrandağı payda etetuğın jaqtı daqtıń awısıwı boyınsha ańǵarıwǵa boladı. Ishi bos trubkada elektronlar erkin qozğaladı hám magnit maydanı tárepinen payda etiletuğın kúshitiń tásirinde tek olardıń traektoriyaları ǵana mayısadı. Eger elektronlar yamasa basqa zaryadlangán bóleksheler tutas deneniń ishinde qozğalatuğın bolsa (qattı yamasa suyıq denelerdiń), onda olardıń atomlar menen úzliksiz soqlıǵısıwınıń saldarınan olarǵa tásir etetuğın kúsh bul denegge beriledi. Kúshitiń usınday bolıp beriliwin 244-súwrette kórsetilgen aylanıwshı disktiń járdeminde demonstraciyalawǵa boladı. Bul jaǵdayda barlıq elektronlar disktiń ishinde onıń radiusınıń biri boyınsha qozğaladı. Disktiń tegisligine perpendikulyar bolğan magnit maydanı olardı bir tárepke qaray ısıradı. Elektronlardıń atomlar menen úzliksiz soqlıǵısıwlarınıń aqıbetinde elektronlarǵa tásir etetuğın kúsh diskke beriledi hám ol aylanı baslaydı. Usıǵan usıǵan tájiriybeni elektrolitlik ótkizgish bolğan jaǵday ushın da ótkeriwge boladı. Onıń ushın metaldan soǵılǵan qaptallarǵa iye, al ultanı izolyaciyanıń materialdan islengen saqıyna sıyaqlı ıdıs alınadı. ıdısıń diywalları elektrodlardıń xızmetin atqaradı. Toq radiallıq bağıtta diywallardıń arasındağı elektrolit arqalı ótedi. Elektrolittegi toq eki belgige iye ionlardıń qozğalıslarınıń sebebinen júzege keledi, al hár qıylı belgige iye ionlar qarama-qarsı bağıtlarda qozğaladı. Meyli, ıdısqa onıń ultanına perpendikulyar bolğan magnit maydanı alıp kelingengen bolsın. Buni, misalı, ıdısı vertikal bağıtta jaylasqan tuwrı mayatniktiń ushına jaylastırıw arqalı ámelge asırıwǵa boladı (260-súwret). Bunday jaǵdayda qozǵalıwshı ionlarǵa magnit maydanı tárepinen olardıń qozğalıslarınıń bağıtına perpendikulyar, al suyıqlıqtıń betine parallel bolğan kúshler tásir etedi. Bul kúshler eki belgige iye ionlar ushın birdey bolıp bağıtlangán, sonlıqtan hár qıylı belgilerge iye bolğan ionlar qarama-qarsı bağıtlarda qozğaladı. Bul kúshlerdiń tásirinde ionlar óziniń qozğalıslıq bağıtınan burıla baslaydı hám ishinde dóńgelek aǵıs payda bolğan suyıqlıqtı ózi menen alıp júredi.

Endi, magnit maydanı tárepinen qozğalatuğın zaryadqa tásir etetuğın kúsh ushın ańlatpanı tabamız. Onıń ushın toq ótip turğan, yaǵnıy zaryadlar qozǵalıp turğan ótkizgishtiń uchastkasına tásir etetuğın kúsh ushın jazılǵan (1)-ańlatpadan paydalanamız. Toqtıń kúshi I san mánisi boyınsha waqt birligindegi ótkizgishtiń kóldeneń kese-kesimi arqalı aǵıp ótken zaryadtıń muǵdarına teń. Eger ayırım zaryadtıń shaması e , al ótkizgishtiń kese kesimi arqalı waqt birliginde ótken zaryadlardıń sanı n bolsa, onda $I = en$. Álbette, $n = n_0 v S$, bul teńlikte n_0 - kólem birligindegi qozǵalıwshı zaryadlardıń sanı, v - olardıń tezligi hám S - ótkizgishtiń kese-kesiminiń maydanı. Demek, I ushın mınaday ańlatpanı alamız:

$$I = en_0 v S.$$

I diń bul mánisin (1) ge qoyıp, mınanı alamız:

$$f = en_0 v S \Delta l H \sin \alpha \quad (2)$$

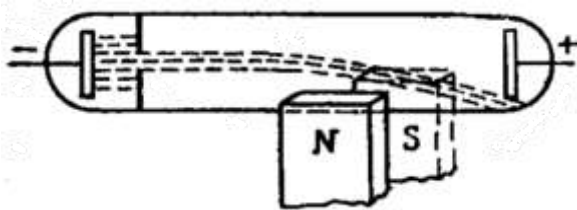
Bul kúsh uzınlıǵı Δl ge teń bolǵan ótkizgishtiń uchastkasına tásir etedi. Demek, ol ótkizgishtiń biz qarap atırǵan uchastkasındaǵı barlıq qozǵalıwshı zaryadlarǵa tásir etetuǵın kúshlerdiń qosındısına teń; bul zaryadlardıń sanı $n' = n_0 S \Delta l$ shamasına teń. Bunnan, bir zaryadqa tásir etetuǵın kúsh mınaǵan teń:

$$\Delta f = \frac{f}{n'} = \frac{f}{n_0 S \Delta l}.$$

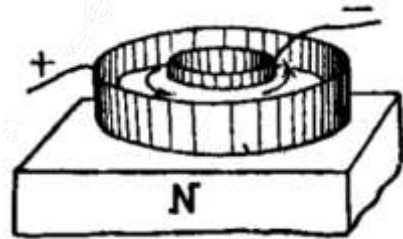
Bul teńlikke f kúshiniń ornına onıń (2)-ańlatpa boyınsha alınǵan mánisin qoyıp

$$\Delta f = ev H \sin \alpha \quad (3)$$

teńligine iye bolamız.



259-súwret. Elektronlıq dásteniń magnet maydanındaǵı burılıwı.



260-súwret. Magnet maydanındaǵı elektrolitlik ionlardıń burılıwı.

Lorenc formulası dep atalatuǵın bul formula kernewligi H qa teń magnet maydanında v tezligi menen qozǵalatuǵın zaryadqa tásir etetuǵın biz izlep atırǵan kúshni beredi. $v = 0$ teńligi orınlanatuǵın jaǵdayda Lorenc formulası boyınsha $\Delta f = 0$. Bul tınıshlıqtaǵı zaryadqa magnet maydanınıń tásir etpeytuǵınlıǵı faktına sáykes keledi (bul elektrostatikada orın alatuǵın jaǵdayǵa sáykes keledi). Lorenc formulasındaǵı v tezligi haqqında gáp etkende Δf kúshi menen maydanniń kernewligi H ólshenip atırǵan koordinata sistemasına qarata alınǵan tezlikti túsiniw kerek. Kúsh zaryadtıń qozǵalıw tezligi v ǵa da, magnet maydanınıń kernewligi H qa da perpendikulyar, yaǵnıy, Δf kúshi v hám H vektorları jatqan tegislikke perpendikulyar. Oń zaryad qozǵalatuǵın jaǵdayda kúshniń baǵıtı shep qol qaǵıydasınıń járdeminde anıqlanadı: eger tórt barmaqtıń baǵıtın zaryadtıń qozǵalıw baǵıtında uslasa, al alaqandı magnet maydanınıń kernewliginiń sıyıqları perpendikulyar bolatuǵınday etip jaylastırsa, onda Δf kúshiniń baǵıtına bas barmaqtıń baǵıtı sáykes keledi. Teris belgige iye zaryad qozǵalganda kúsh qarama-qarsı baǵıtlanǵan (261-súwret).

Lorenc kúshiniń shaması tek tezlik penen magnet maydanınıń kernewligi H tan ǵárezli bolıp ǵana qoymay, olardıń arasındaǵı múyeshtiń sinusı $\sin \alpha$ dan da, yaǵnıy olardıń salıstırmalı baǵıtlarınan da ǵárezli boladı. Zaryad magnet maydanınıń kernewligi H tıń baǵıtına perpendikulyar baǵıtta qozǵalsa kúshniń shaması maksimalıq mánisine jetedi, al zaryad maydanniń kernewliginiń sıyıqlarınıń boyı menen qozǵalsa, onda kúsh nolge teń.

Hesh qanday proporcionallıq koefficienti kirgizilmegen (3)-formulada oǵan kiretuǵın barlıq shamalardıń CGSM-birliklerinde ólshengen bolıwı kerek. Ádette aralas birlikler sistemasınan da paydalanadı: e ni CGSE-birliklerinde, al maydanniń kernewligin - erstedlerde ólsheydi, bunday jaǵdayda (3)-formuladaǵı proporcionallıq koefficientin kirgiziw kerek:

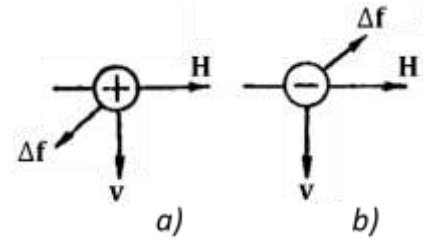
$$\Delta f = \frac{1}{c} ev H \sin \alpha. \quad (3a)$$

Bul formulada

$$\frac{1}{c} \cong \frac{1}{3 \cdot 10^{10}} \frac{\text{sek}}{\text{sm}}.$$

261-súwret.

Kernewligi $\mathbf{H}$ bolğan magnit maydanında $\mathbf{v}$ tezligi menen qozǵalatuǵın zaryadqa tásir etetuǵın Lorenc kúshi Δf tiń baǵıtı.



Δf kúshiniń baǵıtı $[\mathbf{v} \times \mathbf{H}]$ vektorlıq kóbeymesiniń baǵıtına sáykes keletuǵınlıǵın ańǵarıp, (Za) formulanı vektorlıq túrde jazıwǵa boladı. Bunnan:

$$\Delta f = \frac{e}{c} [\mathbf{v} \times \mathbf{H}]. \quad (3b)$$

Eger magnit maydanı menen bir qatarda kernewligi $\mathbf{E}$ bolğan elektr maydanı da bar bolsa, onda $\mathbf{v}$ tezligi menen qozǵalatuǵın e zaryadına tásir etetuǵın tolıq kúsh elektrlik $e\mathbf{E}$ kúshinen hám (3b) Lorenc kúshinen turadı:

$$\Delta f = e \left\{ \mathbf{E} + \frac{1}{c} [\mathbf{v} \times \mathbf{H}] \right\}. \quad (3v)$$

Lorenc kúshi tek qozǵalatuǵın elementar zaryadqa ǵana emes (elektron yamasa ion), al magnit maydanında qozǵalatuǵın qálegen makroskopiyalıq zaryadqa da tásir etedi. Mısalı, eger sharikti zaryadlasa hám onı magnit maydanında qozǵalta baslasa, onda oǵan qozǵalı baǵıtı menen magnit maydanınıń baǵıtına perpendikulyar baǵıtta kúsh tásir ete baslaydı hám bul kúshtiń shaması (3)- yamasa (Za) formulanıń járdeminde ańǵartıladı. Biraq, biz bere alatuǵın zaryadlarda hám tezliklerde bul kúshtiń mánisiniń kishi bolatuǵınlıǵın ańsat kóriwge boladı. Mısalı, eger radiusı 1 sm bolğan sharikti 3000 V potencialǵa shekem zaryadlasa, onda onıń zaryadı $e = VC = \frac{3000}{300} \cdot 1 \text{ CGSE} = 10 \text{ CGSE}$ shamasına teń boladı. Bul sharik kernewligi $H = 1000$ ersted bolğan maydanǵa perpendikulyar baǵıtta $v = 10^5 \text{ sm/sek}$ tezligi menen (oqtıń tezligi!) qozǵalsa, onda

$$\Delta f = \frac{1}{3 \cdot 10^{10}} \cdot 10 \cdot 10^5 \cdot 1000 \text{ din} = \frac{1}{30} \text{ din}$$

shamasındaǵı, yaǵnıy kórinip turǵanınday, shaması kishkene bolğan kúsh payda boladı. Biraq, bul nátiyje ádettegidey jaǵdayǵa qayshı keletuǵınday bolıp kórinedi: toq ótip turǵan ótkizgishterge (sımlarǵa) magnit maydanında ádewir úlken kúshler tásir etedi. Bunday jaǵdayda ádettegidey kúshlerdegi toqlarda alıp ótiletuǵın zaryadlardıń júdá úlken ekenligin názerde tutıw kerek. 1 a bolğan toq kúshi orın alǵanda ótkizgishtiń kese-kesimi arqalı bir sekundtıń ishinde 1 kulon, yaǵnıy $3 \cdot 10^9 \text{ CGSE}$ -birlik elektr zaryadı ótedi.

Qozǵalmaytuǵın oń zaryadtıń dógerinde radiusı r bolğan dóńgelek orbita boyınsha ω múyeshlik tezligi menen qozǵalatuǵın elektronǵa magnit maydanınıń tásirinde qaraymız. Elektronıń qozǵalı $f = \frac{eE}{r^2}$ Kulon kúshiniń tásirinde júredi, e - elektronıń zaryadı, al E - oń zaryadtıń shaması. w_n arqalı elektronıń orayǵa umtılwshı tezleniwın qaraymız. Bunday jaǵdayda Nyutonıń ekinshi nızamı boyınsha minaday teńlikti jaza alamız:

$$mw_n = \frac{eE}{r^2}. \quad (4)$$

Endi elektronıń orbitasınıń tegisligine perpendikulyar bolğan $\mathbf{H}$ magnit maydanı bar dep boljaymız. Bunday jaǵdayda kulonlıq f kúshine Lorenc kúshi qosıladı:

$$\Delta f = \frac{e}{c} vH.$$

Elektronıń múyeshlik tezligi ω nı kirgizip $v = \omega r$ teńligine iye bolamız, nátiyjede Lorenc kúshi ushın ańlatpa minaday túrge iye boladı:

$$\Delta f = \frac{e}{c} r\omega H.$$

Lorenc kúshi radiustıń baǵıtında baǵdarlangan hám, demek, magnit maydanı bar bolğan jaǵdayda qozǵalı teńlemesi bolğan (4)-teńleme

$$mw_n = \frac{eE}{r^2} + \frac{e}{c}r\omega H$$

túrindegi teńleme menen almastırıladı.

Bunnan keyin, elektronnıń orbitası tegisligine perpendikulyar bolǵan kósherdıń dógerinde turaqlı $\Delta\omega$ múyeshlik tezligi menen qozǵalatuǵın koordinatalar sistemasın kirgizemiz. Eger teńlemenı usı aylanıwshı sistemaǵa salıstırǵanda jazatuǵın bolsaq, onda tásir etetuǵın $f + \Delta f$ kúshine jáne oraydan qashıwshı inerciya kúshi bolǵan $mr\Delta\omega^2$ kúshin hám Koriolis kúshi bolǵan $2mr\omega\Delta\omega$ kúshin kirgiziwimiz kerek (I tomdaǵı 24-paragrafqa qarańız).

Solay etip, aylanıwshı sistemaǵa qarata qozǵalıstı teńlemesi mınaday túrge enedi:

$$mw_n = \frac{eE}{r^2} + \frac{e}{c}r\omega H + 2mr\omega\Delta\omega + mr\Delta\omega^2.$$

Eger $\Delta\omega$ shamasın kishi dep esaplasaq, onda kishi bolǵan $mr\Delta\omega^2$ kóbeymesin esapqa almawǵa boladı. Bunday jaǵdayda

$$mw_n = \frac{eE}{r^2} + \frac{e}{c}r\omega H + 2mr\omega\Delta\omega.$$

Eger $\Delta\omega$ shamasın

$$\frac{e}{c}r\omega H + 2mr\omega\Delta\omega = 0 \quad (5)$$

teńligi orınlanatuǵınday etip saylap alatuǵın bolsaq, onda aylanıwshı sistemaǵa qarata qozǵalıstı teńlemesi mınaday túrge iye boladı:

$$mw_n = \frac{eE}{r^2}.$$

Bul ańlatpanı (4)-ańlatpa menen salıstırıp mınaǵan iye bolamız: (5)-shárt orınlanatuǵın aylanıwshı koordinata sistemasında qozǵalıstı teńlemesiniń buringı túri, al soǵan sáykes, elektronnıń traektoriyasınıń buringı túri saqlanadı. Bunnan, magnit maydanındaǵı qozǵalmaytuǵın koordinatalar sistemasında elektronnıń radiusı r ge teń bolǵan dóńgelek boyınsha, biraq ózgeriwshı $\omega + \Delta\omega$ múyeshlik tezlik penen qozǵalatuǵınlıǵı kelip shıǵadı.

$\Delta\omega$ ushın (5)-shártten mınaday ańlatpanı tabamız:

$$\Delta\omega = -\frac{eH}{2mc}. \quad (6)$$

H maydanınıń baǵıtı orbitanıń tegisligi menen iqtıyarlı múyeshti jasaytuǵın ulıwma jaǵdayda, elektron **H** vektorına salıstırǵanda $\Delta\omega$ múyeshlik tezligi menen aylanatuǵın koordinatalar sistemasındaǵı traektoriyasınıń dáslepki túrin saqlaydı. Orbitanıń usınday bolǵan ózgeriske ushırawın *precessiya*, al $\Delta\omega$ shamasın *precessiyanıń múyeshlik tezligi* dep ataydı.

Bul juwmaq Lorenc kúshiniń shaması Kulon kúshi f ten kishi bolǵanda, yaǵnıy $mr\Delta\omega^2$ aǵzasın esapqa almawǵa bolatuǵın jaǵdayda durıs.

Elektronnıń zaryadınıń teris ekenligine baylanıslı $H > 0$ teńsizligi orınlanǵan jaǵdayda (6)-formula boyınsha precessiyanıń tezligi $\Delta\omega > 0$. Ekinshi tárepten dóńgelek orbita boyınsha qozǵalatuǵın elektronnıń magnit momenti $\omega < 0$ bolǵan jaǵdayda oń bolǵanlıqtan (201-paragrafqa qarańız) biz mınaday juwmaqqı kelemiz: eger orbitanıń magnit momenti maydannıń baǵıtı menen baǵıtlas bolsa, onda sırtqı magnit maydanı elektronnıń orbita boyınsha qozǵalıstı tezliginiń san mánisiniń kemeyiwine alıp keledi. Nátiyjede aylanıwshı elektronnıń dáslepki magnit momenti de kishireydi. Solay etip, atomlar menen molekulalardıń ishinde aylanatuǵın elektronlar bar dep esaplaǵan jaǵdayda diamagnetlik effektı túsindiriwge boladı eken.

§ 215. Qozǵalatuǵın zaryadtıń magnit maydanı. Eger sırtqı magnit maydanı qozǵalatuǵın zaryadqa tásir etetuǵın bolsa, onda, óz gezeginde, qozǵalıwshı zaryad qorshaǵan ortalıqta magnit maydanın payda etedi. Bul elektr toǵınıń qozǵalatuǵın zaryadlardıń jıyaǵı hám qorshaǵan ortalıqta magnit maydanın payda etetuǵınlıǵınan kelip shıǵadı. Qozǵalıwshı zaryad tárepinen payda etiletuǵın maydannıń shamasın Bio-Savar-Laplas formulasınan kelip shıqqan halda anıqlawǵa boladı (193-paragrafqa qarańız), bul formula boyınsha uzınlıǵı Δl ge teń bolǵan toqtır element onnan r qashıqlıqta jaylasqan noqattaǵı magnit maydanınıń kernewligi

$$\Delta H = \frac{I\Delta l}{r^2} \sin \alpha$$

shamasına teń boladı. Bul ańlatpada α - toqtıń baǵıtı menen r radius-vektorınıń arasındaǵı múyesh.

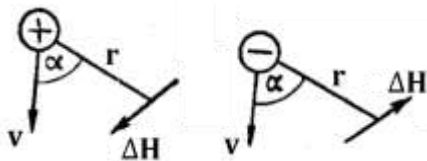
Bul teńlikke I toq kúshiniń ornına onıń qozǵalıwshı e boyınsha mánisin, olardıń kólem birligindegi sanı n_0 di hám olardıń tezligi v nı qoysaq, yaǵnıy $I = en_0vS$ teńligi orınlanadı dep boljap, mınanı alamız:

$$\Delta H = \frac{en_0vS\Delta l}{r^2} \sin \alpha.$$

Bul teńlikte S - ótkizgishtiń kese-kesiminiń maydanı. Ótkizgishtiń biz qarap atırǵan elementinde $n' = n_0S\Delta l$ dana zaryadlangan bólekshe qozǵalatuǵın bolǵanlıqtan, olardıń hár biri kernewligi

$$\Delta H = \frac{ev}{r^2} \sin \alpha \quad (1)$$

shamasına teń magnit maydanın payda etedi dep esaplawǵa boladı. Bul formulada zaryadtıń tezligi v haqqında gáp etilgende ΔH shaması ólshenetuǵın koordinatalar sistemasındaǵı tezlik názerde tutiladı.



262-súwret.

v tezligi menen qozǵalatuǵın zaryad tárepinen payda etiletuǵın ΔH magnit maydanınıń baǵıtı.

Qozǵalatuǵın zaryad tárepinen payda etiletuǵın magnit maydanınıń ΔH kernewlik sızıqları bóleksheniń tezliginiń vektorı v hám r radius-vektorı jatqan tegislikke perpendikulyar. Oń zaryadqa iye bólekshe qozǵalganda kernewlik ΔH tiń baǵıtı burǵı qaǵıydası boyınsha anıqlanadı: eger v nıń baǵıtı burǵınıń ilgerilemeli qozǵalıwınıń baǵıtına sáykes keletuǵın bolsa, onda onıń tutqasınıń aylanıw baǵıtı ΔH tiń baǵıtın beredi, al teris belgige iye zaryad qozǵalatuǵın bolsa, onda ΔH tiń baǵıtı qarama-qarsı boladı (262-súwret). Usı paragrafta keltirilgen (1)-formula oǵan kiretuǵın barlıq shamalardıń birdey bolǵan birlikler sistemasında ólshengen jaǵday ushın durıs (yaǵnıy shamalardıń *CGSM*- yamasa *CGSE*-sistemalarında ólshengenliginen ǵárezsiz).

Bul jaǵdaydıń orın alıw sebebi mınalardan ibarat: hesh qanday sanlı koefficientke iye bolmaǵan Bio-Savar-Laplas formulası *CGSM*-sistemasında da, *CGSE*-sistemasında da durıs. Al Amper formulası bolsa tek *CGSM*-sistemasında sanlı koefficientke iye emes (195-paragrafqa qarańız), sonlıqtan Lorenc formulası (214-paragraf) tek *CGSM*-sistemasında ǵana durıs; al *CGSE*-sistemasında bolsa formulaniń oń tárepinde $1/c^2$ kóbeytiwshisiniń turıwı kerek.

Eger aralas sistemadan paydalanatuǵın hám e zaryadtı *CGSE*-birliklerde, ΔH te erstedlerde, v nı *sm/sek* lerde hám r di santimetrlerde ólshesek, onda (1)-formulanıń oń bólimine $1/c$ koefficientin kirgiziw kerek boladı:

$$\Delta H = \frac{1}{c} \frac{ev}{r^2} \sin \alpha. \quad (1a)$$

(1a) formula qozǵalıwshı zaryadtan r qashılıǵında turǵan noqattaǵı maydannıń kernewligin anıqlaydı. Biraq, (1a) boyınsha alınǵan ΔH tiń mánisi r diń júdá úlken bolmaǵan hám v tezliginiń júdá úlken bolmaǵan mánisleri ushın ǵana durıs. Al basqa jaǵdaylarda elektromagnit maydanınıń tarqalıw tezliginiń shekli ekenligin dıqqatqa alıw kerek.

Lorenc formulası sıyaqlı (1a) formulanı da, vektorlıq formada jazıwǵa boladı. 262-súwrette kórsetilgende, ΔH magnit maydanınıń baǵıtı $[v \times r]$ vektorlıq kóbeymeniń baǵıtınday. Bunnan:

$$\Delta H = \frac{e}{c} \frac{[v \times r]}{r^3} \quad (2)$$

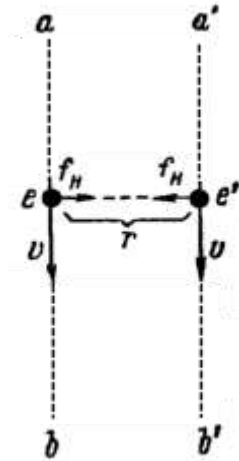
formulası kelip shıǵadı.

Eki zaryad bir waqıtta qozǵalatuǵın jaǵdayda, olardıń arasındaǵı elektrlik óz-ara tásirlesiwden

basqa magnitlik óz-ara tásirlesiw kúshi de payda boladı. Sebebi zaryadlardıń hár qaysısı ózin qorshaǵan ortalıqta magnit maydanın payda etedi, al ekinshi zaryad bolsa sol magnit maydanında qozǵaladı. Bul kúshlerdiń shamaların salıstıramız. Onıń ushın bir birinen r qashıqlıǵında jaylasqan, belgileri birdey bolǵan eki e hám e' zaryadların qaraymız. Olar bir biri menen Kulon nızamı boyınsha

$$f_e = \frac{ee'}{r^2} \quad (3)$$

kúshi menen tásir etisedi. Usınday túrde Kulon nızamı birden ózgeshe bolǵan proporcionallıq koefficientine iye emes, yaǵnıy nızam e hám e' zaryadları CGSE-sistemada berilgen degen boljamnıń tiykarında jazılǵan.



263-súwret.

Qozǵalıwshı zaryadlardıń arasındaǵı óz-ara tásirlesiw kúshin esaplawǵa.

Zaryadlardıń ekewi de ab hám $a'b'$ tuwrısı boylap, birdey v tezligi menen qozǵaladı dep boljayıq (263-súwret). Bunday jaǵdayda (1a) formulası boyınsha e zaryadı ekinshi zaryad jaylasqan orında kernewligi CGSE-sistemada

$$H = \frac{1}{c} \cdot \frac{ev}{r^2}$$

túrinde jazılatuǵın magnit maydanın payda etedi. Bul maydan $\mathbf{v}$ hám $\mathbf{r}$ vektorları jatatuǵın tegislikke perpendikulyar baǵıtlanǵan.

Lorenc formulası boyınsha [214-formuladaǵı (Za) formula], bul maydan e' zaryadına

$$f_H = \frac{1}{c} e' v H = \frac{ee'}{r^2} \left(\frac{v}{c}\right)^2 \quad (4)$$

kúshi menen tásir etedi, qala berse, bul kúsh e zaryadına qaray baǵıtlanǵan. SHaması boyınsha tap usınday kúsh penen e' zaryadı e zaryadına tásir etedi. Solay etip, turaqlı tezlik penen bir birine parallel baǵıtta qozǵalatuǵın eki zaryad bir biri menen Kulon kúshi menen bir qatarda qosımsha magnitlik kúsh penen de tásir etisedi.

(4)- hám (3)- magnit hám kulonlıq kúshlerdi bir biri menen salıstırıp, mınanı alamız:

$$\frac{f_H}{f_e} = \left(\frac{v}{c}\right)^2. \quad (5)$$

Eki kúshtiń qatnası f_H/f_e ólshem birligine iye bolmaǵanlıqtan, (5)-formuladan elektrodinamikalıq turaqlı bolǵan c shamasınıń tezliktiń birligine teń ekenligi ayrıqsha kórgizbeli túrde kelip shıǵadı.

Joqarıda kórsetkenimizdey (195-paragrafqa qarańız), c elektrodinamikalıq turaqlısınıń san mánisiniń boslıqtaǵı jaqtılıqtıń tezligine teń. Bul jaǵdayda názerde tutıp, (4)- hám (5)- formulalardan zaryadlardıń magnitlik óz-ara tásirlesiw kúshiniń shamasınıń olardıń tezligi v nıń elektromagnit tolqınlarınıń tezligi c ǵa qatnasınıń kvadrati boyınsha anıqlanatuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Kópshilik jaǵdaylar ushın $v \ll c$ teńsizligi orınlanatuǵın bolǵanlıqtan, zaryadlardıń arasındaǵı magnitlik tásirlesiwdiń shaması kulonlıq kúshtiń shamasına salıstırǵanda kishi.

(4)-formula boyınsha anıqlanatuǵın zaryadlardıń arasındaǵı magnitlik kúsh penen óz-ara tásirlesiwdiń bar bolıwınıń nátiyjesinde bir baǵıtta toq ótip turǵan ótkizgishler bir birine tartıadı.

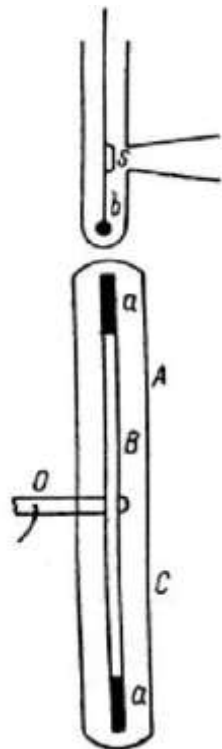
§ 216. Qozǵalatuǵın zaryadlardıń magnit maydanın eksperimentallıq úyreniw. Tájiriybelerde qozǵalıwshı zaryadlardıń magnit maydanınıń tabılıwı tariyxıy jaqtan úlken áhmiyetke iye boldı. Bul ótkizgishlerdegi elektr toǵınıń zaryadlardıń aǵıp ótiliwi degen kóz-qarastı tastıyıqladı. Usınıń menen birge, qozǵalıwshı zaryadlardıń magnit maydanın úyreniwdiń nátiyjeleri elektromagnit maydanniń teoriyasınıń, sonıń ishinde efir teoriyasınıń rawajlanıwına alıp keldi.

Qanday da bir makroskopiyalıq zaryadlangan deneniń qozǵalıwı menen baylanıslı bolǵan elektr toǵın *konvekciyalıq toq* dep ataydı.

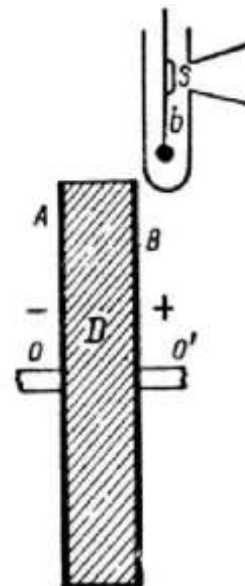
Konvekciyalıq toqtıń magnit maydanın eń tereń izertlew XX ásirdeń basında Moskva universitetiniń professorı A.A.Eyxenvald tárepinen ámelge asırıldı.

Eyxenvald tájiriybesiniń sxeması tómendegilerden ibarat. Izolyaciycıyalawshı materialdan soǵılǵan dóńgelek B plastinkası saqıyna tárizli a staniol astardıń betine jelimlengen. Plastinka aylanatuǵın hám sırǵanawshı kontaktqa iye O kósherine bekitilgen, sonıń járdeminde a astarı batareyadan belgili bolǵan turaqlı potencialǵa shekem zaryadlanadı. a astarı kondensatordıń plastinkalarınıń biri bolıp xızmet etedi; kondensatordıń ekinshi plastinkası bolıp qozǵalmaytuǵın, sonıń menen birge elektrostatikalıq qorǵawdıń da ornın iyeleytuǵın AC metall qutı xızmet etedi. B diski a saqıyna menen birge tez aylanıwǵa alıp kelinedi.

Solay etip, a saqıynasında toplanǵan elektr zaryadı qozǵalısta boladı hám qorshaǵan ortalıqta magnit maydanın qozdıradı. Bul maydanniń kernewligi H uzın hám jıńışke sabaqqa ildirilgen b magnit strelkasınıń járdeminde ólshenedi. Strelkanıń burılıwı sol sabaqqa bekitilgen kishkene s aynada shaǵılısqan jaqtılıq nurınıń burılıwı menen ólshenedi. Elektr maydanınıń tásirinde payda bolatuǵın tásirlerdi joq etiw ushın magnit strelkası metall qaptıń ishinde jaylastırıladı. Usınday jollar menen ólshengen magnit maydanınıń kernewliginiń shaması 215-paragraftaǵı (1)-formula menen esaplangan mániske tolıq sáykes kelgen.



264-súwret. Eyxenvald tájiriybesiniń sxeması.



265-súwret. Qozǵalatuǵın dielektriktiń magnit maydanın anıqlaw boyınsha Eyxenvaldtıń tájiriybesiniń sxeması.

Dielektrik polyarizaciyalanganda onıń betinde payda bolatuǵın betlik zaryadlardıń qozǵalıwınıń saldarınan payda bolatuǵın magnit maydanı da prof. A.A.Eyxenvald tárepinen eksperimentallıq izertlendi. Óziniń tájiriybesiniń variantlarınıń birinde Eyxenvald A hám B dóńgelek plastinkalarınan turatuǵın hám olardıń ortasında D dielektrik bolǵan kondensatordı OO' kósheriniń dóğereginde aylanısqa keltirdi (265-súwret). Kondensatordıń barlıq bólimi dielektrik penen birge pútini menen aylandı. Meyli, b magnit strelkası astarlardıń birine júdá jaqın jaylasqan bolsın hám bul jaǵdayda bul strelka tek bir astardıń hám dielektriktiń oǵan jaqın jaylasqan beti tárepinen payda etiletuǵın magnit maydanın ǵana ólsheytuǵın bolsın. Kondensator $V_1 - V_2$ potenciallar ayırmasına shekem zaryadlangan bolsın. Bunday jaǵdayda onıń astarlarında betlik tıǵızlıǵı

$$\sigma = C(V_1 - V_2)\varepsilon \quad (1)$$

shamasına teń bolǵan zaryadlar payda boladı. Bul teńlikte ε - astarlardıń arasındaǵı ortalıqtırnıń dielektriklik turaqlısı, al C - kondensatordıń tek ólshemleri menen geometriyalıq formasınan ǵárezli bolǵan turaqlı. Plastinkaǵa tiyip turǵan dielektriktiń betinde keri belgige iye betlik zaryadlar payda boladı. 139-paragrafta ayılǵanlar boyınsha, bul zaryadlardıń tıǵızlıǵı σ' mınaǵan teń boladı:

$$\sigma' = \frac{4\pi\chi\sigma}{\varepsilon}.$$

Bul teńlikte χ - polyarizaciya koefficienti. Polyarizaciya koefficienti χ dielektriktik túraqılı ε menen $\varepsilon = 1 + 4\pi\chi$ qatnası boyınsha baylanısqa bolǵanlıqtan, sońǵı ańlatpanı bilayınsha kóshirip jazıwǵa boladı:

$$\sigma' = \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \sigma.$$

Eger, σ nıń ornına (1)-formula boyınsha onıń mánisin qoysaq mınaday teńlikke iye bolamız:

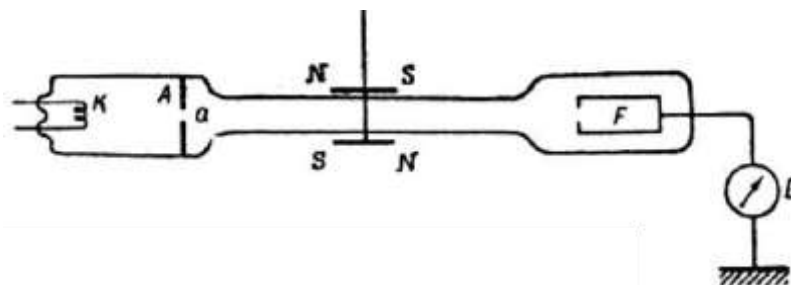
$$\sigma = C(V_1 - V_2)(\varepsilon - 1). \quad (2)$$

Zaryadlardıń tıǵızlıǵı σ menen σ' ler qarama-qarsı belgilerge iye boladı. Sonlıqtan, plastinkalar qozǵalǵanda olar bir birine qarama-qarsı baǵıtlangan magnit maydanların payda etedi. Magnit maydanınıń qosındı kernewligi H zaryadlardıń tıǵızlıqlarınıń ayırması $\sigma - \sigma'$ boyınsha anıqlanadı.

(1)- hám (2)-teńlikler boyınsha

$$\sigma - \sigma' = C(V_1 - V_2).$$

Kórinip turǵanıday, tıǵızlıqlardıń ayırması $\sigma - \sigma'$ dielektriklik turaqlı bolǵan ε shamasınan ǵárezli emes. Solay etip, berilgen ólshemlerge hám formaǵa iye bolǵan berilgen potenciallar ayırması $V_1 - V_2$ de dielektriktiń polyarizaciyasına baylanıslı magnit maydanın payda etetuǵın qosındı zaryadtıń muǵdarı dielektriktiń tábiyatınan ǵárezli emes eken. Haqıyqatında da, Eyxenvald bazı bir $V_1 - V_2$ potenciallar ayırmasına shekem zaryadlangan zaryadlangan A hám B disklerin aylandırǵanda olar payda etken magnit maydanı olardıń arasında qanday D dielektriktiń jaylasqanlıǵınan ǵárezsiz ekenligin anıqladı. Bunnan, polyarizaciyalangán dielektriktiń baylanısqa zaryadların qozǵalıwınıń saldarınan qorshaǵan ortalıqta magnit maydanın payda bolatuǵınlıǵı dálillendi.



266-súwret. Elektronlıq dásteniń magnit maydanın anıqlaw boyınsha Ioffeniń tájiriyesiniń sxeması.

Eń aqırında, erkin qozǵalatuǵın elektronlardıń magnit maydanı akademik A.F. Ioffe tárepinen ólshendi. Qızdırılǵan K katodi (266-súwret) elektronlardıń deregi bolıp xızmet etti, olar K katodi menen A anodınıń arasında tezletilgen. Bunnan keyin elektronlardıń ayırımları a tesigi arqalı ótkennen keyin teń ólsheuli qozǵaladı. Jolınıń aqırında olar Faradey cilindri F tiń ishine kelip túsedı hám oǵan óziniń zaryadın beredi; bul elektronlar payda etken toq G galvanometri tárepinen ólshengen. Trubkanıń oraylıq bóliminiń qasında magnitlerdiń astatikalıq sisteması qoyılǵan. Elektronlar dástesi tárepinen qozdırılǵan magnit maydanı bul magnitlerdiń burılıwına alıp keldi.

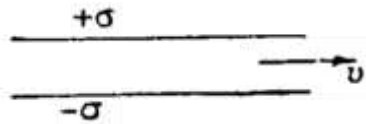
Elektronlardıń dástesin elektr toǵı ótip turǵan sim menen de almasırwǵa boladı. Strelkalardıń tap sonday burılıwın alıw ushın elektronlar dástesi bolǵan jaǵdayda sim arqalı G galvanometriniń járdeminde ólshengendey toqtı ótkeriw kerek. Solay etip, magnit maydanın qozdırıwı boyınsha elektronlıq dáste menen ádettegi ótkizgishlik toǵınıń arasındaǵı ekvivalentlik dálillendi.

215-paragraftaǵı formulalarda zaryadtıń tezligi bolǵan v shaması haqqında aytqanda *f kúshi ólshenip atırǵan koordinatalar sistemasındaǵı tezliktiń názerde tutılatsuǵınlıǵın atap* ótiw áhmiyetli. XIX ásirdeń aqırında elektromagnitlik processlerdiń alıp júriwshileri sıpatında barlıq keńislikti tutas ortalıq sıpatında toltırıp turatuǵın efir qabıl etilgen edi. Bunday kóz-qaraslarǵa baylanıslı magnit maydanı zaryadlardıń efirge salıstırǵandaǵı qozǵalıwınıń saldarınan júzege keliwi kerek. Sonlıqtan, zaryadlardıń magnit maydanın baqlaw efirge salıstırǵandaǵı tezlikti anıqlawǵa múmkinshilik beredi dep esaplandı. Efir biziń baqlawlarımızdıń ótkeriliwi múmkin bolǵan barlıq keńislikti toltırıp turatuǵın ortalıq dep esaplanǵanlıqtan, oǵan (efirge) salıstırǵandaǵı qozǵalıstıń absolyut qozǵalı bolıp esaplanıwı kerek. Mexanikalıq salıstırmalıq principi boyınsha (I tom, 19-paragraf) mexanikalıq processlerdiń járdeminde absolyut ilgerilemeli qozǵalıstı tabıw múmkin emes.

215-paragrafta biz birdey v tezligi menen parallel traektoriya boyınsha eki e hám e' zaryadlarınıń qozǵalıwın qaradıq. Bunday zaryadlar Kulon kúshi menen bir qatarda

$$f_H = \frac{ee'}{r^2} \left(\frac{v}{c} \right)^2 \quad (3)$$

magnit kúshi menen de tásirlesedi. Bunday jaǵdayda mınaday alternativa ayırıqsha túsinikli - magnit maydanınıń payda bolıwı: 1) zaryadtıń f kúshi ólshenip atırǵan koordinatalar sistemasındaǵı salıstırmalı qozǵalıwı menen yamasa 2) efirge salıstırǵandaǵı qozǵalıwı menen baylanıslı. Haqıyqatında da, eger zaryadlardıń ekewi de ózleri menen birge qozǵalatuǵın koordinatalar sistemasında magnit kúshlerin payda etpewi kerek. Ekinshi jaǵdayda tuwrı sızıqlı hám teń ólsheuli qozǵalatuǵın koordinatalar sistemasına salıstırǵanda tinishliqta turǵan zaryadlar bolǵan jaǵdayda da magnit kúshleriniń bar bolıwı kerek. Meyli, Jer sharındaǵı laboratoriyada oǵan salıstırǵanda qozǵalmaytuǵın zaryadlar bar bolsın. Jer sharı sutkalıq hám jıllıq qozǵalıslarǵa qatnasadı hám Quyash sisteması menen birgelikte basqa juldızlarǵa salıstırǵanda da qozǵaladı. Usı jaǵdayǵa baylanıslı mınaday soraw tuwıladı: Kulon kúshinen basqa zaryadlardıń arasındaǵı basqa da qosımsha óz-ara tásirlesiw kúshleri bola ma? Birinshi boljaw boyınsha bunday tásirlesiwdiń bolıwı múmkin emes, al ekinshi boljaw boyınsha qosımsha kúshtiń bolıwı kerek. Bul kúshti tikkeley anıqlawdıń múmkinshiligi joq: (3)-formuladan kórinip turǵanıday, onıń shaması Kulon kúshinen $\left(\frac{v}{c} \right)^2$ kóbeytiwshisi menen ayrıladı. Bul kóbeytiwshide v -zaryadlardıń tezligi, al c - elektromagnit tolqınlardıń (solardıń ishinde jaqtılıqtıń) boslıqtaǵı tarqalıw tezligine teń elektrodinamikalıq turaqlı. Jaqtılıqtıń tezligi júdá úlken bolǵanlıqtan ($3 \cdot 10^{10}$ sm/sec), bul qatnastıń júdá kishi bolatuǵınlıǵın biz atap óttik. Biraq, usınday jaǵdaylarǵa qaramastan, tájiriyebeń qosımsha kúshler tabılatsuǵınday variantın oylap tabıwǵa boladı. Bul tájiriyebe 1904-jılı Truton hám Nobl tárepinen usınıldı hám ámelge asırıldı.



267-súwret.

Truton menen Nobldiń tájiriýbesiniń sxeması.

v tezligi menen astarlarına parallel baǵıtta qozǵalatuǵın tegis kondensatordı qaraymız (267-súwret). Eger kondensator zaryadlangan bolsa, onda onıń plastinkalarınıń hár biri qorshaǵan ortalıqta magnit maydanın payda etedi. 215-paragraftaǵı (1a) formulası boyınsha kondensatordıń plastinkalarınıń arasındadı magnit maydanınıń kernewligi H tıń mánisi (kondensatorlardıń astarlarınıń zaryadlarınıń betlik tıǵızlıqları $+\sigma$ hám $-\sigma'$ shamalarına teń hám olardıń arasındadı ortalıqtıń magnit sińirgishligi $\mu = 1$ bolǵan jaǵdayda)

$$H = \frac{4\pi}{c} \sigma v$$

shamasına teń.

Usınıń menen birge, kondensatordıń plastinkalarınıń arasında kernewligi

$$E = 4\pi\sigma$$

shamasına teń elektr maydanı da bar (plastinkalardıń arasındadı ortalıqtıń dielektriklik turaqlısı $\varepsilon = 1$ shamasına teń).

Kondensatordan sırtta eki maydanniń kernewlikleri nolge teń. 138-paragrafta elektrostatikalıq maydanniń kólemlik tıǵızlıǵı $ED/8\pi$ shamasına teń energiyaǵa iye bolatuǵınlıǵın kórdik.

Bunnan barlıq kondensatordıń elektr energiyasınıń mınaǵan teń ekenligin alamız:

$$W_e = 2\pi\sigma^2 V.$$

Bul teńlikte V arqalı kondensatordıń plastinalarınıń arasındadı keńisliktiń kólemi belgilengen.

227-paragrafta magnit maydanınıń kólemlik tıǵızlıǵı $HB/8\pi$ shamasına teń energiyaǵa iye bolatuǵınlıǵın kóremiz. Bunnan kondensatordıń magnitlik energiyası mınaǵan teń boladı:

$$W_m = 2\pi\sigma^2 \left(\frac{v}{c}\right)^2 V.$$

Demek, kondensatordıń tolıq energiyası

$$W = W_e = W_m = 2\pi\sigma^2 V + 2\pi\sigma^2 \left(\frac{v}{c}\right)^2 V$$

shamasına yamasa

$$W = W_e \left[1 + \left(\frac{v}{c}\right)^2 \right]. \quad (4)$$

shamasına teń.

Eger v tezligi menen kondensatordıń astarlarınıń arasındadı múyesh α ge teń bolsa, onda tezliktiń astarlardı parallel bolǵan proekciyasın alıw kerek. Nátiyjede (4)-formula mınaday túrge enedi:

$$W = W_e \left[1 + \left(\frac{v}{c}\right)^2 \cos^2 \alpha \right]. \quad (4a)$$

Solay etip, kondensatordıń energiyası α múyeshinen ǵárezli boladı hám $\alpha = \frac{\pi}{2}$ teńligi orınlanganda, yaǵnıy kondensator qozǵalıstıń baǵıtına perpendikulyar jaylasqanda minimumǵa iye boladı. Energiyanıń minimumına eń ornıqlı hal sáykes keledi, sonlıqtan kondensator $\alpha = \frac{\pi}{2}$ teńligi orınlanatuǵınday halǵa qaytıp keliwge tırsadı. Onı buratuǵın kúshlerdiń jubınıń momenti keri belgi menen alınǵan energiyanıń α múyeshi boyınsha alınǵan tuwındısına teń:

$$M = -\frac{\partial W}{\partial \alpha} = W_e \left(\frac{v}{c}\right)^2 \sin 2\alpha.$$

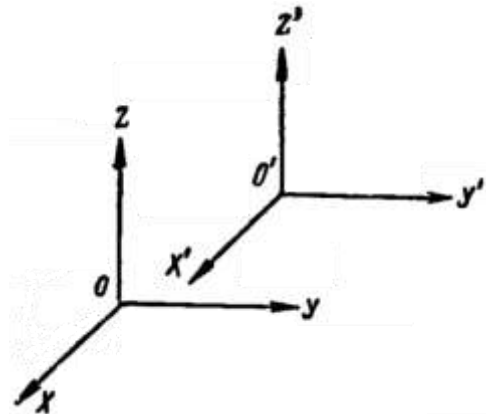
Truton hám Nobl usınday momenttiń bar ekenligin bılayınsha anıqlawǵa tırıstı: Úlken bolmaǵan kondensator uzın hám jıńışke sabaqqa ildirip qoyıldı. Kondensator potenciallar ayırması 3000 v ke shekem zaryadlandı. Kondensatorǵa jabıstırılǵan aynada shaǵılısqan jaqtılıq dástesiniń járdeminde olar onıń aylanbalı terbelislerin baqlaǵan. Bunnan olar kondensatordıń teń salmaqlıq awhalın anıqlaǵan. Bul teń salmaqlıq halı sabaqtıń serpimli qásiyeti menen hám M momentiniń bar bolıwı menen baylanıslı. Jerdiń efirge salıstırǵandaǵı qozǵalıstıń tezligi menen baǵıtı belgili emes. Biraq, qanday bolǵanda da, Jerdiń óziniń kósheriniń dógereginde sutkalıq aylanıwınıń nátiyjesinde α múyeshiniń mánisi ózgeredi hám, soǵan sáykes, kondensatordıń teń salmaqlıq halı ózgeredi. Baqlawlar sutkanıń ishinde hesh qanday sistemalıq awısıwlarıń baqlanbaytuǵınlıǵın kórsetti. Sutkalıq awısıwlar shaması jaǵınan Jerdiń efirge

salıstırğanda 12 km/sek shamasındağı qozğalisına sáykes keletuğın awısıwlardan úlken emes. Haqıyqatında, Jerdiń Quyashtıń dógeregindegi orbitalıq qozğalisınıń tezligi 30 km/sek qa teń. Tájiriybeler jıldıń hár qıylı waqıtları qaytalandı, sonlıqtan Jerdiń jıldıń hár qıylı máwsimlerdegi tezligi menen keńisliktegi pútkil Quyash sistemasınıń qozğalislarınń óz-ara kompensacıyalanıwı máselesi joğaldı. Keyinirek bul tájiriybe bir neshe ret qaytalandı. 1926-jılı Tomashek Truton menen Nobldiń usılınıń sezgirliğin sonday dárejede joğalttı, hátte Jerdiń efirge salıstırğandağı 0,5 km/sek tezligi menen qozğalisın tabıwdıń múmkinshiligi tuwıldı. Tomashektiń barlıq baqlawlarında M momentiniń bar ekenligi tabılmadı.

Solay etip, ótkerilgen baqlawlar zaryadlarıń magnit maydanınıń usı maydan ólshenetuğın sistemağa salıstırğanda payda bolatuğınlığın kórsetti. Elektromagnit qubılısları menen ótkerilgen tájiriybeler taza mexanikalıq tájiriybeler sıyaqlı sistemaniń keńisliktegi absolyut teń ólshewli qozğalisın tabıwğa múmkinshilik bermeydi. Efir esaplaw sisteması xızmetin atqara almaydı (152-paragrafta ayılğanlar menen salıstırınız). Keyinirek biz (III tom) jaqtılıq qubılısların baqlawdıń da absolyut teń ólshewli qozğalistı tabıwğa múmkinshilik bermeytuğınlığın kóremiz. Bul faktlerdiń barlığı da Eynshteynniń salıstırmalı qozğalistıń tutqan ornın tolıq ashıp bergen salıstırmalı teoriyasında ulıwmalastırıldı.

Salıstırmalıq teoriyasınıń mazmunın biz tolığraq III tomda qaraymız. Bul jerde biz tek fizikalıq processlerdiń esaplaw sistemalarınń salıstırmalı tezliginen gárezligi biziń barlıq bilimlerimizdi salıstırmalı dep esaplaytuğın jalğan filosofiyalıq relyativizm menen hesh qanday baylanısqa iye emes. Salıstırmalıq teoriyası aqırğı esapta fizikalıq nızamlardıń qanday esaplaw sistemasına qarata gárezli emes ekenligin ashıp kórsetedi (bir birine salıstırğanda tuwrı sızıqlı hám teń ólshewshi qozğalatuğın bir esaplaw sistemasınan ekinshisine ótkendege invariant yamasa "kovariant" dep atalatuğın nızamlardıń túrin anıqlawğa múmkinshilik beredi).

268-súwret.
Eki koordinatalar sisteması.



Eki esaplaw sistemasın kóz aldımızğa elesleteyik: XYZ hám $X'Y'Z'$ (268-súwret). Meyli $X'Y'Z'$ sisteması XYZ sistemasına salıstırğanda turaqlı $\mathbf{v}$ tezligi menen qozğalatuğın bolsın. XYZ sistemasında ólshengen elektr hám magnit maydanınıń kernewliklerin $\mathbf{E}$ hám $\mathbf{H}$ arqalı, al $X'Y'Z'$ sistemasında ólshengen kernewliklerdi $\mathbf{E}'$ hám $\mathbf{H}'$ arqalı belgileyik. Meyli, $X'Y'Z'$ sistemasında usı esaplaw sistemasındağı elektr hám magnit maydanlarındğı kernewlikleri $\mathbf{E}'$ hám $\mathbf{H}'$ bolğan elektr hám magnit maydanlarınıń derekleri bar bolsın. Bunday jağdayda $X'Y'Z'$ sistemasındağı XYZ sistemasına salıstırğanda qozğalmaytuğın e zaryadına tásir etetuğın kúshitiń shaması Lorenc formulası boyınsha mınadan teń:

$$\mathbf{f}' = \mathbf{H}'e + \frac{1}{c}e[\mathbf{H}' \times \mathbf{v}] \quad (5)$$

214-paragraftağı (Zv) formulasına salıstırğanda bul ańlatpada vektorlıq kóbeymedegi kóbeytiwshilerdiń tártibi ózgergen, sebebi e zaryadınıń $X'Y'Z'$ sistemasına salıstırğandağı tezligi $-\mathbf{v}$ ğa teń.

Eger v tezligi jaqtılıqtıń tezligi c ğa salıstırğanda kishi bolsa, onda $\mathbf{f}'$ kúshi XYZ sistemasında ólshenetuğın $\mathbf{f}$ kúshine teń. Solay etip, XYZ koordinatalar sistemasında usı sistemağa salıstırğanda qozğalmaytuğın e zaryadına mınaday kúsh tásir etedi:

$$\mathbf{f} = \mathbf{E}'e + \frac{1}{c}e[\mathbf{H}' \times \mathbf{v}]. \quad (5a)$$

Elektrostatikada elektr maydanınıń kernewligi zaryadqa tásir etetuǵın f kúshiniń zaryadtıń shamasına qatnasına teń: f/e . Sonlıqtan, (5a) formulası tárepinen beriletuǵın f kúshiniń bar bolıwı XYZ sistemasında kernewligi

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}' + \frac{1}{c} [\mathbf{H}' \times \mathbf{v}] \quad (6)$$

shamasına teń elektr maydanınıń bar bolıwına ekvivalent.

Tap sol XYZ koordinatalar sistemasında maydannıń H' kernewliginen basqa $X'Y'Z'$ sistemasına salıstırǵanda qozǵalmaytuǵın e' zaryadınıń XYZ sistemasına salıstırǵanda $\mathbf{v}$ tezligi menen qozǵalatuǵınlıǵına baylanıslı qosımsha magnit maydanı boladı. Bul qosımsha magnit maydanınıń kernewligi mınaǵan teń:

$$\mathbf{H}_1 = \frac{e' [\mathbf{v} \times \mathbf{r}]}{c r^3} = \frac{1}{c} \left[\mathbf{v} + \frac{e' \mathbf{r}}{r^3} \right].$$

Biraq, $e' \mathbf{r}/r^3$ shaması $X'Y'Z'$ sistemasında e' zaryadınan r qashılıǵında turǵan noqatta ólshengen elektr maydanınıń kernewligi $\mathbf{E}'$ bolıp tabıladı.

Solay etip:

$$\mathbf{H}_1 = \frac{1}{c} [\mathbf{v} + \mathbf{E}']$$

hám, demek, XYZ sistemasındaǵı magnit maydanınıń tolıq kernewligi H mınaǵan teń:

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}' + \frac{1}{c} [\mathbf{v} + \mathbf{E}']. \quad (7)$$

(6)- hám (7)-formulalar bir birine salıstırǵanda qozǵalatuǵın eki sistemada ólshengen elektr hám magnit maydanlarınıń kernewlikleriniń arasında baylanıstır bar ekenligin kórsetedi. Olar salıstırmalı qozǵalıstır qálegen jaǵdayın tallawǵa múmkinshilik beredi.

Mısalı, $X'Y'Z'$ sistemasında usı sistemaǵa salıstırǵanda qozǵalmaytuǵın tek bir e' zaryadı bolsın. Bul sistemada zaryadtan $\mathbf{r}$ qashılıǵındaǵı bazı bir B noqatındaǵı elektr maydanınıń kernewligi $\mathbf{E}' = \frac{e' \mathbf{r}}{r^3}$ shamasına teń boladı. $X'Y'Z'$ sistemasında hesh qanday magnit maydanı bolmaydı ($H' = 0$). Demek, eger sol B noqatına $X'Y'Z'$ sistemasına salıstırǵanda qozǵalmaytuǵın basqa e zaryadın jaylastırısaq, onda zaryadlardıń arasında Kulonlıq kúshden basqa kúsh tásir etpeydi ($X'Y'Z'$ sisteması XYZ sistemasına salıstırǵanda $\mathbf{v}$ tezligi menen qozǵalatuǵın bolsa da). Bul Truton menen Nobldiń tájiriybesiniń shártine hám onıń kútilgen nátiyjeni bermewine sáykes keledi.

XYZ sistemasında bolsa, (7)-formula boyınsha elektrlik kúsh penen bir qatarda kernewligi

$$\mathbf{H} = \frac{1}{c} [\mathbf{v} \times \mathbf{E}'] = \frac{1}{c} \left[\mathbf{v} + \frac{e' \mathbf{r}}{r^3} \right] \quad (8)$$

añlatpasınıń járdeminde anıqlanatuǵın magnit maydanı da bar boladı.

Bul maydandı B noqatına magnit strelkasın qoyıw jolı menen tabıwǵa boladı. Bunday sxema Eyxenvald tájiriybesine sáykes keledi: koordinatalar sistemasına salıstırǵanda qozǵalatuǵın zaryad usı sistemada magnit maydanın payda etedi.

Eń aqırında, B noqatına magnit strelkasınıń e zaryadın qoyıwǵa boladı. Eger bul zaryad XYZ sistemasına salıstırǵanda tınıshlıqta turǵan bolsa, onda oǵan (6)-añlatpa boyınsha tek kernewligi $\mathbf{E} = \mathbf{E}'$ bolǵan elektr maydanı tásir etedi. Bul qozǵalmaytuǵın elektr zaryadlarınıń magnit maydanın payda etpeytuǵınlıǵın faktına sáykes keledi. Eger e zaryadın XYZ sistemasına salıstırǵanda $\mathbf{v}_1$ tezligi menen qozǵalıwǵa májbúrlese, onda Lorenc formulası boyınsha bul zaryadqa jáne

$$\mathbf{f} = \frac{e}{c} [\mathbf{v}_1 \times \mathbf{H}] \quad (9)$$

kúshi de tásir etedi.

Eger $\mathbf{v}_1$ tezlik vektorın $\mathbf{v}$ vektorına teńlestirsek, onda e zaryadı e' zaryadına salıstırǵanda tınıshlıqta turadı, biraq olardıń ekewi de XYZ sistemasında parallel tuwrılar boyınsha birdey tezlikler menen qozǵaladı. Eger, ápiwayılıq ushın, $\mathbf{v}$ tezligin $\mathbf{r}$ ge perpendikulyar dep boljasaq, onda (8)-formula mınaday túrge

$$H = \frac{1}{c} \frac{e' v}{r^3},$$

al, (9)-formula mınaday túrge enedi:

$$f = \frac{ee'}{r^2} \left(\frac{v}{c} \right)^2.$$

Bul formula (3)-formula menen birdey hám birdey baǵıtta toq ótip turǵan ótkizgishlerdiń bir birine tartısıwına sáýkes keledi.

Maydanlardı túrlendiriw formulaları bolǵan, (6)- hám (7)-formulalar zaryadlardıń qozǵalı tezligi v jaqtılıqtıń tezligi c dan kishi bolǵan jaǵdaylarda ǵana durıs. Salıstırmaıq teoriyası bolsa qálegen tezlikler ushın durıs bolǵan bir esaplaw sistemasınan ekinshisine ótiwdiń ulıwmalıq formulaların beredi.

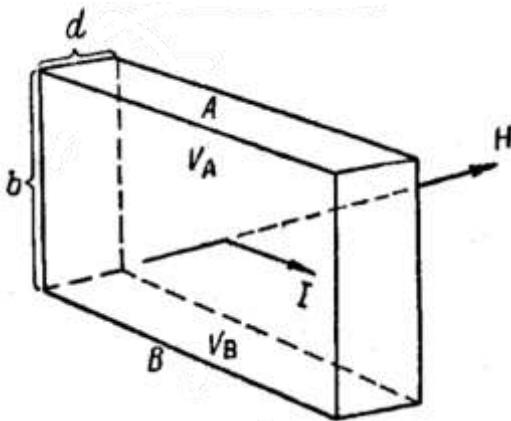
§ 217. Xoll effekti. Magnit maydanında qozǵalatuǵın elektr zaryadına tásir etetuǵın kúshiń bolıwı mınaday qubılıstı túsindire aladı: sırtqı H maydanına perpendikulyar qoyılǵan ótkizgish plastinka arqalı I toǵı ótkende (269-súwret) plastinkanıń A hám B shetleriniń arasında $V_A - V_B$ potencıallar ayırması payda boladı. Bul qubılıstı Xoll effekti dep ataydı.

Payda bolǵan $V_A - V_B$ potencıallar ayırması toqtıń kúshi menen magnit maydanınıń kernewliginiń kóbeymesi IH qa hám plastinkanıń qalınlıǵı d ǵa keri proporcional:

$$V_A - V_B = K \frac{IH}{d}. \quad (1)$$

But formulada K turaqlı shama bolıp tabıladı.

Eger toq e zaryadlarınıń qozǵalı menen baylanıslı bolsa, onda H magnit maydanında olarǵa toqtıń baǵıtına perpendikulyar baǵıtta Lorenc kúshi tásir etedi. Usınıń nátiyjesinde, bul zaryadlar payda bolǵan elektr maydanı magnit kúshin teńlestirgenshe plastinkanıń A shetine jıynaladı.



269-súwret.
Magnit maydanında $V_A - V_B$ potencıallar ayırmasıń payda bolıwı.

Biz qarap atırǵan jaǵdayda ($\alpha = \frac{\pi}{2}$) Lorenc formulası boyınsha [214-paragraftaǵı (3)-formula] zaryadqa tásir etetuǵın kúsh mınaǵan teń:

$$f_H = e\bar{v}H.$$

Bul teńlikte $\bar{v}$ - toqtıń tarqalıw baǵıtındaǵı zaryadlardıń qozǵalısinıń ortasha tezligi.

$V_A - V_B$ potencıallar ayırmasıń payda bolıwı menen baylanıslı payda bolǵan elektr maydanınıń kernewligi

$$E = \frac{V_A - V_B}{b}$$

formulasınıń járdeminde anıqlanadı. Bul formulada b - plastinkanıń keńligi.

Demek, zaryadqa tásir etetuǵın elektr kúshi mınaǵan teń boladı:

$$f_e = e \frac{V_A - V_B}{b}.$$

Stacionar hal kúshler teńlesken jaǵdayda, yaǵnıy $f_H = f_e$ teńligi orın alǵan jaǵdayda júzege keledi. Bunnan mınaday qatnastı alamız:

$$e \frac{V_A - V_B}{b} = e\bar{v}H. \quad (2)$$

Ótkizgishtegi zaryadlardıń qozǵalısinıń ortasha tezligi $\bar{v}$ nı toqtıń kúshi I , ótkizgishtiń

kólemiń bir birligindegi zaryadlardıń sanı n hám olardıń qozǵalı tezlikleriniń arasındaqı qatnas boyınsha tabamız (214-paragrafqa qarańız):

$$I = b d n e \bar{v}.$$

Bunnan

$$\bar{v} = \frac{I}{b d n e}$$

qatnasına iye bolamız. $\bar{v}$ nıń usı mánisin (2)-ańlatpaǵa qoyıp, mınaday teńlikke iye bolamız:

$$V_A - V_B = \frac{1}{n e} \cdot \frac{I H}{d}. \quad (3)$$

Solay etip, (1)-emperikalıq formulaǵa sáykes, $V_A - V_B$ shaması $I H$ kóbeymesine proporcional hám plastinkanıń qalıńlıǵı d ǵa kerı proporcional eken. K turaqlısı mınaǵan teń boladı eken:

$$K = \frac{1}{n e}. \quad (4)$$

Bunnan, K turaqlısıń belgisiniń e zaryadınıń belgisinen ǵárezli ekenligi kelip shıǵadı. K turaqlısıń oń belgisi A noqatınıń potencialınıń (269-súwret) B noqatınıń potencialınıń joqarı ekenligin ańǵartadı.

161-paragrafta ayılǵanlardan metallardıń elektr ótkizgishliginiń erkin elektronlardıń bar bolıwı menen baylanıslı ekenligi kelip shıǵadı. Qala berse, metaldıń hár bir atomına shama menen bir erkin elektron sáykes keledi. Sonlıqtan, metallar ushın K turaqlısıń mánisi teris bolıwı hám onıń san mánisi elektronnıń zaryadı e hám metaldıń kólemiń bir birligindegi erkin elektronlardıń sanı n boyınsha anıqlanıwı kerek.

K turaqlısı ushın (4)-ańlatpanıń kelip shıǵarılıwı dál emes. Haqıyqatında da, magnit maydanında qozǵalatuǵın zaryadqa tásir etetuǵın f_H kúshiniń shamasın ortasha $\bar{v}$ tezligi arqalı anıqlawǵa bolmaydı. Eger, elektronnıń erkin júriw jolında onıń tezligi toqtıń tarqalıw baǵıtında teń ólshewli ósedı, sonlıqtan K ushın jazılǵan ańlatpaǵa jáne $2/3$ sanlı kóbeytiwshisi de kiredi. Sonlıqtan mınaday ańlatpanı alamız:

$$K = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{n e}. \quad (4a)$$

Metaldıń kólemiń bir birligindegi atomlardıń sanın n_0 arqalı belgileymiz hám $n = z n_0$ teńligi orınlanadı dep boljaymız; bunday jaǵdayda z bir atomǵa sáykes keletuǵın erkin elektronlardıń sanın kórsetedi. Kólemniń bir birligindegi atomlardıń sanı n_0 di Avagadro sanı menen ańsat baylanıstırıwǵa boladı. Haqıyqatında da, bir tárepten bir atomnıń massası A/N shamasına teń (A - atomlıq salmaq), al, ekinshi tárepten ρ/n_0 ge teń (ρ - tıǵızlıq). Bunnan

$$\frac{\rho}{n_0} = \frac{A}{N}$$

yamasa

$$n_0 = \frac{N \rho}{A}$$

qatnasına iye bolamız hám bunnan

$$n = \frac{N \rho}{A} \cdot z.$$

formulasın alamız. n niń bul mánisin (4a) ǵa qoyıp, mınaday teńlikti keltirip shıǵaramız:

$$K = \frac{2}{3} \frac{A}{N e \rho z}.$$

Biraq, eger F arqalı Faradey sanın belgilesek, onda $N e = -F$ teńligine iye bolamız; onda metallar ushın K turaqlısı ushın

$$K = -\frac{2}{3} \frac{A}{F \rho z} \quad (5)$$

formulasına iye bolamız.

Haqıyqatında da, kóp sanlı metallar ushın K nıń mánisi teris. Tájiriyelerde tabılǵan K

turaqlısınıń mánisi boyınsha z shamasın anıqlawǵa boladı; bir qatar bir valentli metallar ushın z tiń mánisi birge jaqın bolıp shıǵadı: misalı natriy ushın $z = 0,65$, gúmis ushın $z = 0,75$; altın ushın $z = 0,9$. Úlkenirek valentlikke iye bolǵan metallar ushın z tiń mánisi úlken (misalı, alyuminiy ushın $z = 0,2$). Biraq sonday materiallar da bar (Zn, Cd, Pb, Fe hám basqalar), olar ushın K oń mániske iye bolıp shıǵadı.

Joqarıda keltirilgen elementar teoriyanıń kóz-qarası boyınsha bul fakt túsiniqsiz hám onı tek kvantlıq mexanikanıń tiykarında ǵana túsindiriwge boladı.

Xoll effekti tek elektronlıq ótkizgishlikke iye bolǵan ótkizgishlerde baqlanadı⁵³. Ionlıq ótkizgishlik orın alatuǵın elektrolitlerde bolsa sezilerliktey effekt baqlanbaydı. Bul awır ionlardıń elektronlarǵa salıstırǵanda ádewir kishi tezlik penen qozǵalatuǵınlıǵı menen baylanıslı.

YArım ótkizgishlerde K turaqlısı temperaturanıń tómenlewi menen kúshli úlkeyedi. Bul jaǵday temperaturanıń tómenlewi menen kólemniń bir birligindegi elektronlardıń sanınıń tez kemeyiw menen baylanıslı. YArım ótkizgishlerdegi Xoll effektiniń belgisi yarım ótkizgishtiń ótkizgishliginiń elektronlıq xarakterge yamasa "tesiklik" xarakterge iye ekenligin anıqlawǵa múmkinshilik beredi (171-paragraf). "Aralas" ótkizgishlikke iye yarım ótkizgishler ushın qubılıs ádewir quramalı xarakterge iye boladı.

§ 218. Elektronlardıń salıstırmalı zaryadın anıqlaw. Lorenc kúshi ushın jazılǵan ańlatpa qozǵalıwshı bóleksheniń zaryadı e niń onıń massası m ge qatnasın anıqlawǵa múmkinshilik beredi. Bul e/m qatnasın *salıstırmalı zaryad* dep ataydı.

Vakuumda sırtqı magnit maydanınıń kernewligi H qa perpendikulyar tegislikte qozǵalatuǵın zaryadlangan bólekshelerdiń aǵısın kóz-aldımızǵa elesleleyik (270-súwrette maydannıń kernewligi H sızılma tegisligine perpendikulyar). Bunday jaǵdayda bóleksheniń tezligi v niń baǵıtı menen H tıń arasındaqı múyesh $\pi/2$ ge teń hám 214-paragraftaǵı (3a) formulası boyınsha bólekshege

$$\Delta f = \frac{1}{c} evH \quad (1)$$

kúshi tásir etedi.

Bul kúsh qozǵalıwdıń barısında bóleksheniń tezliginiń v vektorına perpendikulyar. SHárt boyınsha bunday jaǵdayda bólekshege basqa hesh qanday kúshler tásir etpeytuǵın bolǵanlıqtan, onıń tezligi v san shaması boyınsha turaqlı hám, demek, bóleksheniń traektoriyası dóńgelektiń doǵası bolıp tabıladı. Eger, bul dóńgelektiń radiusı R bolsa, onda bóleksheniń orayǵa umtılıwshı tezleniw v^2/R shamasına teń boladı hám Nyutonniń ekinshi nızamı boyınsha tezleniw menen f kúshiniń arasındaqı qatnas

$$\Delta f = \frac{mv^2}{R}$$

ańlatpası menen beriledi.

Bul ańlatpadaǵı Δf kúshiniń ornına onıń (1)-ańlatpa boyınsha mánisin qoysaq, mınaday teńlikti alamız:

$$\frac{1}{c} evH = \frac{mv^2}{R}.$$

Bunnan bóleksheniń salıstırmalı zaryadı ushın tómendegidey qatnastı tabamız:

$$\frac{e}{m} = \frac{cv}{RH}. \quad (2)$$

Bóleksheniń traektoriyasınıń iymeklik radiusı R di hám magnit maydanınıń kernewligi H tı tikkeley ólshewge boladı. Solay etip, e/m qatnasın anıqlaw ushın tek bóleksheniń tezligi v nı tabıw kerek boladı. Bóleksheniń tezligi v nı hár qıylı usıllardıń járdeminde anıqlawǵa boladı. Onı, misalı, tezletiwshı $V_1 - V_2$ potenciallar ayırmasınıń járdeminde anıqlaw múmkin. Bóleksheler

⁵³ 1879-jılı Edvin Xoll tárepinen ashılǵan bul effektin ótkizgishtegi toqtı tasıwshılardıń tábiyatı menen baylanıslı ekenligin atap ótemiz (Awdarıwshılar).

vakuumda qozǵalǵanda elektrlik kúshlerdiń barlıq $e(V_1 - V_2)$ jumısı olardıń $mv^2/2$ kinetikalıq energiyasınıń ósimi ushın jumısaladı. Bunnan

$$\frac{mv^2}{2} = e(V_1 - V_2)$$

hám, usıǵan baylanısı,

$$v = \sqrt{\frac{2e}{m} \cdot \sqrt{V_1 - V_2}}$$

teńliklerine iye bolamız. v nıń bul mánisin (2)-ańlatpaǵa qoyıp hám alınǵan teńliktiń oń hám shep táreplerin kvadratqa kóterip jáne túrlendirip, mınaday teńlikke iye bolamız:

$$\frac{e}{m} = \frac{2c^2}{R^2 H^2} (V_1 - V_2). \quad (3)$$

v tezligin e/m salıstırmalı zaryadtıń ańlatpasınan joq etiw ushın Tomson basqa usıldı paydalandı. Onıń ushın ol bólekshelerdiń dástesin magnit hám oǵan kóldeneń bolǵan elektr maydanlarında qozǵalıwǵa májbúrledi. Elektronnıń salıstırmalı zaryadın anıqlaw ushın Tomson paydalanǵan usıl 271-súwrette keltirilgen; K - elektronlardıń deregi xızmetin atqaratuǵın katod; A - elektronlar dástesin ayırıp alıw ushın qollanılauıǵın diafragma. K menen A nıń arasına elektronlarǵa v tezligin beretuǵın potenciallar ayırması túsirilgen. Diafragma arqalı ótken elektronlar keńislikte usı v tezligi menen qozǵaladı. Punktir dóńgelek penen sızılma tegisligine perpendikulyar hám kernewligi H qa teń magnit maydanı qozdırılauıǵın oblast kórsetilgen. Bul maydan polyuslarınıń arasında trubka jaylasatuǵın elektromagnit tárepinen alınadı. B_1 hám B_2 arqalı arasında elektr maydanı qozdırılauıǵın eki parallel plastinkalar belgilengen. C - fluorescenciya baqlanatuǵın ekran, bul ekranda jaqtılıq shıǵarıp turatuǵın daq katod nuri túsetuǵın orındı anıqlaydı. Meyli, magnit maydanınıń baǵıtı elektronlardıń tómengen qaray awısıwına sáykes keletuǵın bolsın. Tek magnit maydanı bar bolǵan jaǵdayda elektronlar maydan oblastında dóńgelektiń doǵası boyınsha qozǵaladı (punktir sıziq) hám fluorescenciyananatuǵın ekrandaǵı jaqtılıq shıǵarıp turǵan daq tómengen qaray jılısadı. Bul jılıwdıń shaması boyınsha iymeklik radiusı R esaplanadı. Bunnan keyin B_1 menen B_2 plastinkalarınıń arasında magnit maydanı menen birge elektrostatalıq maydanı da qozdırıladı. Bul elektrostatalıq maydan tárepinen elektrónǵa tásir etetuǵın eE kúshi magnit kúshi Δf tiń baǵıtına qarama-qarsı baǵıtlanǵan (biz qarap atırǵan jaǵdayda elektr kúshi joqarıǵa qaray baǵıtlanǵan bolıwı kerek). Elektr maydanınıń shaması elektronlar dástesiniń hesh qanday awısıwǵa ushıramaytuǵınday, yaǵnıy elektrlik kúsh penen magnitlik kúshtiń bir birine teń bolatuǵınday etip saylap alınadı. Bunday jaǵdayda mınaday teńlik orınlı boladı:

$$eE = \frac{1}{c} evH.$$

Bunnan tezlik ushın

$$v = \frac{cE}{H}$$

teńligine iye bolamız. v nıń bul mánisin (2)-teńlikke qoyıp e/m ushın mınaday ańlatpanı alamız:

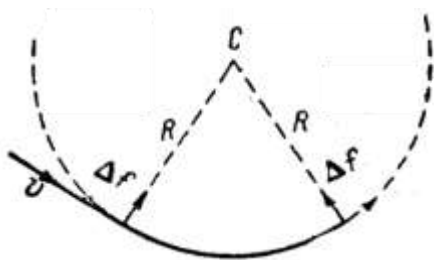
$$\frac{e}{m} = \frac{c^2 E}{RH^2}.$$

Solay etip, maydanlardıń kernewlikleri E menen H tiń hám iymeklik radiusı R diń mánisleri boyınsha elektronnıń salıstırmalı zaryadı e/m anıqlanadı eken.

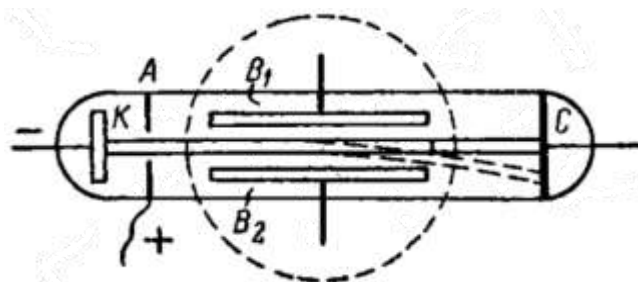
Tomson usılınıń bir qatar ózgeretilgen túrleri de bar (mayda shrift penen jazılǵan tekstke qarańız). Olardıń ólshewlerdiń dáliligin joqarılauıw maqsetinde islep shıǵılǵan. Joqarıda kórsetilgendey, elektronlardıń tezlikleri kishi bolǵan jaǵdaylarda mınaday shama alınadı:

$$\frac{e}{m} = 5,273 \cdot 10^{17} \frac{\text{zaryadtıń CGSE} - \text{birliǵi}}{g}.$$

Bunnan elektronniń belgili bolǵan e zaryadı boyınsha elektronniń massası m esaplanadı⁵⁴.



270-súwret. Magnit maydanınıń baǵıtına perpendikulyar qozǵalatuǵın zaryadqa tásir etetuǵın $\Delta\phi$ kúshi.



271-súwret. Elektronniń salıstırmalı zaryadın anıqlaw ushın Thomson ótkergen tájiriýbeniń sxeması.

Elektronlardıń úlken tezliklerinde salıstırmalıq principine sáykes massanıń tezlikten ǵárezligi sezile baslaydı⁵⁵. Usınıń nátiýjesinde tezliktiń ósiwi menen e/m qatnası kishireydi. Elektronlardıń tezligin júdá úlken etiwge bolǵanlıqtan, e/m qatnasınıń kemeyiwi sezilerliktey boladı hám massanıń tezlikten ǵárezliginiń eksperimentallıq tastıyqlanıwı bolıp tabıladı. Elektronlar ushın e/m qatnasınıń tezlikten ǵárezligin muqıyatlı túrde ótkerilgen eksperimentallıq izertlewlerdiń nátiýjeleri teoriyalıq izertlewlerdiń nátiýjeleri menen júdá jaqsı sáykes keledi.

272-súwrette hár qıylı tezlikler ushın elektronniń massasınıń ólshengen mánisleri kórsetilgen; tutas sızıq bolsa

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

formulasınıń tiýkarında esaplangan massanıń v tezlikten ǵárezligine sáykes keledi; m_0 - sheksiz kishi tezliktegi massa ("tınıshlıqtaǵı massa") hám $\beta = \frac{v}{c}$, bul qatnasta c - boslıqtaǵı jaqtılıqtıń tezligi. Joqarıda aytılıp ótilgendeı, elektronniń "tınıshlıqtaǵı massası" mınaǵan teń:

$$m_0 = 9,109 \cdot 10^{-28} g.$$

Endi e/m qatnasın elektronlar dástesin boylıq magnit maydanındaǵı fokuslaw jolı menen anıqlawdı qaraymız. Meyli, elektron turaqlı v tezligi menen magnit maydanı H tır baǵıtı menen α múyeshin jasaytuǵın baǵıtta qozǵalatuǵın bolsın. Eger biz elektronniń qozǵalısn birewi magnit maydanı baǵıtındaǵı, al ekinshisi oǵan perpendikulyar baǵıttaǵı eki qurawshıǵa jiklesek bul jaǵdaydaǵı elektronniń traektorıyasınıń túrin ańsat anıqlay alamız. Magnit maydanınıń boyındaǵı qurawshı $v_{\parallel} = v \cos \alpha$, al magnit maydanınıń baǵıtına perpendikulyar bolǵan qurawshı $v_{\perp} = v \sin \alpha$.

⁵⁴ Elektronniń salıstırmalı zaryadınıń $-1.758\,819\,62\,(53) \cdot 10^{-11}$ Kl/kg shamasına teń ekenligin atap ótemiz (Awdarıwshılar).

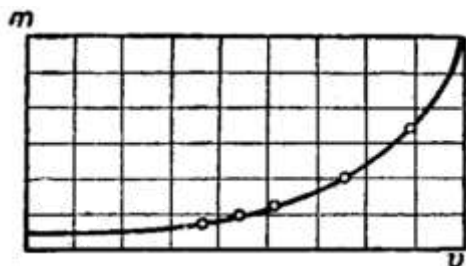
⁵⁵ Jáne bir ret massanıń tezlikten emes, al energıyanıń tezlikten

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

túrindegi ǵárezliktiń bar ekenligin atap ótemiz. Bul paraǵrafta keltirilgen

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

formulası tek ǵana esaplawlardı ápiwayılastırıw ushın ǵana xızmet ete aladı (Awdarıwshılar).



272-súwret.
Elektronnıń massasınıń tezlikten gárezligi.

H qa perpendikulyar bolǵan tegisliktegi elektronnıń jolınıń proekciyası sheńber bolıp tabıladı hám onıń radiusı (2)-qatnastırnıń járdeminde anıqlanadı:

$$R = \frac{cv_{\perp}m}{eH}. \quad (4)$$

H qa parallel bolǵan baǵıttaǵı elektronnıń qozǵalısnıń proekciyası $v_{\perp}$ tezligi menen teń ólshewli qozǵalı bolıp tabıladı. Sebebi, magnit maydanında maydannıń baǵıtında zaryadqa tásir etetuǵın qurawshı joq. Solay etip, elektronnıń traektoriyasınıń ózi vintlik sıızıq bolıp tabıladı.

Bul vintlik sıızıqtıń boyı menen elektronnıń bir ret aylanıp shıǵıwı ushın ketken waqıt t mınaǵan teń:

$$t = \frac{2\pi R}{v_{\perp}}.$$

Bul teńlikke R dıń ornına onıń (4)-ańlatpa boyınsha alınǵan mánisin qoyıp, mınaday teńlikke iye bolamız:

$$t = \frac{2\pi c}{\frac{e}{m}H}. \quad (5)$$

Solay etip, t waqıtı elektronnıń tezligi v nıń shamasına da, baǵıtına da gárezli emes, al magnit maydanınıń kernewligi H hám elektronnıń salıstırmalı qarsılıǵı e/m boyınsha anıqlanadı eken. e/m shamasın anıqlaw usılı usı qatnasqa tiykarlangan. Onıń mánisi tómendegilerden ibarat:

Hawası sorap alınǵan trubkanıń ishinde jaylasqan qızǵan K katodı tárepinen shıǵarılatuǵın elektronlar (272-súwret) K diafragmasındaǵı tesik arqalı ótedi.

K katodı menen A diafragmasınıń arasında potenciallar ayırması $V_1 - V_2$ shamasına teń tezletiwshi maydan payda etiledi. Solay etip, tezligi

$$\frac{1}{2}mv^2 = e(V_1 - V_2) \quad (6)$$

qatnasınıń járdeminde anıqlanatuǵın elektronlardıń dástesi payda etiledi.

Bunnan keyin elektronlar dástesi C kondensatorınıń plastinalarınıń arasınan ótedi, al bul plastinalardıń arasında kernewligi E ge teń bolǵan ózgermeli elektr maydanı qozdırıladı. Usı ózgermeli maydannıń tásirinde elektronlar waqıttırnıń hár qıylı momentlerinde ásbaptırnıń kósherine salıstırǵanda hár qıylı bolǵan α múyeshlerine awısadı. C kondensatorı menen B fluorescentli ekrannıń aralıǵında ishine truba salınǵan solenoidtirnıń járdeminde ózgermeli magnit maydanı qozdırıladı. Joqarıda ayılǵanlar boyınsha, bul jaǵdayda elektronlar vintlik sıızıqlar boyınsha qozǵaladı. Vintlik sıızıq boyınsha bir ret aylanıp shıǵıw ushın ketetuǵın t waqıtı ishinde elektronlar

$$l = v_{\parallel}t$$

kesindisiniń uzınlıǵınday joldı ótedi. Bul teńlikke (5)-ańlatpadaǵı waqıt t nıń mánisin qoyıp, mınaǵan iye bolamız:

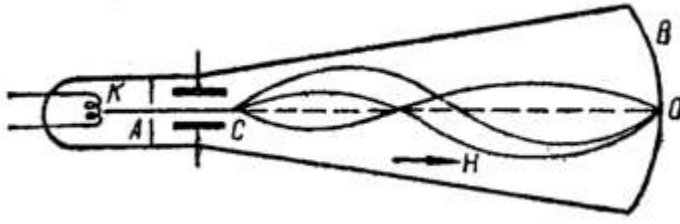
$$l = \frac{2\pi cv \cdot \cos \alpha}{\frac{e}{m} \cdot H}.$$

Eger α múyeshiniń shaması kishi bolsa, onda $\cos \alpha \cong 1$ hám

$$l \cong \frac{2\pi cv}{\frac{e}{m}H} \quad (7)$$

teńligin alamız.

Solay etip, l kesindisi juwıqlawdıń jetkilikli dárejesinde elektronlardıń C kondensatorında qanday α múyeshine awısqanlıǵınan gárezsiz bolıp shıǵadı.



273-súwret.
Magnitlik fokusirovka (Bush usılı) usılı
boyınsha elektronnıń salıstırmalı
zaryadın anıqlaw.

Tap sol t waqıtınıń ishinde elektronlar vintlik sıziq boyınsha bir ret aylanıp shıǵatuǵın bolǵanlıqtan, demek, olardıń barlıǵı C kondensatorınan birdey l qashıqlıǵında ásbaptıń kósherin kesip ótedi eken. 273-súwrette elektronlardıń bir neshe traektoriyaları kórsetilgen. Olardıń barlıǵınıń bir O noqatında kesilisetuǵınlıǵı kórinip tur. Bul noqat, optikalıq nurlardıń kesilisiw noqatı sıyaqlı *elektronlardıń fokusu* dep ataladı. Boylıq magnit maydanınıń kernewligi H ózgergende fokustıń turǵan ornı ózgeredi. H kernewliginiń mánisin fokustıń fluorescenciyalawshı B ekranına sáykes keletuǵınday etip saylap alıwǵa, al bul jaǵdayda ekrandaǵı dásteniniń iziniń keskin túrde kórinuwi boyınsha anıqlawǵa boladı. Bunday jaǵdayda l kesindisiniń shaması C kondensatorı menen B ekranınıń arasındaǵı qashıqlıqqa teń hám sonlıqtan onı ólshewge boladı. Al l diń mánisin bilgennen keyin elektronnıń salıstırmalı zaryadı e/m di anıqlawǵa boladı. Haqıykatında da, (7)-ańlatpadan mınaǵan iye bolamız:

$$\frac{e}{m} = \frac{2\pi cv}{lH}.$$

Bul teńlikke (6)-teńlik boyınsha v nıń mánisin qoyıp

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 c^2 (V_1 - V_2)}{l^2 H^2}$$

formulasına iye bolamız.

Bul formulanıń oń tárepinde ólshewge bolatuǵın shamalar tur. Nátiyjede e/m qatnası anıqlanadı.

Elektronnıń salıstırmalı zaryadı e/m nıń mánisin dál anıqlaytuǵın baska usıldı *tezliklerdi filtrlew usılı* dep ataydı. Hawası sorıp alınǵan trubkada (274-súwret) qızǵan K katodınıń hám A_1 diafragmasıńıń járdeminde elektronlar dástesi alınadı. Bunnan keyin dáste eki C_1 hám C_2 kondensatorları arqalı ótedi. Kondansatorlardıń arasında ekinshi A_2 diafragması bolıp, ol C_1 kondensatorında burılmaǵan elektronlardı ǵana ótkeredi. Kondensatorlardıń ekewiniń de plastinkalarına waqıtqa baylanıslı dáwiri T ǵa teń sinusoidallıq nızam boyınsha ózgeretuǵın sinxronlı túrde ózgermeli potenciallar ayırması túsiriledi. Bunday jaǵdayda plastinkalarınń arasındaǵı potenciallar ayırması nolge teń bolǵan jaǵdayda C_1 kondensatorı arqalı ótken elektronlar ǵana diafragma arqalı óte aladı. Eger elektronlar ekinshi kondensatorǵa jetip kelemen degenshe ketken waqıt t nıń ishinde kondensatorlarǵa túsetuǵın potenciallardıń ayırması ózgerip úlgeretuǵın bolsa, onda elektronlar dástesiniń baǵıtı burıladı. Eger waqıt t nıń shaması $T/2$ den pútin san eselengen bolsa ǵana awısıw (burılıw) orın almaydı. Bunday jaǵdayda elektronlar dástesi óziniń izin B fluorescenciyanatuǵın ekrannıń orayında beredi.

Solay etip, dásteniń eki kondensator tárepinen awıstırılmaıwı ushın mınaday shárttiń orınlanıwı kerek:

$$t = n \frac{T}{2}. \quad (8)$$

Bul teńlikte n arqalı pútin san belgilengen.

Ekinshi tárepten t waqıtı bilayınsha anıqlanadı: meyli, l kondensatorlardıń arasındaǵı qashıqlıq bolsın. Bunday jaǵdayda $t = \frac{l}{v}$ teńligi orınlı boladı, bul teńlikte v - elektronlardıń tezligi. Bul tezliktiń mánisin K katod penen A_1 diafragmanıń arasına túsirilgen $V_1 - V_2$ potenciallar ayırmasıńıń mánisin boyınsha tómendegidey qatnasıń járdeminde anıqlawǵa boladı:

$$\frac{1}{2} m v^2 = e(V_1 - V_2).$$

Bunnan

$$t^2 = \frac{l^2}{v^2} = \frac{l^2 m}{2e(V_1 - V_2)}.$$

ańlatpasına iye bolamız. Usı t^2 shaması menen (8)-formulanı paydalanıp, salıstırmalı zaryad ushın mınaǵan iye bolamız:

$$\frac{e}{m} = \frac{2l^2}{n^2 T^2 (V_1 - V_2)}. \quad (9)$$

Ólshewlerdi orınlaw ushın elektronlar dástesiniń B ekranına túsetuǵınday etip T dáwiri kishireytiledi. Bul $n = 1$ teńligine sáykes keledi. Bunnan l hám $(V_1 - V_2)$ shamalarınń belgili bolǵan mánisleriniń tiykarında (9)-formula boyınsha salıstırmalı zaryad e/m anıqlanadı.

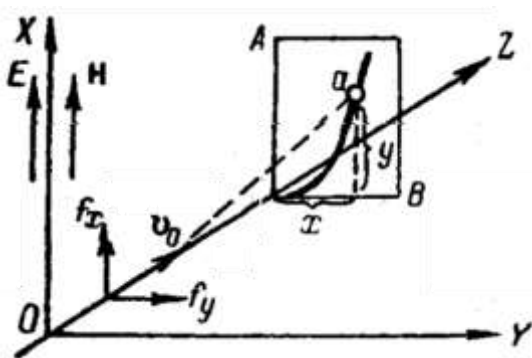
§ 219. Oń zaryadlangan ionlardıń salıstırmalı zaryadın anıqlaw. Bólekshelerdiń elektr hám magnit maydanlarındaqı awısıwına tiykarlangan joqarıda kórsetilgen usıllar principinde tek elektronlardıń salıstırmalı zaryadı e/m ǵana emes, al qálegen ionlardıń salıstırmalı zaryadın anıqlaw ushın jaramlı. Biraq, atomlıq yamasa molekulalıq ionlar ushın e/m salıstırmalı zaryadın anıqlawdaǵı qıyınshılıq mınaday ibarat: ionlardıń deregi sıpatında qanday da bir qattı elektrod xızmet ete almaydı, al onıń ornına razryad orın alatuǵın gaz xızmet etedi. Usınıń menen birge ionlar potencıalları hár qıylı bolǵan hár qıylı orınlarda payda bolatuǵın bolǵanlıqtan, olar hám qıylı tezliklerge iye boladı. Sonlıqtan, hár qıylı tezliklerge iye bolǵan ionlar birdey maydanlarda hár qıylı awısıwlarǵa ushıraydı hám bul jaǵday ólshewlerdi ótkeriwge múminshilik bermeydi. Tezliktiń tásirin joq etiw ushın Tomson *parabolalar usılı* dep atalatuǵın usıldı qollandı. Bul usıl bir tárepke karay baǵıtlangan elektr hám magnit maydanların paydalanıwǵa tiykarlangan. OZ kósheriniń baǵıtında baslangısh v_0 tezligi menen ushatuǵın bóleksheni kóz aldımızǵa keltireyik (275-súwret). Meyli, elektr maydanınıń kernewligi E menen magnit maydanınıń kernewligi H bir tárepke qaray OX kósherine parallel baǵıtlangan hám bólekshelerge olardıń jolındaǵı birdey bolǵan z uchastkasında tásir etetuǵın bolsın. Elektr maydanı tárepinen zaryadı e ge teń bolǵan bólekshege OX kósheriniń baǵıtındaǵı mınaday kúsh tásir etedi:

$$f_x = eE. \quad (1)$$

Tap sol bólekshege magnit maydanı tárepinen shep qol qaǵıydası boyınsha OY kósheriniń baǵıtındaǵı Lorenc kúshi tásir etedi:

$$f_y = \frac{1}{c} ev_0 H. \quad (2)$$

Solay etip, elektr hám magnit maydanları bóleksheni óz-ara perpendikulyar baǵıtta buradı eken hám bólekshe XOY tegisligine parallel bolǵan AB tegisligin koordinataları x hám y bolǵan bazı bir a noqatında kesip ótedi.



275-súwret.
Parabolalar usılınıń sxeması.

Meyli, bóleksheniń massası m ge teń bolsın, bunday jaǵdayda onıń tezleniwiniń w_x qurawshısı (1)-teńlik boyınsha mınaǵan teń:

$$w_x = \frac{f_x}{m} = \left(\frac{e}{m}\right) E.$$

Tezleniwdiń usı qurawshısınıń mánisi turaqlı bolǵanlıqtan, bóleksheniń OX baǵıtındaǵı awısıwı teń ólshewli tezleniwshi xarakterge iye boladı hám bóleksheniń z kesindisi arqalı ótiw waqıtı Δt nıń ishinde mınaday shamaǵa awısadı:

$$x = \frac{1}{2} w_x \cdot \Delta t^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{e}{m}\right) \cdot E \Delta t^2;$$

Biraq, $\Delta t = \frac{z}{v_0}$, bunnan:

$$x = \frac{1}{2} \left(\frac{e}{m} \right) \cdot E z^2 \frac{1}{v_0^2}.$$

Tájiriybeniń berilgen sharayatlarında turaqlı bolǵan $\frac{1}{2} E z^2$ shamasın C_1 arqalı belgileymiz. Bunday jaǵdayda:

$$x = C_1 \left(\frac{e}{m} \right) \cdot \frac{1}{v_0^2}. \quad (3)$$

Tap usınday jollar menen (2)-teńlik boyınsha tezleniwdiń w_y qurawshısınıń

$$w_y = \frac{f_y}{m} = \frac{1}{c} \left(\frac{e}{m} \right) v_0 H$$

shamasına teń ekenligin tabamız. w_y shaması da turaqlı bolǵanlıqtan, bóleksheniń OY kósheriniń baǵıtındaǵı awısıwı mınaǵan teń boladı:

$$y = \frac{1}{2} w_y \Delta t^2 = \frac{1}{2c} \left(\frac{e}{m} \right) v_0 H \Delta t^2.$$

Eger usı teńliktegi Δt nıń ornına onıń z/v_0 mánisin qoyıp

$$y = \frac{1}{2c} \left(\frac{e}{m} \right) H z^2 \frac{1}{v_0}$$

teńligin tabamız. Tájiriybeniń berilgen sharayatında turaqlı bolǵan $\frac{1}{2c} H z^2$ shamasın C_2 arqalı belgilep,

$$y = C_2 \left(\frac{e}{m} \right) \frac{1}{v_0} \quad (4)$$

teńligine iye bolamız.

(3)- hám (4)-formulalar bóleksheniń elektr hám magnit maydanlarındaǵı awısıwın anıqlaydı. Kórinip turǵanıday, tájiriybeniń berilgen sharayatlarında awısıwlar eki faktordıń tiykarında anıqlanadı eken: bóleksheniń salıstırmalı zaryadı e/m hám onıń tezligi v_0 . Birdey bolǵan e/m salıstırmalı zaryadqa, biraq hár qıylı bolǵan v_0 tezliklerine iye bóleksheler AB tegisliginiń hár qıylı noqatlarında kesilisedi. Bul noqatlarıń barlıǵı belgili bolǵan bir iymekliktiń boyınsha jaylasadı. Bul iymekliktiń teńlemesin (3)- hám (4)-ańlatpalardaǵı v_0 shamasın qısqartıw arqalı alamız:

$$y^2 = \frac{C_2^2}{C_1} \left(\frac{e}{m} \right) x. \quad (5)$$

Kórinip turǵanıday, bul parabolaniń teńlemesi bolıp tabıladı. Tomson bólekshelerdiń jolına fotoplastıkanı qoyǵan hám onıń betinde bólekshelerdiń parabolalıq iymeklik túrindegi izleri alıńǵan. Hár bir parabola e/m niń bir mánisine, biraq hár qıylı tezliklerge sáykes keledi. Hár qıylı parabolalar hár qıylı e/m qatnaslarına iye bolǵan bólekshelerge sáykes keledi. Baqlanǵan $y^2 = px$ parabola onıń parametri bolǵan $p = \frac{C_2^2}{C_1} \left(\frac{e}{m} \right)$ shamasın tawıp hám C_1 menen C_2 shamaların bilip, ionlardıń zaryadlarınıń olardıń massalarına qatnasın tabıwǵa boladı.

Tomsonniń tájiriybelerinde tek bir zaryadlı ionlar ǵana emes, al kóp zaryadlı ionlar da baqlanǵan. Eger bul ionlar birdey tábiyatqa iye bolsa (mısalı, O^+ hám O^{++}), onda e_1/m hám e_2/m salıstırmalı zaryadlarınıń qatnası pútin sanlardıń qatnasınday boladı. Sebebi e_1 hám e_2 zaryadlarınıń shaması elektronniń zaryadı e den pútin san eselengendey shamaǵa úlken bola aladı.

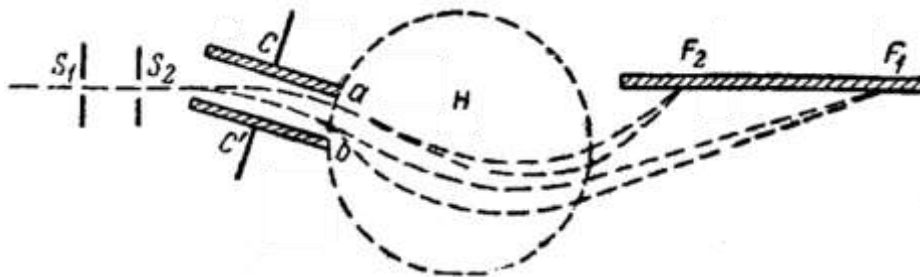
Eger zaryadları birdey, biraq tábiyatı hár qıylı bolǵan ionlar (mısalı, H^+ hám O^+) haqqında gáp etsek, onda olardıń e/m_1 hám e/m_2 salıstırmalı zaryadları berilgen bólekshelerdiń massaları bolǵan m_2 hám m_1 shamalarınıń qatnasınday boladı. Solay etip, parabolalar usılı atomlar menen molekulalardıń massaların bir biri menen salıstırıwǵa múmkinshilik beredi. Neónǵa tiyisli bolǵan parabolalardı baqlap, Tomson neónniń 20 ǵa teń atomlıq salmaǵına juwap beretuǵın intensivli parabola menen bir qatarda intensivligi ádewir ázzi bolǵan jáne e/m shamasınıń basqa mánisine sáykes keletuǵın ázzi parabolanı da tapqan. Ólshewler bul qatnastıń atomlıq salmaǵı 22 ge teń

bolğan atomlarǵa sáykes keletuǵınlıǵın kórsetken. Solay etip, birdey zaryadqa, biraq hár qıylı massalarǵa iye bolatuǵın neonnıń atomlarınń eki túrli sortı boladı eken.

Házirgi waqıtları elementlerdiń úlken bóliminiń eki yamasa onnan da kóp sanlı izotoplardıń, yaǵnıy fizikalıq hám ximiyalıq qásiyetleri boyınsha bir birine júdá uqsas, biraq hár qıylı atomlıq salmaqlarǵa iye zatlardıń aralaspalarınan turatuǵınlıǵı belgili.

Ionlardıń elektr hám magnit maydanlarındaǵı awısıwı boyınsha massaların salıstırıw usılı Aston tárepinen jetilistirildi. Aston usılında ionlar qarama-qarsı baǵıtlarda awıstıratuǵın elektr hám magnit maydanlarınń tásir etetuǵın oblastları arqalı izbe-iz ótedi.

Aston ásbabınıń sxeması 276-súwrette kórsetilgen. S_1 hám S_2 diafragmaları ionlardıń jıńışke dástesin bóledi hám olar bunnan keyin bir birine parallel bolğan C hám C' plastinkalarınń arasınan ótedi. C hám C' plastinkalarına belgili shamadaǵı potenciallar ayırması túsiriledi. Sonlıqtan olardıń arasında kernewligi E bolğan elektr maydanı payda boladı. Oyımızda bólekshelerdiń aǵısında birdey e/m salıstırmalı zaryadqa iye bolğan bólekshelerdi ayırıp alamız; bul bóleksheler hár qıylı tezliklerge iye boladı, sonlıqtan olar hár qıylı shamalarǵa awısadı hám nátiyjede dáste keńeyedi. Onıń b shetine eń kishi tezlik penen qozǵalatuǵın, al a shetine eń úlken tezlik penen qozǵalatuǵın bóleksheler kelip túsedi. Punktir dóńgelek penen kórsetilgen oblastta bóleksheler sızılma tegisligine perpendikulyar magnit maydanına kelip túsedi. Bul orında bóleksheler elektr maydanındaǵı awısıwǵa salıstırǵanda qarama-qarsı baǵıttaǵı awısıwǵa ushıraydı. Hár qıylı tezliklerge iye bolğan bóleksheler hár qıylı awısıwlarǵa ushıraydı: tezligi kishi bolğan bóleksheler b - kúshlirek, al eń úlken tezlikke iye bolğan bóleksheler a - kishirek shamaǵa awısadı. Usınıń saldarınan hár qıylı tezliklerge iye bolğan bólekshelerdiń traektoriyaları bir F_1 noqatında kesilisedi. Tap sol sıyaqlı, basqa salıstırmalı zaryad e/m ge hám hár qıylı tezliklerge iye bolğan bóleksheler bazı bir F_2 noqatında kesilisedi. Basqa e/m qatnasına iye bolğan bólekshelerdiń traektoriyalarınń kesilisiw orınları shama menen F_1F_2 tuwrınıń boyında jaylasadı. Solay etip, eger F_1F_2 tuwrısınıń boyında fotoplastinkanı qoyatuǵın bolsaq, onda sańlaqlardıń keskin túrdegi "súwretleri" payda boladı. Bul sızıqlardıń hár qaysısı salıstırmalı zaryad e/m niń belgili bolğan mánislerine sáykes keledi. Birdey zaryadlarǵa iye ionlar bolğan jaǵdayda sızıqlardıń turǵan ornı olardıń tek m massalarınń qatnası boyınsha ǵana anıqlanadı. Usınday sızıqlardıń salıstırmalı orınların ólshew arqalı m massalarınń arasındaǵı qatnastı anıqlaw múmkin.



276-súwret.
Mass-spektrograf.

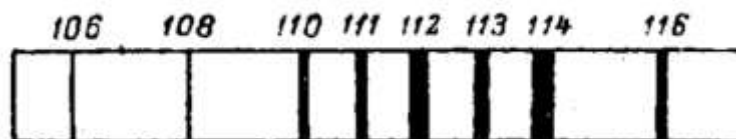
Alınatuǵın fotogrammanıń túri (277-súwret) optikalıq spektrograftıń járdeminde alınatuǵın sızıqlı spektrdiń túrin eske túsiredi. Sonlıqtan Aston óziniń ásbabın mass-spektrograf dep atadı.

Mass-spektrograftıń járdeminde hár qıylı izotoplardıń massalarınń qatnasların júdá joqarı dálilikte anıqlawǵa boladı.

Izotoplardıń massaların ólshewlerdiń barısında alınǵan bazı bir maǵlıwmatlar XIX kestedede berilgen.

Atomlardıń qurılısınıń teoriyası ushın úlken áhmiyetke iye bolatuǵın izotoplardıń ústinen islengen tájiriybelerdiń nátiyjeleri III tomda tallanadı.

277-súwret.
Mass-spektrogramma.



Ionlardıń salıstırmalı zaryadın anıqlaw usıllarınıń ishinde belgili bolǵan tezlikke iye bolǵan bólekshelerdi kóldeneń magnit maydanındaǵı fokuslawǵa tiykarlanǵan usıldı kórsetemiz. 278-súwrette ásbaptıń sxeması kórsetilgen (ápiwayılıq ushın sxemada ishinde ásbaptıń barlıq bólimleri jaylasatuǵın hám hawası sorıp alınatuǵın metall qutı kórsetilmegen). Qızdırılatuǵın D simi anodtıń xızmetin atqaradı. Bul simnıń betine quramında izertlenetuǵın element bar bolǵan duzdıń juqa qatlamı payda etiledi; bunday sharayatlarda sim oń zaryadlanǵan ionlardıń deregi bolıp xızmet etedi. Ionlar D simi menen S_1 sańlaǵınıń arasına túsirilgen $V_1 - V_2$ potenciallar ayırmasına sáykes keletuǵın elektr maydanınıń tásirinde tezletiledi. Usı sańlaq arqalı ushıp ótetuǵın ionlar sızılma tegisligine perpendikulyar, kernewligi H bolǵan bir tekli magnit maydanı tásir etetuǵın keńislikke kelip jetedi. Bul maydannıń tásirinde olar radiusı 218-paragraftaǵı (2)-formulanıń járdeminde anıqlanatuǵın r ge teń bolǵan sheńber boyınsha qozǵaladı:

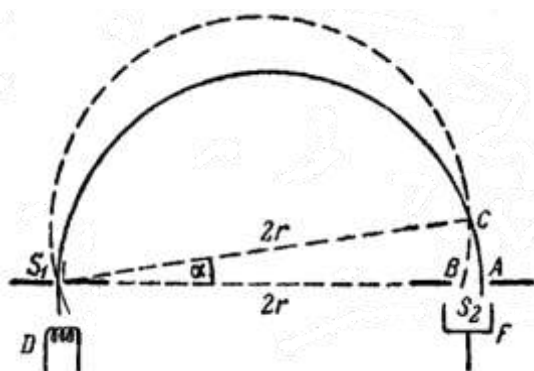
$$r = \frac{cv}{H} \cdot \frac{m}{e}. \quad (6)$$

Bul teńlikte m - ionlardıń massası, e - olardıń zaryadı, v - tezlik.

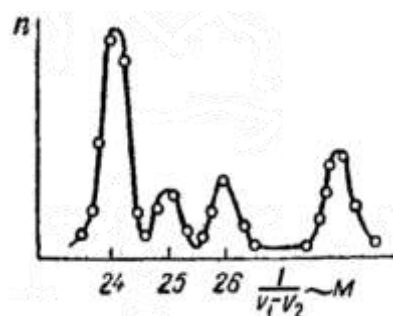
XIX keste

Izotoplardıń massaları

Atom	Ximiyalıq atomlıq salmaq	O^{16} ǵa salıstırǵandaǵı izotoplardıń massaları
H	1,00756	$\begin{cases} 1,00812 \\ 2,01471 \end{cases}$
He	4,00128	4,00391
Li	6.940	$\begin{cases} 6,0167 \\ 7,0180 \end{cases}$
O	16,00 (anıqlaması boyınsha)	$\begin{cases} 16,0000 \\ 17,0046 \\ 18,0057 \end{cases}$
Cl	35,457	$\begin{cases} 34,9800 \\ 36,9775 \end{cases}$



278-súwret. Bólekshelerdiń kóldeneń magnit maydanında awısıwınıń sxeması.



279-súwret. Magniydiń izotopları ushın alınǵan iymeklik.

S_1 sańlaǵı arqalı D simnıń ólshemleriniń shekli bolıwına baylanıslı tezlikleri hár qıylı bolǵan ionlar ushıp ótedi. D menen S_1 tiń ortalıǵındaǵı keńisliginde S_1 sańlaǵınıń tegisligine perpendikulyar baǵıtta qozǵalatuǵın ionlardıń traektoriyası tutas sızıq penen kórsetilgen. Bul ionlar S_1 sańlaǵı jaylasqan tegislikti ekinshi ret A noqatında S_1 den $2r$ qashıqlıǵında kesip ótedi. D menen S_1 lardıń arasında biz qaraǵan traektoriyanı α múyeshi menen kesip ótetuǵın ionlar S_1 sańlaǵı jaylasqan tegislikti B noqatında kesip ótedi. α múyeshin kishi dep boljasaq (278-súwretke qarańız)

$$AB = AS_1 - BS_1 = 2r - S_1C \cos \alpha$$

yamasa $S_1C = 2r$ teńligi orınlı bolǵanlıqtan

$$AB = 2r(1 - \cos \alpha) = 4r \sin^2 \frac{\alpha}{2}$$

teńligine iye bolamız. α múyeshi kishi bolǵanlıqtan, juwıq túrde mınaday teńlikti alamız:

$$AB = r\alpha^2.$$

α múyeshi kishi bolǵanda $r\alpha^2$ shaması r ge salıstırǵanda dım kishi. Demek, ionlardıń barlıq traektoriyaları S_1A tegisligin kishi AB kesindisiniń sheklerinde kesip ótedi. Bul orında S_2 sańlaǵı, al onnan keyin F Faradey cilindri jaylastırıladı.

Bul cilindr elektrometr menen tutastırıladı hám sonlıqtan oǵan kelip túsetuǵın ionlardı registriciyalaydı. Ionlardıń tezligi v potenciallar ayırması $V_1 - V_2$ menen

$$\frac{1}{2}mv^2 = e(V_1 - V_2) \quad (7)$$

ańlatpası boyınsha baylanısqan.

(6)- hám (7)- ańlatpalar boyınsha v tezligi ushın mınaday ańlatpanı alamız:

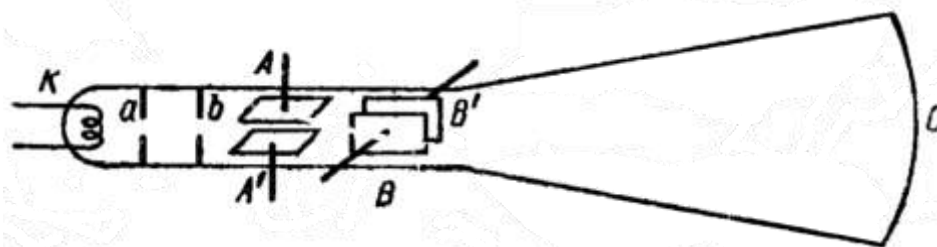
$$\frac{m}{e} = \frac{1}{2} \left(\frac{rH}{c} \right)^2 \cdot \frac{1}{V_1 - V_2}.$$

Solay etip, berilgen $2r$ qashıqlıǵında S_1 hám S_2 sańlaqlarınıń arasında hám magnit maydanınıń berilgen H mánisinde Faradey cilindrine shaması tezletiwshi $V_1 - V_2$ potencialǵa kerı bolǵan proporcional m/e qatnasına iye bolǵan ionlar kelip túsedı. $V_1 - V_2$ potenciallar ayırmasın ózgeritiw arqalı hár qıylı ionlardı registriciyalawǵa boladı.

279-súwrette D anodınıń betine magniydiń duzı sebilgen jaǵdayda alınǵan iymeklik kósetilgen. Abscissa kósherine tezletiwshi $V_1 - V_2$ potenciallar ayırmasına kerı bolǵan shamalar, al ordinata kósherine elektrometrdiń awısıqlarınıń sanı n qoyılǵan. Iymeklikte tórt pik bar. Olardıń birinshisi molekulalıq salmaǵı 28 bolǵan azottıń molekulalıq ionlarına (N_2^+) sáykes keledi. Qalǵan úsh pik atomlıq salmaqları 24, 25 hám 26 ǵa teń bolǵan magniydiń izotoplarınıń bir zaryadlı ionlarına juwap beredi.

Sońǵı waqıtları izotoplardıń massaların anıqlawdıń usılları jáne de jetilistirildi. Mısalı, elektr hám magnit maydanlarınń járdeminde qos fokuslawǵa iye bolǵan mass-spektrograf paydalanıladı. Bul ásbaptıń ajrata alıwshılıq kúshi sonshama úlken, onıń járdeminde atomlıq salmaǵı 2,01471 shamasına teń bolǵan vodorodtıń awır izotopınıń izi menen molekulalıq salmaǵı 2,01624 shamasına teń vodorodtıń jeńil izotopınıń molekulalıq ionınıń izlerin ajratıp kóriwge boladı.

§ 220. Elektronlıq dásteniń texnikalıq qollanıluwı. Házirgi waqıtları elektronlıq nur hár qıylı texnikalıq maqsetlerde paydalanıladı. Eń dáslep waqıt boyınsha tez ózgeretugin elektrlik processlerdi úyreniw ushın xızmet etetuǵın katodlı oscillograftıń dúzilisin táriyipleymiz. Katodlıq oscillograftıń dúzilisi sxema túrinde 280-súwrette kórsetilgen. Ishinen hawası sorıp alınǵan shiyshe ıdistiń ishinde elektronlardıń deregi xızmetin atqaratuǵın qızdırılauıǵın K katodi jaylastırılǵan. Elektronlar turaqlı maydannıń járdeminde tezletiledi. a hám b diafragmalarınıń járdeminde olardan jıńışke dáste kesip alınadı. Bul dáste ıdistiń barlıǵı boyınsha ushıp ótedi hám fluorescencalanıwshı zat penen qaplangan C diywalında jaqtılıq shıǵarıp turatuǵın daqtı payda etedi. Ushıw jolında elektronlar dástesi bir birine perpendikulyar tegislikte jaylasqan AA' hám BB' , plastinkalardıń arası arqalı ótedi. AA' plastinkasına waqıttan ǵárezligin úyreniw maqsetke muwapıq keletuǵın $V_1 - V_2$ potenciallar ayırması túsindiriledi. Ádette waqıtqa baylanıslı dáwirli túrde ózgeretuǵın potenciallar ayırması menen is alıp barıladı.



280-súwret.
Katodlı oscillograf.

AA' plastinkalarının arasındağı $V_1 - V_2$ potenciallar ayırması qanday dáwir menen ózgeretuğın bolsa E kernewligi de tap sonday dáwir menen ózgeretuğın elektr maydanı payda boladı. Bul maydannıń tásirinde elektronlıq dáste awısadı, sonıń menen birge elektronlardıń massası júdá kishi bolğanlıqtan ámeliy jaqtan dásteniń awısıwı maydannıń ózgeriwi menen dál birdey boladı. Elektronlıq dáste tárepinen C ekranında payda etiletuğın jaqtı daq dásteniń awısıwına baylanıslı terbele baslaydı. Kópshilik jağdayda orın alatuğın jetkilikli dárejedege joqarı jiyiliklerde bul terbelislerdi kóz benen tikkeley baqlawdıń múmkinshiligi joq - jaqtılı dáste tutas jolaqqa sozıladı. Terbelislerdi baqlaw múmkinshiligine iye bolıw ushın plastinkalardıń ekinshi jubı bolğan BB' lardıń arasına waqıt penen belgili baylanısqa iye ózgermeli E_0 maydanı payda etiwge boladı. Mısalı, BB' plastinkalarının jubınıń arasında garmonikalıq terbelislerdiń nızamı boyınsha ózgeretuğın cikllıq jiyiligi ω_0 bolğan maydandı payda etiwge boladı; bunday jağdayda:

$$E_0 = A_0 \cos \omega_0 t.$$

Eger úyreniletuğın potenciallar ayırması $V_1 - V_2$ da waqıtqa baylanıslı garmonikalıq nızam boyınsha ózgeretuğın bolsa, onda

$$V_1 - V_2 = A \cos(\omega t + \delta),$$

teńligine iye bolamız hám bunday jağdayda elektronlıq dáste bir biri menen perpendikulyar bolğan eki garmonikalıq terbelmeli qozğalısqqa qatnasadı (I tomğa qarańız) hám C ekranındağı jaqtılıq shıǵarıp turğan daq Lissaju figuralarınıń birin payda etedi. Bul figuranıń túrin bilip hám E_0 diń waqıt boyınsha ózgerisiniń jiyiligi menen amplitudasın biliw jolı menen úyreniletuğın $V_1 - V_2$ potenciallar ayırmasınıń ózgeriwiniń xarakterin de anıqlawğa boladı. Eger ω hám ω_0 jiyilikleri birdey bolsa, onda fluoresciyalanatuğın ekranda ellips payda boladı hám onıń belgili bolğan jağdayda dóńgelekke yamasa tuwrı sızıqqa aylanıwı múmkin. C ekranında payda bolğan figuralardıń súwretin túsiwge boladı hám bunday jağdayda *oscillogrammalar* dep atalatuğın súwretler alınadı.

Sońǵı waqıtları ózgermeli maydannıń tásirinde AA' plastinkalarının arasında payda bolatuğın elektronlıq dásteniń terbelisleriniń qolaylıraq bolğan "waqtılıq skannerlew" paydalanıla basladı. Onıń ushın BB' plastinkalarının arasında waqıtqa baylanıslı sızılıq ózgeretuğın kernewligi E_0 ge teń maydan payda etiledi:

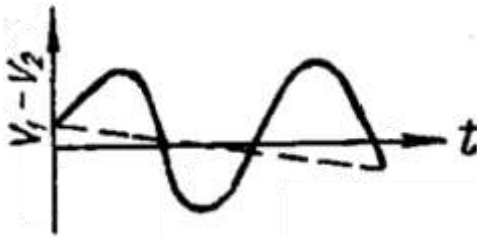
$$E_0 = At.$$

Onı ámelge asırıw ushın BB' plastinkalarına parallel túrde kondensatordı tutastıradı hám bul kondensator waqıttıń ótiwi menen úzliksiz zaryadlanadı. Bunday jağdayda C ekranındağı jaqtılıq shıǵarıp turğan daq iymeklikti tikkeley túrde sızadı. Bunday iymeklikti biz ordinata kósherine waqıttıń bazı bir $f(t)$ funkciyası bolğan $V_1 - V_2$ diń mánislerin, al abscissa kósherine waqıt t nı qoyıw menen alğan bolar edik (281-súwret). E_0 maydanınıń úzliksiz úlkeyiwi dásteni C ekranınıń sheklerinden sırtqa shıǵarğan bolar edi, sonlıqtan bazı bir $t = \tau$ waqıttan keyin E_0 shamasınıń mánisin nolge shekem tez kishireyiwge májbúrleydi hám bunnan keyin ol qaytadan waqıtqa baylanıslı sızılıq túrde ósedı. E_0 kernewliginiń usınday bolıp tosınnan nolge shekem kemeyiwi, mısalı, kondensatordıń qısqışlarına razryadlı trubkanı jalǵaw jolı menen ámelge asırıwğa boladı; kondensatordıń plastinkalarındağı potenciallar ayırması tutandıruw⁵⁶ potencialınan kishi bolğan jağdayda trubkanıń qarsılıǵı ele úlken boladı hám sonlıqtan trubkanıń bar bolıwı kondensatordıń zaryadlanıwına tásin tiygizbeydi.

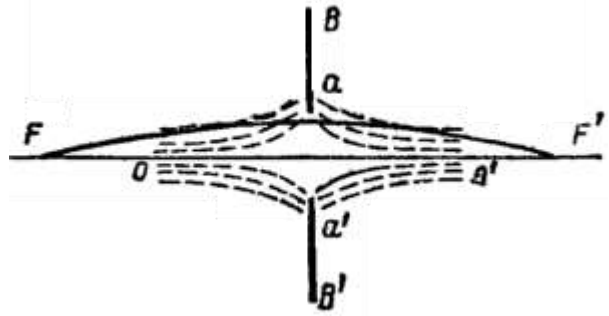
Potenciallar ayırmasınıń shaması tutandıruw potencialınıń mánisine jetken waqıtta, trubka jaqtılıq shıǵaradı hám kondensator usı trubka arqalı zaryadsızlanadı. Kondensatordıń zaryadsızlanıwı processine jaqtılıq shıǵarıp turğan noqattıń ornına tez qaytıp keliwi sáykes keledi (281-súwrettege punktir tuwrı). Bunnan keyin jaqtılıq shıǵarıp turğan noqat qaytadan iymeklikti sıza baslaydı. Úyrenilip atırğan potenciallar ayırmasınıń waqıt boyınsha ózgerisi taza garmonikalıq xarakterge iye bolğan jağdayda taza iymekliktiń burınǵı iymekliktiń ústine túsiwin júzege

⁵⁶ "Potencial zajiganiya" sózi "tutandıruw potencialı" sózi menen almastırılǵan.

keltiriwge boladı.



281-súwret. Oscillogramma.



282-súwret. Elektrostatikalıq elektronlıq linza.

Házirgi waqıtlardaǵı oscillograflar jıyılıǵı 10^7 sek^{-1} shamasına teń jıyılıqlardı úyreniwge múmkinshilik beredi hám jaqtılıq shıǵarıp turǵan daqtırnı 1 v kernewde 1 mm shamasındaǵı awısıwdı bere aladı.

Oscillografları ózgermeli toqlardı úyreniwde keń túrde qollanılıp atır (232-paragrafqa qarańız).

Elektronlıq dásteniń basqa qollanıwı onıń elektr hám magnit maydanlarındaǵı awısıwı bolıp tabıladı. Bunday jaǵdayda elektronlıq dásteni fokuslawdıń múmkinshiligi payda boladı. Bunday fokuslanıwda elektronlıq dástelerdiń awısıwı menen linzalardaǵı jaqtılıq nurınıń sınırıń arasındaǵı analogiya tabıladı. Usıǵan baylanıslı elektronlıq dástelerdiń bir tekli bolmaǵan maydanlardaǵı tarqalıwı *elektronlıq optika* atamasına iye boldı.

"Elektronlıq linza" ushın eń ápiwayı misal retinde teń ólshewli teris zaryadlangan BB' plastinkasındaǵı dóńgelek aa' tesiginiń qasında payda bolatuǵın bir tekli emes elektr maydanın kórsetiwge boladı (282-súwret). Bunday tesiktiń qasındaǵı kernewlik sıızqları punktir menen súwretlengen. Tesiktiń kósheri OO' tırnı baǵıtında qozǵalatuǵın elektronlar simmetriyanıń orın alıwına baylanıslı hesh qanday awısıwǵa ushıramaydı. OO' kósherin bazı bir F noqatında kesip ótetuǵın qálegen elektron ózi ushıp ótetuǵın aa' tesigine jaqınlasqan sayın kóbirek awısadı.

Solay etip, plastinkadan keyin elektron qaytadan OO' kósherin bazı bir F' noqatında kesip ótedi.

Eger F noqatı arqalı úlken bolmaǵan denelik múyeshtiń ishindegi traektoriyalardıń aǵısı ótetuǵın bolsa, onda olardıń barlıǵı da bir F' noqatında kesilisedi hám sonlıqtan usı F' noqatı F noqatınıń "súwreti" bolıp tabıladı. Al keńirek dástelerde traektoriyalardıń barlıǵı F' noqatında kesilispaydı, yaǵnıy optikadaǵı sferalıq aberraciyaǵa sáykes keletuǵın qubılıs baqlanadı.

Elektronlıq optikanıń usılları elektronlıq dástelerdiń bir tekli bolmaǵan elektrostatikalıq maydandaǵı tarqalıw nızamları menen jaqtılıq nurlarınıń sınıw kórsetkishi ózgermeli bolǵan móldir ortalıqlardaǵı tarqalıw nızamlarınıń arasındaǵı formal túrdegi uqsaslıqqa tiykarlangan. Bul analogiyanı ápiwayı misalda túsindiremiz. Meyli elektronlar potencial turaqlı V_1 mániske iye bolǵan A keńisliginiń oblastında turaqlı v_1 tezligi menen tuwrı sıızqlı qozǵalatuǵın bolsın (283-súwret). Bunnan keyin ol potencialı turaqlı, biraq basqa V_2 shamasına teń C oblastına ótetuǵın bolsın. Bul oblastta elektron jáne de tuwrı sıızqlı traektoriya boyınsha qozǵaladı. Shegaralıq B oblastında potencial V_1 mánisinen V_2 mánisine shekem ózgeredi, usınıń nátiyjesinde bul oblastta nolge teń bolmaǵan maydanniń kernewligi E boladı hám, demek, bul orında hár bir elektrongá oblastlardı ayırıp turǵan shegaraǵa perpendikulyar bolǵan kúsh tásir etedi. Bul kúштиń tásirinde elektronnıń tezliginiń normal qurawshısı v_n ózgeriske ushıraydı, al tezliktiń tangenciallıq qurawshısı v_t ózgerissiz qaladı. i_1 menen i_2 arqalı shegaraǵa túsirilgen normal menen elektrondardıń ab hám cd traektoriyalarınń arasındaǵı múyeshterdi belgilesek, onda mınaday qatnaslardı alamız:

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

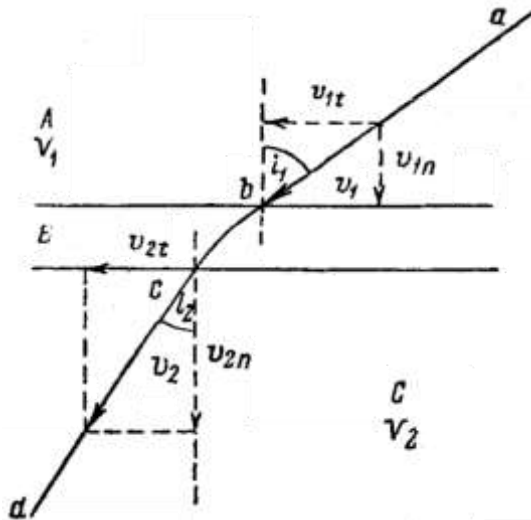
$v_{1t} = v_{2t}$ teńligi orınlı bolǵanlıqtan

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{v_2}{v_1}$$

qatnasına iye boladı. Bul qatnas

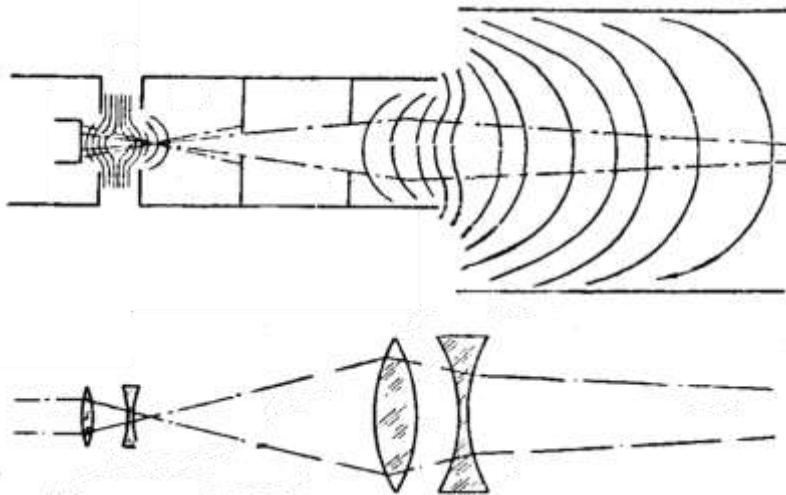
$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

túrinde jazılatuǵın optikalıq sınıw nızamına uqsas. Bul qatnasta n_1 menen n_2 arqalı eki móldir zattıń sınıw kórsetkishleri belgilengen.



283-súwret.
Elektronlıq dásteniń sınıwı.

Elektrostatikalıq fokusirovka usılı házirgi zaman texnikasında keńnen qollanımaqta. 284-súwrette bir qatar cilindrler menen dóńgelek tesikleri bar diaframlardan turatuǵın házirgi zaman oscillografiniń fokuslawshı sisteması kórsetilgen. Súwrettiń tómengi bóliminde oǵan uqsas bolǵan optikalıq linzalardıń sisteması keltirilgen.

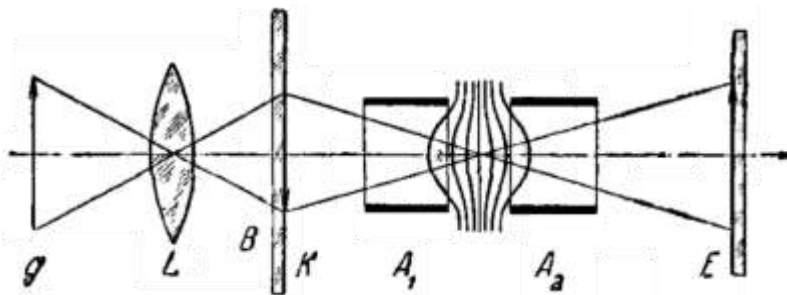


284-súwret.
Oscillografiniń fokuslawshı sisteması.

285-súwrette sońǵı waqıtları keń túrde qollanıla baslaǵan *elektronlıq-optikalıq túrlendirgish* atamasına iye ásbaptıń sxeması kórsetilgen. Bul súwrette g arqalı haqıyqıy súwreti L optikalıq linzanıń járdeminde móldir bolǵan B plastinkasına alıp beriletuǵın belgilengen. B plastinkasınıń betine K katodınıń xızmetin atqaratuǵın metaldıń juqa qatlamı otırǵızılǵan. g obekti shıǵaratuǵın jaqtılıq nurlarınıń tásirinde bul katodtan elektronlar ushıp shıǵadı (III tomdaǵı fotoeffekt qubılısı); elektronlardıń bul aǵısı elektrostatikalıq A_1 hám A_2 linzalarınıń járdeminde fluorescenciyanatuǵın E ekranına fokuslanadı. Solay etip, E ekranında g obektiniń kózge kórinetuǵın súwreti qaytadan alınadı. Bunday túrlendiriwdiń maqseti minadan ibarat: g obekti kózge kórinbeytuǵın ultrafiolet yamasa infraqızıl nurlardı shıǵara aladı; elektronlıq-optikalıq túrlendirgish bolsa obekttiń fluorescenciyanıwshı E ekranı tárepinen shıǵarılatuǵın kózge kórinetuǵın nurlardaǵı súwretin payda etiwge múmkinshilik beredi. Usınıń menen birge, elektronlıq-optikalıq túrlendirgish "kúsheytkishtiń" xızmetin atqara aladı: obekt tárepinen beriletuǵın

nurlanıwdır intensivliginiń júdá kishi bolıwı múmkin, al fluorescenciyanıwshı ekranniń intensivligi bolsa elektronlardıń tezletiwshı elektrostatikalıq maydanda alǵan energiyasınıń esabınan ádewir jaqtılı boladı.

285-súwret.
Elektronlıq-optikalıq
túrlendirgish.



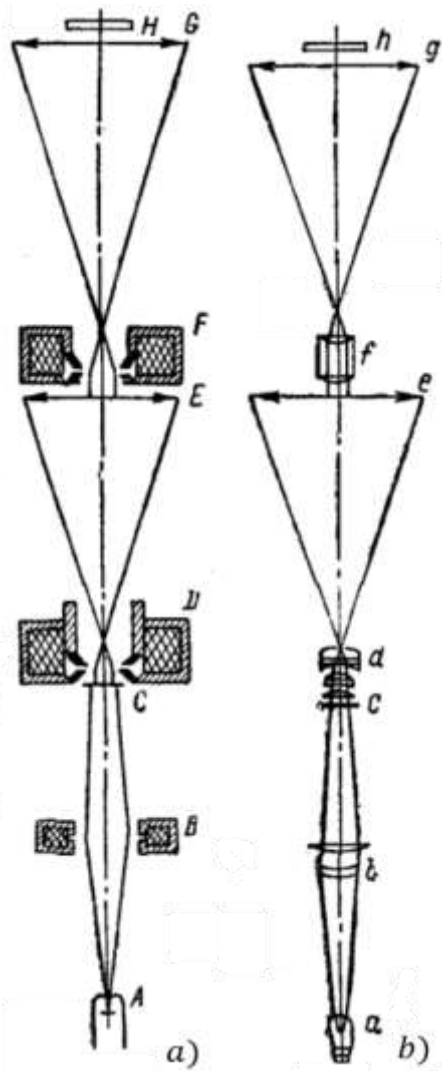
Magnit maydanınıń fokuslawshı tásiiri elektronnıń salıstırmalı zaryadın anıqlaw usılın táriyiplegende kórsetilgen edi (218-paragraf). Bir tekli magnit maydanına kelip túsetuǵın hám baslanǵısh tezligi maydanniń baǵıtı menen súyir α múyeshin jasaytuǵın elektron vintlik sıızıqtır boyı menen qozǵaladı. Kishi α múyeshlerinde vintlik sıızıqtır adımı α nıń mánisinen ámeliy jaqtan ǵárezli emes. Usınıń nátiyjesinde, traektoriyaları ashılıw múyeshi⁵⁷ úlken bolmaǵan konustır sheklerinde jaylasqan elektronlar dástesi magnit maydanınıń tásirinde konustır kósheri baǵıtındaǵı noqatlıq fokusta jaynaladı. Solay etip, magnit maydanı optikadaǵı ápiwayı jıynawshı linzaday bolıp xızmet etedi eken. Ushları arnawlı túrde islengen formaǵa iye bolǵan katushkalardıń qasında payda bolatuǵın bir tekli emes magnit maydanı da fokuslawshı tásirge iye boladı.

Elektronlıq dástelerdi fokuslaw múmkinshiligi *elektronlıq mikroskoplardı* qurıwǵa múmkinshilik beredi. Katod tárepinen shıǵarılatuǵın elektronlar hár qıylı bólimleri elektronlardı azı-kópki irketuǵın izertlew obekti arqalı ótedi. Elektronlıq linzalardıń sistemasınıń járdeminde bul obektin úlkeytilgen "sayalıq" súwreti alınadı. Súwret fluorescentli ekranniń, yamasa tez ushatuǵın elektronlardıń kelip urılıwınıń saldarınan qarawıtıw qásiyetine iye bolǵan fotoplastinkanıń járdeminde alınadı. 286-súwrette magnit linzalarına iye bolǵan elektronlıq mikroskoptıń sxeması menen fotokamerası bar optikalıq mikroskoptıń sxeması salıstırılǵan. Mikroskoplardıń birdey bolǵan bólimleri birdey háripler menen belgilengen: elektronlıq mikroskop ushın úlken A, B, C ... hám optikalıq mikroskop ushın kishi $a, b, c, \dots$ háripler paydalanılǵan. Elektronlıq mikroskopta A - elektronlardıń deregi; B - kondensordıń xızmetin atqaratuǵın hám elektronlardıń dástesin C obektke qaray baǵdarlaytuǵın magnitlik linza, D - magnitli obektiv; E - aralıqlıq súwret; F - proekciyalawshı linza hám G - fotoplastinka H qa kelip túsetuǵın eń aqırında payda bolatuǵın súwret. Elektronlıq mikroskoptıń barlıq bólimleri germetik túrde jabılatuǵın kolonnanıń ishinde jaylastırıladı. Nasoslardıń járdeminde hawa elektronlardıń erkin júriw jolınıń uzınlıǵı derekten fotoplastinkanıń arasına shekemgi qashılıqtan úlken bolatuǵınday basımǵa shekem sorıp alınadı. Optikalıq mikroskopta: a - jaqtılıqtıń deregi, b - kondensor, c - obekt, d - obektiv, e - aralıqlıq súwret, f - proekciyalawshı linza, g - eń aqırında payda bolǵan súwret, h - fotoplastinka. Házirgi waqıtlardaǵı elektronlıq mikroskoplar 40 000 ese hám onnan da joqarı úlkeytiwshilikke iye⁵⁸. Bunday úlkeytiwler optikalıq mikroskoplar beretuǵın úlkeytiwlerge salıstırǵanda júdá joqarı (shama menen 2000 ese). Solay etip, elektronlıq mikroskoplar ádettegi optikalıq mikroskoplardıń járdeminde úyreniwge bolmaytuǵın obektlerdi úyreniwge múmkinshilik beredi. Elektronlıq mikroskoplardıń járdeminde optikalıq

⁵⁷ Geometriyada keńnen qollanılatuǵın "ugol rastvoreniya" sózi "ashılıw múyeshi" túrinde awdarıldı (Awdarıwshılar).

⁵⁸ Házirgi waqıtlardaǵı elektronlıq mikroskoplardıń úlkeytiwshilik qábiletligi 1 millionnan da joqarı. Olarda paydalanılatuǵın joqarı kernewlerde doǵanıń payda bolmawı ushın hawanıń basımı 10^{-7} den 10^{-9} Pa shamasına shekem tómendetiledi (Awdarıwshılar).

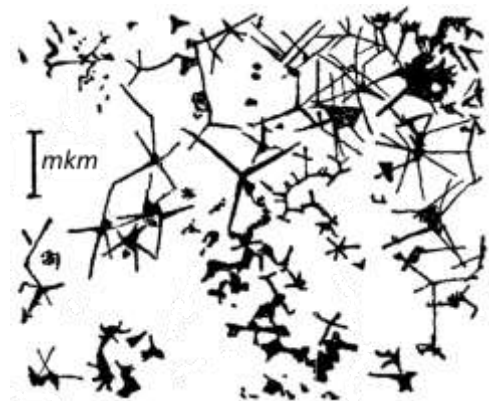
mikroskoplardıń úlkeytiwinen joqarı bolǵan úlkeytiwlerdiń alınıw sebebi III tomda ayıladı.



286-súwret.
Elektronlıq (a) hám optikalıq (b)
mikroskoplardıń sxemaları.

287-súwrette elektronlıq mikroskoptıń járdeminde alınǵan ZnO nıń shańında uslap turılǵan bólekshelerdiń foto súwretleri keltirilgen. Bóleksheler júdá mayda iyne tárizli kristallar bolıp tabıladı. Foto súwrettiń shep tárepinde 1 mkm uzınlıqqa sáykes keletuǵın masshtab kórsetilgen. Sovetler Soyuzında llektronlıq mikroskoptıń originallıq konstrukciyası akademik A.A.Lebedev hám V.N.Vercner tárepinen islep shıǵıldı.

287-súwret.
Elektronlıq mikroskoptıń járdeminde alınǵan
 ZnO bóleksheleriniń foto súwreti.



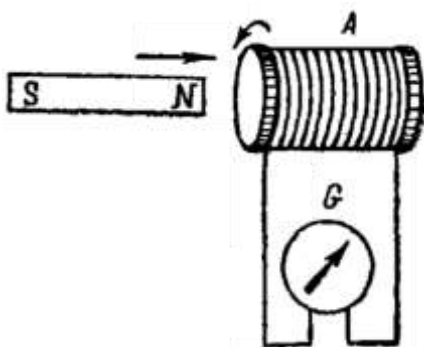
XX BAP

ELEKTROMAGNITLIK INDUKCIYA

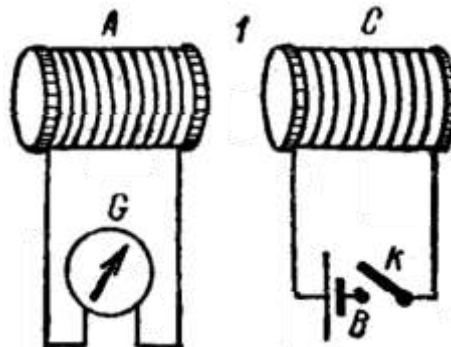
§ 221. Elektromagnitlik indukciya qubılısı. Elektromagnitlik indukciya qubılısı 1831-jılı Faradey tárepinen ashıldı. Bul qubılıs minalardan ibarat: *qálegen ótkizgish tuyıq konturda usı kontur tárepinen sheklengen maydan arqalı ótetuǵın magnit indukciyasınıń aǵısı ózgergende elektr toǵı payda boladı. Bunday toqtı indukciyalıq toq dep ataydı.*

Elektromagnitlik indukciya qubılısın tómendegidey tájiriybelerde baqlawǵa boladı.

1. Galvanometr arqalı tuyıqlanǵan *A* solenoidın alamız (288-súwret) hám onıń ushlarınıń birine turaqlı magnitti jaqınlatamız. Bunday jaǵdayda solenoidta *G* galvanometriniń strelkasınıń awısıwı boyınsha tabılatuǵın elektr toǵı payda boladı. Magnittiń qozǵalısı toqtaǵanda bul toq ta toqtaydı. Eger bizler magnitti qashıqlata baslasaq, onda solenoidta qaytadan toq payda boladı. Biraq bul toqtıń baǵıtı solenoidtı jaqınlatqanda payda bolǵan toqtıń baǵıtına qarama-qarsı. Tap usınday qubılıstı magnitti qozǵalıssız qaldırıp, solenoidtı qozǵaǵan jaǵdayda da baqlawǵa boladı. Sońında, turaqlı toq ótip turǵan ekinshi solenoidtı alıwǵa da boladı. Onı ornınan qozǵaǵanda ekinshi solenoidta toq payda boladı.



288-súwret. Magnitti qozǵaw jolı menen solenoidta indukciyalıq toqtı qozdırıw.



289-súwret. Qońsı solenoidtaǵı toqtı qosıw hám ajratıw jolı menen solenoidtaǵı indukciyalıq toqtı qozdırıw.

2. Qozǵalmaytuǵın eki *A* hám *C* solenoidların alamız (289-súwret). Meyli, bul jaǵdayda da *A* solenoidı *G* galvanometri menen tuyıqlanǵan hám *C* solenoidı *B* galvanikalıq elementi hám *k* gilti bar shınjırǵa tutastırılǵan bolsın. *k* giltiniń járdeminde *C* solenoidında toqtı qosqanda *A* solenoidında *G* giltiniń awısıwı menen tabılatuǵın qısqa múddetli toq payda boladı. *C* solenoidı boyınsha toqtıń bunnan bılay ótip turıwınıń barısında *A* solenoidta hesh qanday toq baqlanbaydı. *C* solenoidında toqtı ajratqanda qaytadan, biraq baǵıtı dáslepki toqtıń baǵıtına qarama-qarsı bolǵan qısqa múddetli toq payda boladı.

Táriyiplengen tájiriybelerdi solenoidtıń ornına sımınıń bir oramın alıp ótkeriwge de boladı. Biraq, bunday jaǵdayda qubılıs ázzirek boladı.

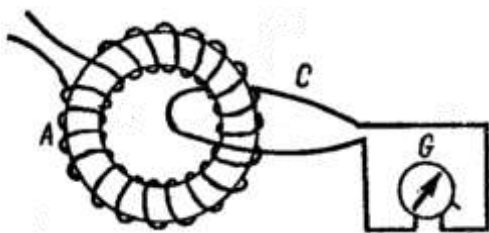
Bul tájiriybelerdiń nátiyjelerin tallaymız. Bul tájiriybelerdiń birinshileri *A* solenoidtaǵı toqtıń magnit jaqınlaǵanda yamasa uzaqlasqanda ǵana, yaǵnıy solenoidtıń qasında magnit maydanı ózgeretuǵın yamasa solenoidtıń ózi magnittiń bir tekli bolmaǵan magnit maydanında qozǵalǵan jaǵdayda payda bolatuǵınlıǵın kóremiz. Magnittiń solenoidqa salıstırǵanda qozǵalısı toqtawdan (yamasa magnitke salıstırǵanda solenoidtıń qozǵalısı) solenoidtıń qasındaǵı magnit maydanı turaqlı boladı hám solenoidtaǵı toqtıń ótiwi toqtaydı. Ekinshi tájiriybedegi qubılıs birinshi tájiriybedegi qubılısqa júdá usaydı. Bul jaǵdayda magnit maydanı *C* solenoidındaǵı payda bolatuǵın yamasa joq bolatuǵın toq tárepinen payda etiledi. Eki jaǵdayda da ótkizgish konturdiń qasında magnit maydanınıń shaması, usıǵan saykes, kontur tárepinen óziniń ishine qamtıp

alınatúǵın magnit aǵısınıń shaması ózgeredi. Eki jaǵdayda da ótkizgish konturdıń qasında magnit maydanınıń shaması, demek, kontur tárepinen qamtıp alınatúǵın bet arqalı *magnit indukciyasınıń aǵısı ózgeredi*. Máseleniń magnit indukciyasınıń aǵısı menen baylanıslı ekenligi minalardan kelip shıǵadı: eger *ótkizgish tuyıq konturdı bir tekli magnit maydanında burǵanda da indukciyalıq toq payda boladı*. Bul jaǵdayda ótkizgishtiń qasındaǵı magnit maydanınıń indukciyasınıń shaması turaqlı bolıp qaladı, al tek onıń konturdıń beti arqalı aǵısı ǵana ózgeredi. Eger tuyıq konturdı *bir tekli magnit maydanında ilgerilemeli qozǵaltsaq, onda ol arqalı indukciya aǵısınıń shaması turaqlı bolıp qaladı hám indukciyalıq toq payda bolmaydı*. Solay etip, usı paragraftıń aldında keltirilgen anıqlamanıń durıs ekenligi dálillenedi: tuyıq ótkizgish kontur arqalı indukciyanıń aǵısı ózgergende indukciyalıq toq payda boladı.

Biraq, mınaday jaǵdaydı ańǵarıw kerek boladı: joqarıda táriyiplengen tájiriybelerden indukciyalıq toqtıń magnit indukciyası B nıń yamasa kernewlik H tıń aǵısı boyınsha anıqlanatuǵınlıǵı kórinip turǵan joq. Magnetikler bolmaǵan jaǵdayda bul jaǵdaydıń áhmiyeti joq, sebebi magnit indukciyası B menen magnit maydanınıń kernewligi H bir birine teń, biraq magnetik bolǵan jaǵdayda B penen H tıń arasındǵı ayırmanıń kórinıwi kerek. Ótkizgish kontur jaylasqan barlıq keńislikti magnit sińirgishligi μ úlken bolǵan magnit penen toltırıw ámeliy jaqtan qıyın, sebebi usınday magnetikler (temir, nikel h.t.b.) qattı deneler bolıp tabıladı. Biraq, tájiriybeni bılayınsha ámelge asırıwǵa boladı: magnetik keńisliktiń tek bir bólimin toltırıp turatuǵın bolsa da, magnit maydanınıń barlıǵın usı magnetiktiń ishinde toplanǵan etiwge boladı. Onıń ushın ótkizgish C konturı menen qamtıp alınǵan A toroidin alamız. Bunday jaǵdayda shıńjırdıń eki qońsılás buwınları bir birin qamtıydı (290-súwret). Meyli, A toroidi arqalı toq ótetuǵın bolsın; bul toq payda etken magnit maydanı tek toroidtiń ishinde jıynalǵan hám, demek, bul maydannıń barlıq aǵısı C konturı arqalı ótedi. Eger biz A toroidındaǵı toqtı ajıratsaq, onda aǵıstıń ózgerisi orın aladı (aǵıs joǵaladı) hám konturda indukciyalıq toq payda boladı. Endi A toroidiniń ishki bólimin temir menen toltıramız. Bırınǵıday, magnit maydanı tek toroidtiń ishinde ǵana boladı. Bunday jaǵdayda maynannıń kernewligi H bırınǵıday bolıp qala beredi, sebebi toqtıń magnit maydanınıń kernewligi magnetiktiń bar yamasa joq ekenliginen ǵárezli emes (eger magnetik maydan nolge teń bolmaǵan keńislikti tolıǵı menen toltırıp turatuǵın bolsa). Biraq, magnit indukciyası $B = \mu H$ bolsa μ ese úlkeyedi. A toroidındaǵı toqtı jáne ajıratıp (toqtıń dáslepki mánisin bırınǵıday dep esaplaymız), biz C konturındaǵı indukciyalıq toqtıń ádewir úlkeygenligin tabamız. Bul indukciyalıq toqtıń payda bolıwınıń indukciyanıń aǵısınıń ózgerisi menen baylanıslı ekenligin dálilleydi.

Endi indukciyalıq toqtıń baǵıtın anıqlaymız. 1833-jılı Peterburg universitetiniń professorı E.X Lenc tájiriybelerdiń nátiyjelerin ulıwmalastırıp mınaday qaǵıydanı berdi: *tuyıq konturda payda bolǵan toq kontur tárepinen sheklengen bet arqalı usı toqtı payda etken magnit indukciyasınıń aǵısınıń ózgerisin kompensaciyalaytuǵınday óziniń menshikli magnit indukciyasınıń aǵısın payda etedi*.

Lenc qaǵıydasınıń kóz-qarasında turıp, joqarıda táriyiplengen tájiriybelerdi tallaymız. Birinshi tájiriybede magnittiń arqa polyusı solenoidqa jaqınlaǵanda, solenoidta eger oǵan alıp kelinetuǵın magnit tárepinen qaraǵanda saat strelkasınıń qozǵalıś baǵıtına qarama-qarsı baǵıtta toq payda boladı (288-súwret). Bul jaǵdayda magnit tárepinen payda etilgen indukciyanıń aǵısı solenoidtiń ishine qaray baǵıtlanǵan hám magnit jaqınlaǵanda úlkeyedi. Solenoidtaǵı indukciyalıq toqtıń magnit maydanı solenoidtan sırtqa qaray baǵıtlanǵan hám, sonlıqtan, magnittiń maydanınıń úlkeyiwın kompensaciyalaydı. Eger solenoidqa jáne de magnit tárepinen qarasaq, onda magnittiń arqa polyusın alıslatqanda solenoidta saat strelkasınıń qozǵalıś baǵıtındaǵı toq payda boladı. Magnit tárepinen payda etilgen indukciyanıń aǵısı bırınǵıday solenoidtiń ishine qaray baǵıtlanǵan, biraq bul jaǵdayda aǵıs kishireyedi. Solenoidtaǵı indukciyalıq toqtıń magnit maydanı bul ret solenoidtiń ishine qaray baǵıtlanǵan hám, demek, magnittiń maydanınıń kemeyiwın kompensaciyalaydı. Solay etip, jaǵdaylardıń ekewi de Lenc qaǵıydasına sáykes keledi eken.



290-súwret.

Toroidtı sırttan qorshap alatuǵın qurıqtalı (ilmektegi) indukciyalıq toqtıń qozıwı.

Bul eki tájiriýbeniń nátiýjelerin tallap, basqa juwmaqqa da keliwge boladı: magnittiń arqa polyusın solenoidqa jaqınlastırǵanda payda bolǵan indukciyalıq toqtıń baǵıtı solenoidtiń magnitke jaqın ushı magnit sızıqlarınıń dereǵına aylanatuǵınday bolıp baǵıtlangan, sonlıqtan magnit penen solenoid bir biri menen iyterisedi, yaǵnıy indukciyalıq toqtıń payda bolıwına alıp keledi. Magnitti alıslatqanda magnit penen solenoid tartısaǵı, yaǵnıy olardıń arasında magnittiń qozǵalıwına qarsılıq jasaytuǵın kúsh qaytadan payda boladı.

Usı paraǵraftıń basında qarap ótilgen ekinshi jaǵdaydıń da Lenc qaǵıydasına sáykes keletuǵınlıǵına isenemiz. C solenoidındaǵı toqtı qosqanda A solenoidında keri baǵıttaǵı toq payda boladı. C solenoidındaǵı toqtı ajratqanda A solenoidında tap sonday baǵıttaǵı toq payda boladı. Bul nátiýjeler Lenc qaǵıydasına sáykes keledi: maylı, C solenoidında ajratqanda onıń 1 ushına qaraǵanda saat strelkasınıń qozǵalıw baǵıtına qara-qarsı baǵıttaǵı toq payda bolǵan bolsın (289-súwret). Bunday jaǵdayda bul toq payda etken magnit indukciyasınıń aǵısı A solenoidiniń ishine kiredi hám toqtı ajratqanda kúshyedi. A solenoidında indukciyalıq toq payda etken magnit indukciyasınıń aǵısı onnan shıǵadı hám, demek, solenoidtiń aǵısınıń ósiwin kompensaciyalaydı. Tap usınday jollar menen C solenoidındaǵı toqtı ajratqanda A solenoidındaǵı indukciyalıq toqtıń magnit maydanınıń C solenoidiniń aǵısın kompensaciyalaytuǵınlıǵına iseniwge boladı.

§ 222. Indukciyanıń elektr qozǵawshı kúshin anıqlaw. Tuyıq konturda indukciyalıq toqtıń payda bolıwı magnit indukciyasınıń ózgermeli aǵısınıń tásirinde elektr qozǵawshı kúshitiń payda bolıwı menen baylanıslı. Bul e.q.kúshiniń shaması birinshi ret Faradey tárepinen magnit indukciyasınıń aǵısınıń ózgerisiniń tezligi menen baylanıstırıldı. Faradey tárepinen berilgen bul qatnas energianıń saqlanıw nızamınan kelip shıǵadı.

Qozǵalmalı AC bólimine iye konturdı paydalanıp, dara jaǵday ushın energiyalıq esaplawlar ótkeremiz (291-súwret). Bunday konturdı biz toǵı bar konturdı magnit maydanında qozǵaǵanda islengen jumıstı esaplawda paydalanǵan edik (210-paragraf).

Meyli, konturǵa e.q.kúshi $\mathcal{E}$ bolǵan B galvanikalıq elementi tutastırılǵan bolsın. Usı e.q.kúshi tárepinen Δt waqıtı ishinde islengen jumıs $\mathcal{E}I\Delta t$ ge teń, bul kóbeymede I arqalı konturdaǵı toqtıń kúshi belgilengen. Eger kontur magnit maydanınan sırtta jaylasqan bolsa, onda barlıq jumıs $I^2 R \Delta t$ lenc-djoullıq jıllılıǵınıń bólinip shıǵıwı ushın jumısaladı. Bunday jaǵdayda Om nızamına sáykes toqtıń kúshi mınaǵan teń:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} \quad (1)$$

Endi kontur barlıq waqıtta turaqlı bolıp qalatuǵın magnit maydanında jaylasqan dep boljayıq. Ápiwayılıq ushın bul maydandı bir tekli hám konturdıń tegisligine perpendikulyar, sızılmanıń arǵı tárepine qaray baǵıtlangan dep esaplaymız. Bunday jaǵdayda qozǵalatuǵın AC bólimine usı AC ǵa perpendikulyar oń tárepke qaray baǵıtlangan f kúshi tásir etedi. Bul kúshitiń tásirinde konturdıń qozǵalatuǵın AC bólimi qozǵala baslaydı. Meyli, Δt waqıtı ishinde ol sızılmada punktir menen kórsetilgen $A'C'$ awhalına jılıyıtıwı bolsın. 210-paragrafta ayılǵanlar boyınsha, bunday jaǵdayda

$$\Delta A = I \cdot \Delta \Phi$$

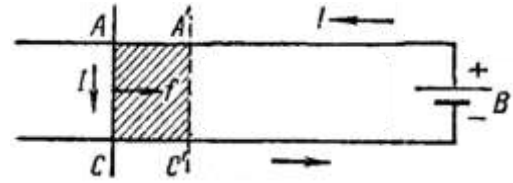
mexanikalıq jumısı islenedi. Bul ańlatpada $\Delta \Phi$ arqalı $ACA'C'$ konturı arqalı ótken magnit indukciyasınıń aǵısı, al I arqalı biz qaraǵan qozǵalıw waqıtında kontur arqalı ótken toqtıń kúshi belgilengen. Bul jumıs B elementiniń e.q.kúshiniń esabınan islenedi. Solay etip, endi elementtiń

e.q.kúshiniń tolıq jumısı $\mathcal{E}I\Delta t$ tek lenc-djoullıq jıllılıqtıń bólip shıǵarılıwı ushın ǵana emes, al konturdıń AC uchastkasınıń orın almasırtılıwı ushın da islenedi:

$$\mathcal{E}I\Delta t = I^2 R \Delta t + I \Delta \Phi.$$

291-súwret.

Indukciyanıń elektr qozǵawshı kúshine arnalǵan ańlatpanı keltirip shıǵarıwǵa.



Ulıwma aytqanda, Δt waqtınıń ishinde toqtıń kúshi I diń turaqlı bolıp qalmawı múmkin; sonlıqtan toqtıń kúshi I diń sezilerliktey ózgeriske ushıramawı ushın júdá kishi bolǵan dt waqt aralıǵın alıwımız kerek. Bunday jaǵdayda mınaday teńlik orınlı boladı:

$$\mathcal{E}I dt = I^2 R dt + I d\Phi. \quad (2)$$

Bul ańlatpada $d\Phi$ arqalı konturdıń shtrixlangan $ACA'C'$ bólimi arqalı ótetuǵın indukciyanıń aǵısı belgilengen. Biz qarap atırǵan jaǵdayda konturdıń bul bólimi sheksiz ensiz jolaq formasına iye boladı. (2)-teńlikti toqtıń kúshi I ge qarata sheship, mınaǵan iye bolamız:

$$I = \frac{\mathcal{E} - \frac{d\Phi}{dt}}{R}.$$

Bul teńlikti tuyıq shınjır ushın Om nızamı (1) menen salıstırıp, biz bul jaǵdayda e.q.kúshiniń ornın (eki shama bolǵan) galvanikalıq elementtiń e.q.kúshi $\mathcal{E}$ menen $-\frac{d\Phi}{dt}$ shamasınıń iyeleytuǵınlıǵın kóremiz. Bul aǵza kontur menen sheklengen bet arqalı indukciyanıń aǵısı Φ tiń ózgeriwiniń saldarınan payda bolǵan qosımsha e.q.kúshin beredi. Onı $\mathcal{E}_i$ arqalı belgilep, mınaday ańlatpanı alamız:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (3)$$

(3)-qatnas *Faradey nızamı* dep ataladı.

Indukciyanıń e.q.kúshi ushın Faradey nızamın biz konturdıń óziniń formasınıń ózgeriwiniń saldarınan konur arqalı ótetuǵın indukciyanıń aǵısı ózgeretuǵın jaǵday ushın aldıq. Biraq, bul qatnastıń kontur arqalı aǵıstıń ózgerisiniń neniń saldarınan júzege keletuǵınlıǵınan ǵárezsiz ekenligin kórsetiwge boladı: konturdıń formasınıń ózgeriwı, onıń burılıwı, bir tekli emes maydandaǵı orın almasırtıwı, sonıń menen birge maydannıń óziniń magnit indukciyasınıń waqtqa baylanıslı ózgeriwı múmkin.

(3)-teńliktiń oń tárepinde indukciya aǵısı Φ tiń waqt boyınsha alınǵan tuwındısı tur. Bul indukciya e.q.kúshi $\mathcal{E}_i$ diń indukciya aǵısınıń waqtqa baylanıslı ózgeriw tezligine proporcional ekenligi kórinip tur. Endi tek (3)-teńliktiń oń tárepindegi bólimniń aldındaǵı belginiń (minus) mánisin anıqlaw qaldı. Onıń ushın konturdı aylanıp shıǵıwdıń iqtıyarlı baǵıtın oń baǵıt dep qabıl etemiz. Eger toqtıń baǵıtı konturdı aylanıp shıǵıwdıń oń baǵıtı menen sáykes kelse, onda bunday baǵıtta oń dep esaplaymız. Usınıń menen birge shınjırda potencialdıń túsiwin oń aylanıp shıǵıw baǵıtına sáykes kelse, onda e.q.kúshin de oń dep esaplaymız. Konturdıń tegisligine normal júrgizemiz hám onıń oń baǵıtın 210-paragrafta kórsetilgen konturdı aylanıp shıǵıwdıń qaǵıydası menen baylanıstıramız. Konturdıń maydanı arqalı ótetuǵın indukciyanıń oń aǵısı arqalı normal menen parallel yamasa onıń menen súyir múyesh jasaytuǵın indukciya sızıqların payda etedi.

Konturdıń maydanı arqalı ótetuǵın indukciyanıń teris aǵısı normalǵa keri baǵıttaǵı yamasa onıń menen doǵal múyesh jasaytuǵın indukciyanıń sızıqların payda etedi. Bunday jaǵdayda (3)-teńliktiń oń tárepindegi minus belgisi indukciyanıń aǵısınıń úlkeyiwiniń $\left(\frac{d\Phi}{dt} > 0\right)$ konturdı teris baǵıtta aylanıp shıǵıw baǵıtında tásir etetuǵın e.q.kúshin payda etetuǵınlıǵın ańǵartadı.

Indukciyanıń aǵısınıń kishireyiwi ($\frac{d\Phi}{dt} < 0$) konturdı oń baǵıtta aylanıp shıǵıw baǵıtında tásir etetuǵın indukciya e.q.kúshin payda etedi. Solay etip, (3)-ańlatpa bir waqıtta indukciya e.q.kúshiniń shamasın da, baǵıtın da beredi eken. Bul baǵıttıń Lenc qaǵıydasına sáykes keletuǵınlıǵın ańsat tekserip kóriwge boladı.

Endi indukciya e.q.kúshi ólshenetuǵın birlikler haqqında gáp etiw qaldı. Eger indukciyanıń aǵısı maksvellerde, yaǵnıy *CGSM*-birliklerinde, al waqıt t sekundlarda ólshenetuǵın bolsa, onda qanday da bir proporcionallıq koefficientine iye bolmaǵan (2)-formula e.q.kúshtiń *CGSM*-birligin ańıqlaydı. E.q.kúshtiń bul birligin *mks/sek* arqalı ańlatıladı hám san mánisi jaǵınan tuyıq konturda usı konturdıń maydanı arqalı magnit indukciyasınıń aǵısı 1 *sek* waqıttıń ishinde 1 *mks* shamasına ózgergendegi tuyıq konturda payda bolatuǵın e.q.kúshine teń.

E.q.kúshtiń *CGSM*-birligi *mks/sek* penen *CGSE*-birligi arasındaqı baylanıstı mınaday pikirlewdiń tiykarında alamız: $I\mathcal{E}$ shaması quwat bolıp tabıladı hám, eger toqtıń kúshi I menen e.q.kúsh $\mathcal{E}$ niń ekewin de *CGSE*- yamasa ekewin de *CGSM*-birliklerde ólshesek, onda quwatlıq eki jaǵdayda da *erg/cek* larda alınadı. Solay etip, mınaday qatnastıń orınlanıwı kerek:

$$I_{CGSE} \cdot \mathcal{E}_{CGSE} = I_{CGSM} \cdot \mathcal{E}_{CGSM}.$$

Bul teńliktegi *CGSE* hám *CGSM* indeksleri sáykes I hám $\mathcal{E}$ shamalarınıń qanday birliklerde ólshengenligin kórsetedi. Bunnan mınaday qatnasqa iye bolamız:

$$\frac{\mathcal{E}_{CGSE}}{\mathcal{E}_{CGSM}} = \frac{I_{CGSM}}{I_{CGSE}}. \quad (4)$$

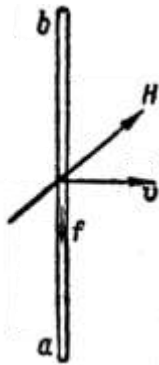
Biraq, 195-paragrafta ayılǵan boyınsha toq kúshiniń *CGSM*-birligi *CGSE*-birliginen c ese úlken (c arqalı derlik dál $3 \cdot 10^{10}$ *sm/sek* shamasına teń jaqtılıqtıń tezligi belgilengen). Demek, (4)-qatnastan mınanı alamız:

$$e.q.kúshtiń\ CGSM - birligi = e.q.kúshtiń \frac{1}{3 \cdot 10^{10}} CGSE - birligi.$$

Elektronlıq kóz-qaraslar boyınsha indukciya nızamın tallaymız. Meyli, ótkizgishtiń ab uchastkası baǵıtı sızılma tegisliginiń arǵı tárepine qaray baǵıtlangan, kernewligi H qa teń magnit maydanına jaylastırılǵan bolsın (292-súwret). Magnit maydanında tártipsiz jıllılıq qozǵalıslarına qatnasatuǵın erkin elektronlarǵa Lorenc kúshi tásir etedi. Biraq, ortasha bul kúsh hesh qanday toqtı bermeydi. Sebebi hár qıylı elektronlarǵa tásir etetuǵın kúshlerdiń baǵıtları tártipsiz tarqalǵan. Eger, endi ótkizgishtiń ab uchastkasın jılıta baslasaq (mısalı, oń tárepke qaray v tezligi menen jılıtsaq), onda metaldıń barlıq elektronları v shamasına teń qosımsha tezlikke iye boladı. Demek, barlıq elektronlar ushın birdey bolıp baǵıtlangan hám

$$f_L = evH.$$

shamasına teń Lorenc kúshi tásir ete baslaydı.



292-súwret.

Ótkizgishti sırtqı H magnit maydanında qozǵaǵanda zaryadqa tásir etetuǵın Lorenc kúshiniń baǵıtı.

Eger maydan sızılmanıń arǵı tárepine qaray baǵıtlangan hám ab uchastkası oń tárepke qaray qoǵalatuǵın bolsa, onda elektrongá tásir etetuǵın kúsh (teris zaryad) tómene qaray baǵıtlangan. Usı kúshtiń tásirinde elektronlar tómene qaray qozǵaladı, yaǵnıy joqarı qaray baǵıtlangan toq payda boladı. Elektronlardıń tap usınday qozǵalıstın payda etetuǵın ekvivalent elektrlik kúsh $f = eE$

$$f = eE = evH.$$

qatnasınıń járdeminde anıqlanadı. Demek, elektr maydanınıń ekvivalent bolǵan kernewligi E

$$E = evH$$

shamasına teń boladı hám joqarı qaray baǵıtlangan.

Uchastkada payda bolatuǵın elektr qozǵawshı kúsh ekvivalent elektr kúshleri uchastkanıń ushlarında payda etetuǵın potenciallar ayırması menen ólshenedi. Kernewlik uchastkanıń ushlarındaǵı potenciallar ayırmasın uchastkanıń uzınlıǵına bóliw arqalı anıqlanatuǵın bolǵanlıqtan, e.q.kúshi ekvivalent elektr maydanı E den uchastkanıń uzınlıǵı l boyınsha alıńǵan tuwındı menen ólshenedi, yaǵnıy:

$$\mathcal{E}_i = lE = vHl. \quad (5)$$

Biraq vl kóbeymesi uchastkanıń qozǵalısqı waqıtında waqıt birligindegi basıp ótilgen maydangá teń bolǵanlıqtan, (5)-teńliktiń barlıq oń bólimi ótkizgishtiń uchastkası tárepinen waqıt birliginde kesip ótilgen kernewlik H tıń aǵısı bolıp tabıladı. Magnetikler bolmaǵan jaǵdayda kernewlik aǵısı indukciyanıń aǵısına sáykes keletuǵın bolǵanlıqtan $vHl = \frac{d\Phi}{dt}$ teńligi orınlı. Bunnan indukciyanıń e.q.kúshiniń san mánisi ushın (3)-formula menen birdey bolǵan

$$|\mathcal{E}_i| = \frac{d\Phi}{dt}$$

anılatpasın alamız.

E.q.kúshi oń zaryadlardıń qozǵalısqı baǵıtına, yaǵnıy 292-súwrette kórsetilgen jaǵdayda joqarıǵa qaray baǵıtlangan. Bul baǵıtta *oń qol qaǵıydasınıń járdeminde* ańsat tabıwǵa boladı: eger oń qolda bas barmaqı ashıp qoysaq hám magnit indukciyasınıń sıziqları qolǵa kiretuǵınday etip, al bas barmaq ótkizgishtiń qozǵalısqı baǵıtın kórsetetuǵın bolsa, onda qalǵan barmaqlardıń baǵıtı indukciya e.q.kúshiniń baǵıtın kórsetedi. Tuyıq kontur ushın bul Lenc qaǵıydasına sáykes tolıq e.q.kúshiniń baǵıtın beredi.

Solay etip, *ótkizgishti sırtqı magnit maydanında qozǵaǵanda indukciyalıq toqtıń payda* bolıwı ótkizgishtegi elektronlarǵa Lorenc kúshiniń tásir etiwı menen túsindiriledi eken. Biraq, biz indukciyalıq toqtıń ótkizgishtik kontur qozǵalmaǵan, al onıń qasındaǵı magnit indukciyasınıń shaması ózgergen jaǵdayda da payda bolatuǵınlıǵın kórdik. Bul jaǵday ushın joqarıda keltirilgen túsindiriwdi tarqatıwǵa bolmaydı. Usı jaǵdayda da indukciyalıq toqtıń payda bolıwın túsindiriw ushın *keńisliktiń hár bir noqatında magnit indukciyasınıń shaması waqıttıń ótiwi menen ózgergende elektrlik kúshler payda boladı dep esaplaw kerek boladı*. Bunday jaǵday tómende tallanatuǵın Maksvell teoriyasınıń tiykarında jatadı (243-244 paragraflar).

§ 223. Indukciyalıq toq tárepinen jılastırılǵan elektr zaryadlarınıń muǵdarı. Xalıq aralıq sistemadaǵı magnitlik shamalardıń birlikleri. Konturda indukciyalıq toq ótkende zaryadlardıń orın almasıwı orın aladı. Eger $\mathcal{E}_i$ arqalı indukciyanıń e.q.kúshi, al R arqalı biz qarap atırǵan konturdıń tolıq qarsılıǵı belgilengen bolsa, onda sol konturdaǵı payda bolǵan toqtıń shaması mınaǵan teń boladı:

$$I = \frac{|\mathcal{E}_i|}{R}.$$

222-paragrafta ayılǵanıday, indukciyanıń elektr qozǵawshı kúshi san mánisi boyınsha

$$|\mathcal{E}_i| = \frac{d\Phi}{dt}$$

shamasına teń. Bunnan

$$I = \frac{d\Phi/dt}{R} \quad (1)$$

formulasına iye bolamız. Ótkizgishtiń kese-kesimi arqalı dt waqıttıń ishinde ótken zaryadtıń muǵdarı bolǵan dq shaması $I dt$ ge teń, bunnan (1)-qatnastı esapqa alǵan jaǵdayda

$$dq = \frac{1}{R} d\Phi \quad (2)$$

teńligine iye bolamız. Bul teńlikte $d\Phi$ arqalı magnit indukciyasınıń aǵısınıń dt waqıtınıń ishindegi ózgerisi belgilengen.

Meyli, waqıttıń bazı bir shekli shamasınıń basındaǵı biz qarap atırǵan konturdaǵı magnit indukciyasınıń aǵısın Φ_1 arqalı, al usı waqıttıń aqırındaǵı aǵısın Φ_2 arqalı belgileyik. Bunday jaǵdayda, indukciyalıq toqtıń payda bolıwınıń sebebinen ótkizgishtiń kese-kesimi arqalı ótken

elektr zaryadınıń tolıq muǵdarı q dı (2)-formuladaǵı indukciya aǵısınıń sheksiz kishi ózgerisi $d\Phi$ tı onıń tolıq ózgerisi $\Phi_2 - \Phi_1$ menen almatırıw arqalı alamız:

$$q = \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{R}. \quad (2a)$$

(2a) formula konturdıń maydanı arqalı magnit indukciyasınıń aǵısınıń ózgeriwi boyınsha usı konturdıń kese-kesimi arqalı ótken elektr zaryadınıń muǵdarın anıqlawǵa múmkinshilik beredi. Sonıń menen birge kerisinshe, usı elektr zaryadınıń muǵdarı q boyınsha konturdıń maydanı arqalı magnit aǵısınıń ózgerisi $\Phi_2 - \Phi_1$ tı anıqlaw múmkin.

(2a) formula xalıq aralıq birlikler sistemasında magnit maydanınıń birligin tabıw ushın paydalanıladı. Magnit aǵısı Φ tiń birligi sıpatında qarsılıǵı 1 om bolǵan kontur arqalı nolge shekem kemeygende konturda indukciya e.q.kúshiniń tásirinde muǵdarı 1 k ǵa teń elektr zaryadı ótetuǵın aǵısqa aytadı. Aǵıstıń bul birligi *veber* dep ataladı. 1 vb = 10^8 mks teńliginiń orınlı ekenligin ańsat kóriwge boladı. Xalıq aralıq sistemada magnit indukciyası B nıń birligin

$$B_n = \frac{\Phi}{S}$$

qatnasınıń járdeminde tabadı. Bunnan magnit indukciyasınıń birligi sıpatında vb/m^2 qabil etiledi. Bul birlikke 1960-jılı ótkerilgen Ólshemler menen salmaqlar boyınsha 11-bas Konferenciya *tesla* atamasın berdi. Magnit indukciyası menen gausstıń arasında mınaday qatnas bar:

$$1 \text{ tesla} = 10^4 \text{ gs}.$$

Eger 222-paragraftaǵı (3)-ańlatpa menen berilgen Faradey nızamında magnit indukciyasınıń aǵısı Φ ti veberlerde hám waqıt t nı sekundlarda ólshesek, onda indukciyanıń elektr qozǵawshı kúshi $\mathcal{E}_i$ voltlerde alınadı. Solay etip, birliklerdiń xalıq aralıq sistemasında:

$$\mathcal{E}_i(v) = -\frac{d\Phi}{dt} \left(\frac{vb}{sek} \right). \quad (3)$$

Eger indukciyanıń e.q.kúshi bolǵan $\mathcal{E}_i$ shamasın voltlerde, al indukciyanıń aǵısınıń ózgerisi $\frac{d\Phi}{dt}$ ti mks/sek larda ólshesek, onda (3)-teńlik mınaday túrge enedi:

$$\mathcal{E}_i(v) = -10^{-8} \frac{d\Phi}{dt} \left(\frac{mks}{sek} \right). \quad (3a)$$

Sanlı mısaldı qaraymız: omalıq qarsılıǵı $R = 0,5$ om, maydanı $S = 100$ sm² shamasına teń bolǵan konturı dáslep Jerdiń magnit maydanınıń indukciyasınıń sızıqlarına parallel jaylasqan bolsın; bunnan keyin ramka magnit indukciyasınıń sızıqlarına perpendikulyar baǵıtta turatuǵınday bolıp burılısın. Eger Jerdiń magnit maydanınıń magnit indukciyası $B = 0,5$ gs shamasına teń bolsa, ramkada qanday muǵdardaǵı elektr zaryadı indukciyalanadı?

Sheshimi. Bul jaǵdayda ramkanıń betiniń maydanı arqalı ótetuǵın indukciya aǵısınıń ózgerisi ekinshi awhalında turǵan ramka arqalı ótetuǵın indukciyanıń aǵısına teń:

$$\Phi_2 - \Phi_1 = BS.$$

Bul teńlikke B nı gausslarda, al S ti sm² larda qoysaq, onda biz aǵıstı CGSM-birliklerde alamız. Onı xalıq aralıq birlikler sistemasına ótkeriw ushın bul shamalı 10^{-8} ge kóbeytiw kerek boladı:

$$\Phi_2 - \Phi_1 = 10^{-8} \cdot 0,5 \cdot 10^8 vb$$

Bunnan (2a) formula boyınsha kulonlardaǵı indukciyalanǵan elektr zaryadlardıń muǵdarı mınaǵan teń boladı:

$$q = \frac{10^{-8} \cdot 0,5 \cdot 10^8}{0,5} k = 10^{-5} k.$$

Magnit indukciyasınıń aǵısınıń qısqa waqıttıń ishinde ózgeriwiniń saldarınan payda bolǵan elektr zaryadlarınıń muǵdarı q dı ballastikalıq galvanometr dep atalatuǵın ásbaptıń járdeminde ólshewge boladı. Principinde, ballastikalıq galvanometrdiń dúzilisi ádettegi galvanometrdiń dúzilisine sáykes keledi. Onıń qozǵalıwshı bólimi turaqlı magnittiń polyuslarınıń arasına jaylastırılǵan ramkadan turadı. Ramkaǵa strelka bekitilgen; ramka bazı bir awhalda kishkene

prujinaniń járdeminde uslap turıladı. Ramka arqalı indukciyalıq I toǵı ótkende oǵan

$$M = HSI n$$

shamasındaǵı kúshlerdiń momenti tásir etedi. Bul teńlikte H - magnittiń maydanınıń kernewligi, n - ramkadaǵı oramlardıń sanı, S - onıń betiniń maydanı. Berilgen ásbap ushın S , n hám H shamaları turaqlı bolǵanlıqtan, onda

$$M = cI$$

teńligi orınlı boladı (c arqalı galvanometrdiń *dinamikalıq turaqlısı dep atalatuǵın* turaqlı shama belgilengen).

Kúshlerdiń momentiniń impulsı bolǵan Mdt shamasınıń tásirinde ramka aylana baslaydı hám onıń qozǵalıw muǵdarınıń mometni $Jd\omega$ shamasına ózgeredi, bul kóbeymede J - barlıq qozǵalıwshı sistemaniń inerciya momenti, al $d\omega$ - ramkanıń múyeshlik tezliginiń ózgerisi. Qozǵalıw muǵdarınıń momentiniń ózgerisi kúshlerdiń momentiniń impulsine teń bolǵanlıqtan (I tomǵa qarańız), mınaday teńlikler orınlı boladı:

$$Jd\omega = Mdt = cI dt. \quad (4)$$

Eger I toǵı ótetuǵın waqıt t galvanometrdiń ildirip qoyılǵan sistemasınıń menshikli terbelisleriniń dáwirinen kishi bolsa, onda ildirip qoyılǵan sistemaǵa kúshlerdiń momentiniń tásiiri soqqı xarakterine iye boladı. Usınıń nátiyjesinde sistema ω_0 múyeshlik tezligine iye boladı. Sonlıqtan, (4)-ańlatpanı nolden t ǵa shekem integrallap,

$$\int_0^{\omega_0} Jd\omega = \int_0^t cI dt \text{ yamasa } J\omega_0 = cq$$

ańlatpalarına iye bolamız. Bul ańlatpalarda q arqalı t waqıtı ishinde ótken elektr zaryadınıń muǵdarı. Bunnan mınaǵan iye bolamız:

$$\omega_0 = \frac{c}{J} q.$$

Alınǵan múyeshlik tezlik ω_0 nıń tásirinde qozǵalıwshı sistema burıla baslaydı, usı sistema burılatuǵın eń aqırǵı múyesh φ_0 diń shamasın ("ılaqtırıw muyeshi") baslanǵısh tezlikke proporcional dep esaplawǵa boladı:

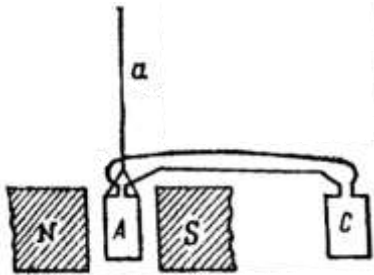
$$\varphi_0 = k\omega_0 = \frac{kc}{J} q.$$

Solay etip, galvanometrdiń strelkasınıń "ılaqtırıw muyeshi" galvanometr arqalı ótken elektr zaryadınıń muǵdarına proporcional boladı eken. Bunnan, kerisinshe, ılaqtırıw muyeshi φ_0 diń mánisi boyınsha q dı anıqlawǵa boladı. ılaqtılıw muyeshiniń shamasınıń q ǵa proporcional bolıwı ushın galvanometrdiń ildirip qoyılǵan sistemasınıń parametrleri onıń menshikli terbelis jıyliginiń jetkilikli dárejede úlken bolatuǵınday etip saylap alınadı. Galvanometrdiń turaqlısı kc/J di ádette usı galvanometr arqalı belgili muǵdardaǵı elektr zaryadı q dı ótkerip (mısalı, sıymlıǵı belgili bolǵan kondensatordı razryadlaw arqalı) graduırovkalaw jolı menen anıqlaydı.

(2a) teńligi boyınsha indukciyalıq toqtıń payda bolıwınıń saldarınan ótken elektr zaryadınıń muǵdarı bolǵan q shaması magnit indukciyasınıń aǵısı Φ tiń ózgeriwine proporcional bolǵanlıqtan, ballastikalıq galvanometr magnit aǵısılardıń ólshew ushın xızmet ete aladı. Magnit indukciyasınıń aǵısın ólshew ushın beyimlestirilgen ballastikalıq galvanometr *flyuksometr* dep ataydı. Flyuksometrdiń ulıwmalıq túriniń dúzilisiniń sxeması házir ǵana táriyiplengen ballistikalıq galvanometrdiń dúzilisiniń sxemasınan ayrıladı. 293-súwrette N hám S - turaqlı magnittiń polyusları, A - olardıń arasında jaylasqan ramka. Bul ramka burılǵanda payda bolatuǵın buriw momenti júdá kishi bolatuǵınday dárejede uzın hám jumsaq a jibine ildirilgen; ramkanıń N menen S polyuslarınıń arasında qálegen poziciyada teń salmaqlıq halda qala alıwı kerek. Ramkanıń ótkizgishleriniń ushları A basqa C ramkasına tutastırılǵan. Bul C ramkası magnit indukciyasınıń shaması ólsheniwi kerek bolǵan keńislikke alıp klinedi. Eger C ramkası dáslep magnit maydanınan tista jaylasqan bolsa, onda magnit indukciyasınıń aǵısınıń ózgerisi aqırǵı $\Phi_2 n_2$

aǵısınıń shamasına teń. Bul ańlatpada Φ_2 - ramkanıń betiniń maydanı arqalı ótetuǵın aǵıs, al n_2 ondaǵı oramlardıń sanı. C ramkasınıń betiniń maydanı arqalı ótetuǵın magnit indukciyasınıń aǵısınıń ózgerisiniń nátiyjesinde, onda I_2 indukciyalıq toǵı payda boladı. Bul toq A ramkası arqalı da ótedi hám onıń NS magnitiniń magnit maydanında burılıwın júzege keltiredi. Óz gezeginde bul burılıw ramka arqalı ótetuǵın magnit indukciyasınıń aǵısınıń ózgerisin boldıradı hám, demek, I_1 indukciyalıq toǵınıń payda bolıwına alıp keledi. Lenc qaǵıydası boyınsha I_1 indukciyalıq toǵınıń baǵıtı magnit kúshleri A ramkasın tormozlaytuǵınday boladı. Nátiyjede A ramkası toqtaydı. Ramkaǵa tásir etetuǵın kúshlerdiń momenti M mınaǵan teń:

$$M = HS_1 n_1 (I_1 + I_2).$$



293-súwret.
Flyuksometrdiń sxeması.

Bul teńlikte H arqalı N hám S polyuslarınıń arasındaqı magnit maydanınıń kernewligi n_1 arqalı A ramkasındaǵı oramlar sanı, S_1 arqalı onıń betiniń maydanı belgilengen. Eń dáslep hám eń aqırında ramka tınıshlıqta turatuǵın bolǵanlıqtan, onda kúsh momentiniń tolıq impulsiniń nolge teń bolıwı kerek:

$$\int_0^t M dt = \int_0^t HS_1 n_1 (I_1 + I_2) dt = 0.$$

Bunnan

$$\int_0^t I_2 dt = - \int_0^t I_1 dt$$

yamasa

$$|q_2| = |q_1|$$

teńliklerine iye bolamız, yaǵnıy indukciyalıq I_2 hám I_1 toqları tárepinen alıp ótilgen elektr zaryadlarınıń muǵdarları bir birine teń eken. Biraq, (2a) formula boyınsha:

$$q_2 = \frac{\Phi_2 n_2}{R}, q_1 = \frac{\Delta \Phi_1 n_1}{R}$$

teńlikleri orınlı boladı. Bul teńlikte $\Delta \Phi_1$ arqalı A ramka arqalı ótetuǵın magnit indukciyasınıń aǵısınıń ózgerisi belgilengen, al R bolsa barlıq shınjırdıń tolıq qarsılıǵı. Bunnan mınaday teńlikti alamız:

$$|\Phi_2| n_2 = |\Phi_1| n_1.$$

A ramkasınıń úlken bolmaǵan burılıw múyeshi α da aǵıstıń ózgerisi $\Delta \Phi_1$ diń shaması α ǵa proporcional, bunnan $|\Phi_2|$ aǵısınıń da α ǵa proporcional ekenligi kelip shıǵadı:

$$|\Phi_2| = k\alpha.$$

Bul teńliktegi k shaması berilgen ásbap ushın turaqlı. Solay etip, A ramkasınıń burılıw múyeshi boyınsha C ramkası arqalı ótetuǵın aǵıstı anıqlawǵa boladı eken. Álbette, bunnan C ramkası alıp kelinetuǵın orındaǵı magnit indukciyasınıń mánisin de anıqlawǵa boladı (eger usı ramkanı maydannıń indukciyası sızıqlarına normal baǵıtta jaylastırsa). Bunday jaǵdayda $\Phi_2 = BS_2$ teńligi orınlanadı.

§ 224. Indukciyanıń elektr qozǵawshı kúshin dara jaǵdaylar ushın anıqlaw. Konturlardaǵı e.q.kúshin anıqlaw usılınan paydalanıp, bir qatar dara jaǵdaylardı qaraymız.

1. Bir tekli magnet maydanında aylanatúǵın ramkadaǵı indukciyalıq toqtıń payda bolıwın qaraymız. Baslanǵısh momentte ramka indukciya sıızqlarına perpendikulyar jaylasqan dep boljaymız. Ramkanıń awhalın usı ramkanıń betine túsirilgen N nomaldırn járdeminde anıqlaymız dep kelisip alayıq hám ramkanıń dáslepki ornalasıwında indukciya sıızqlarına parallel etip baǵıtlaymız (294a súwret); ramkanı aylandırǵanda normal óziniń baǵıtın ózgerterdi. Ramkanıń eń dáslepki jaylasıwında ramka tárepinen sheklengen S maydanı arqalı ótetuǵın magnet indukciyasınıń aǵısı mınaǵan teń:

$$\Phi_0 = BS.$$

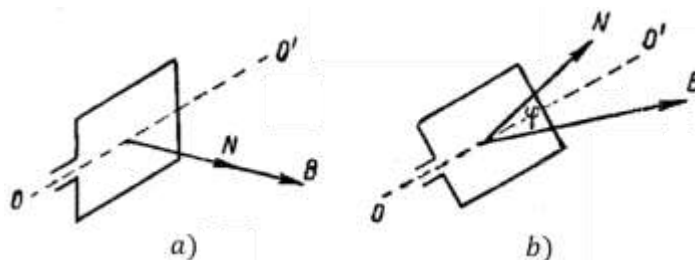
Meyli, ramka OO' kósheriniń dógereginde ω múyeshlik tezligi menen aylanatúǵın bolsın. Bunday jaǵdayda ramkanıń N normal óziniń dáslepki baǵıtı menen $\varphi = \omega t$ múyeshin jasaytuǵın jaǵdayındaǵı indukciyanıń aǵısı mınaǵan teń boladı:

$$\Phi = BS \cos \omega t = \Phi_0 \cos \omega t.$$

Indukciyanıń elektr qozǵawshı kúshi 222-paragraftaǵı (3)-qatnastırn járdeminde anıqlanadı:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt} = \omega \Phi_0 \sin \omega t. \quad (1)$$

Biz bul ańlatpadan eń úlken e.q.kúshiniń aǵıs nolge teń bolǵan jaǵdayda alınatuǵınlıǵın kóremiz [$\varphi = (2k + 1)\frac{\pi}{2}$, bul teńlikte k - pútın san].



294-súwret. Sırtqı magnet maydanında aylanatúǵın ramka.

Bul jaǵdaylarda aǵıstırn ózgeriw tezligi eń úlken mániske iye. Aǵıs eń úlken bolǵan jaǵdaylarda ($\varphi = k\pi$), e.q.kúsh nolge teń. Ramkanıń usınday awhallarında aǵıstırn ózgeriw tezligi nolge teń. Eger φ múyeshiniń mánisi

$$0 < \varphi < \pi$$

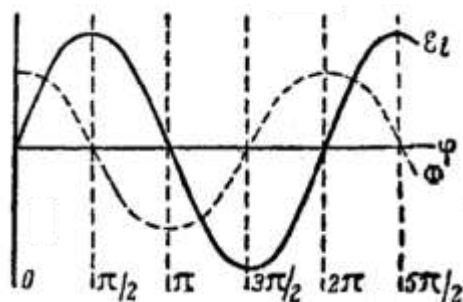
sheklerinde bolsa, onda elektr qozǵawshı kúshiniń mánisi oń. Bul aylanıwdırn birinshi yarımında ramkadaǵı toqtıń N normalına parallel bolǵan magnet maydanın payda etetuǵınlıǵın ańǵartadı. Eger φ diń mánisi

$$\pi < \varphi < 2\pi$$

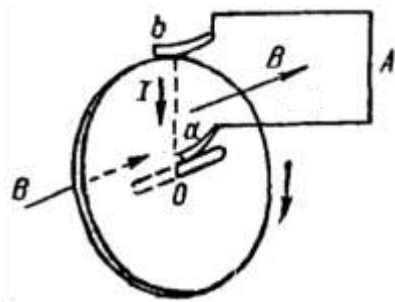
sheklerinde bolsa, onda e.q.kúshiniń mánisi teris. Bul jaǵday indukciyalıq toqtıń N normalınıń baǵıtına keri baǵıttaǵı toqtı payda etetuǵınlıǵın ańǵartadı. Demek, bir aylanıwdırn dawamında e.q.kúsh óziniń baǵıtın eki ret ózgerterdi eken.

295-súwrette burılıw múyeshi φ ge baylanıslı indukciya aǵısınıń (punktir sıızıq) hám e.q.kúshiniń (tutas sıızıq) ózgerisiniń grafigi berilgen.

Oramdı magnet maydanında aylandırǵanda e.q.kúshiniń alınıwı dinamomashinanıń dúzilisiniń tiykarında jatadı (235-paragrafqa qarańız).



295-súwret. Aylanatuǵın ramkadaǵı indukciya aǵısı Φ tiń hám indukciyanıń elektr qozǵawshı kúshiniń ózgeriwiniń grafıgı.



296-súwret. Aylanatuǵın disktegi indukciyalıq toqtırn payda bolıwı.

2. Sırǵanaytuǵın kontaktqa iye bolǵan aylanatuǵın disktegi e.q.kúshtiń payda bolıwın qaraymız. Meyli, magnit maydanınıń indukciya sızıqlarına normal jaylasqan disk onıń orayı arqalı ótetuǵın O kósheriniń dógerinde aylana alatuǵın bolsın (296-súwret). Sırǵanaytuǵın a hám b kontaktlarınıń járdeminde $AbaA$ tuyıq shınjırı payda etilgen bolsın. Eger diskti aylanısqa keltirse, onda bul shınjırda úzliksiz toq payda boladı. Indukciyalıq toqtırn baǵıtı Lenc qaǵıydası boyınsha anıqlanadı: eger magnit indukciyasınıń sızıqları oqıwshıǵa qaray baǵıtlanǵan hám disk saat strelkasınıń qozǵalıǵı baǵıtında aylanatuǵın bolsa, onda indukciyalıq toq b kontaktınan a kontaktına qaray ótedi.

Bul tájiriye toq ótip turǵan diskti magnit maydanında aylandırıw menen ótkerilgen tájiriyebeń tikkeley kerisi bolıp tabıladı (210-paragrafqa qarańız). Sol jaǵdayda da, bul jaǵdayda da $AbaA$ toq konturı arqalı ótetuǵın indukciyanıń aǵısı turaqlı bolıp qaladı. Indukciya nızamın formallıq jaqtın qollanatuǵın bolsaq, onda indukciyalıq toqtırn bolmawı kerek. Haqıyqatında, hár bir momenttegi disktiń shınjırda a hám b noqatlarınıń arasında tuyıqlaytuǵın radiusıń orın almasıratuǵınlıǵına dıqqat awdarıw kerek. Diskti sheksiz kishi $d\varphi$ múyeshine burǵanda radius $d\varphi$ múyeshine burıladı hám $dS = \frac{1}{2}R^2d\varphi$ maydanın basıp ótedi. Bul teńliktegi R - disktiń radiusı. Usı maydan arqalı ótetuǵın indukciyanıń aǵısı $d\Phi = BdS$ shamasına teń, al onıń ózgeriw tezligi bolsa

$$\frac{d\Phi}{dt} = B \frac{dS}{dt} = B \frac{1}{2} R^2 \frac{d\varphi}{dt}$$

teńlikleriniń járdeminde anıqlanadı. $d\varphi/dt$ shamasınıń disktiń aylanıwınıń múyeshlik tezligi ekenligin ańǵarıp,

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{1}{2} R^2 \omega B$$

teńligine iye bolamız. $d\Phi/dt$ nıń bul mánisin 222-paragraftaǵı (3)-ańlatpaǵa qoyıp indukciyanıń e.q.kúshiniń san mánisin tabamız:

$$|\mathcal{E}_i| = \frac{1}{2} \omega R^2 B. \quad (2)$$

Biz tallan dúzilis eń ápiwayı bolǵan dinamomashınanıń sxeması bolıp tabıladı.

Jáne de bir neshe mısallardı qaraymız.

1-mısal. Sımlı toroidtaǵı (ózeksiz) 1 sm degi oramlardıń sanı $n = 25$; toroidtiń kese-kesiminiń maydanı $S = 20 \text{ sm}^2$. Toroid sımnıń bir oramınan turatuǵın ilmektı qamtıydı (290-súwrettegedey). Reostattıń járdeminde toroidtaǵı toqtırn kúshi I dı 1 sek waqıttıń ishinde 20 a ge tómelenlewi ámelge asırıladı. Ilmektı payda bolǵan e.q.kúshiniń shaması nege teń?

Sheshimi. Toroidtiń ishindegi maydannıń magnitlik indukciyası mınaǵan teń:

$$B = 4\pi\mu nI.$$

Bul teńlikte μ - toroidtiń ishindegi ortalıqtırn magnitlik sińirgishligi. Maydan tek toroidtiń ishinde bolǵanlıqtan, indukciyanıń aǵısı

$$\Phi = 4\pi\mu nIS$$

shamasına teń, al onıń waqıttıń ótiwi menen ózgerisi mınaǵan teń:

$$\frac{d\Phi}{dt} = 4\pi\mu n S \frac{dI}{dt}.$$

Toqtıń kúshi I di CGSM-birliklerde, S ti sm^2 larda n di sm^{-1} de ólshep, aǵıstıń ózgerisin *mks/sek* larda alamız. Voltlerdegi e.q.kúshi $\mathcal{E}_i$ diń mánisin mına formulanıń járdeminde alamız [222 paragraftaǵı (3a) formula]:

$$|\mathcal{E}_i| = 10^{-8} \cdot 4\pi\mu n S \frac{dI}{dt}.$$

Bul teńlikke $\frac{dI}{dt} = 20 \text{ a/sek} = 2 \text{ CGSM/sek}$, $S = 20 \text{ sm}^2$, $n = 25 \text{ sm}^{-1}$, $\mu = 1$ mánislerin qoyıp, mınanı alamız:

$$|\mathcal{E}_i| = 10^{-8} \cdot 12,56 \cdot 25 \cdot 2 \cdot 20 \text{ v} \cong 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ v}.$$

2-mısal. Kese-kesiminiń maydanı $S = 100 \text{ sm}^2$, oramlarınıń sanı $n = 50$ bolǵan ramka indukciyası $B = 1000 \text{ gs}$ bolǵan bir tekli magnit maydanında 50 aylanıs/sek tezligi menen qozǵaladı. Ramkanıń aylanıw kósheri indukciya sızıqlarına perpendikulyar. Ramkadaǵı e.q.kúshtiń maksimallıq mánisin tabırız.

Sheshimi. (1)-formula boyınsha ramkadaǵı sımınıń bir aylanıwındaǵı maksimallıq e.q.kúshi mınaǵan teń:

$$\mathcal{E}_{i \max} = \omega B S.$$

Bul teńlikte ω - ramkanıń aylanıwınıń múyeshlik tezligi. n dana oramǵa iye ramka ushın:

$$\mathcal{E}_{i \max} = \omega B S n.$$

Bul teńlikke $B = 10^3 \text{ gs}$, $S = 100 \text{ sm}^2$, $\omega = 2\pi \cdot 50 \text{ sek}^{-1} = 3,14 \cdot 100 \text{ sek}^{-1}$ mánislerin qoyıp, mınanı alamız:

$$\mathcal{E}_{i \max} = 10^{-8} \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 50 \cong 15,7 \text{ v}.$$

3-mısal. Jerdiń magnit maydanınıń indukciya sızıqlarına perpendikulyar jaylasqan mıs disk 50 ayl./sek tezlik penen aylanadı. Disktiń radiusı $R = 50 \text{ sm}$. Disktiń orayı menen shetiniń arasındaǵı potenciallar ayırmasın anıqlańız. Jerdiń magnit maydanınıń indukciyası $B = 0,5 \text{ gs}$.

Sheshimi. Disktiń orayı menen shetiniń arasında (2)-formulanıń járdeminde anıqlanatuǵın e.q.kúshi $\mathcal{E}_i$ ge teń bolǵan potenciallar ayırması payda boladı:

$$V_1 - V_2 = \frac{1}{2} R^2 \omega B.$$

Bul teńlikke $R = 50 \text{ sm}$, $\omega = 2\pi \cdot 50 \text{ sek}^{-1} = 3,14 \cdot 10^2 \text{ sek}^{-1}$, $B = 0,5 \text{ gs}$ mánislerin qoyıp, potenciallar ayırması ushın mınaday shamaǵa iye bolamız:

$$V_1 - V_2 = 10^{-8} \cdot \frac{1}{2} \cdot 50^2 \cdot 3,14 \cdot 10^2 \cdot 0,5 \text{ v} \cong 2 \cdot 10^{-3} \text{ v}.$$

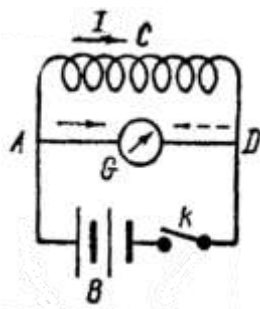
§ 225. Ózlik indukciya qubılısı. Elektromagnitlik indukciya qubılısı ótkizgish tárepinen sheklengen maydan arqalı indukciyanıń aǵısı ózgergende barlıq jaǵdaylarda baqlanadı. Bunday jaǵdayda neniń aǵıstı ózgeretuǵınlıǵın pútkilley áhmiyetke iye emes. Eger bazı bir tuyıq konturda turaqlı emes toq ótse, onda usı toq tárepinen payda etiletuǵın magnit maydanı da turaqlı emes. Demek, usı toqtıń ózin sheklep turǵan konturdıń betiniń maydanı arqalı ótetuǵın magnit indukciyasınıń aǵısı da ózgeredi. Magnit indukciyasınıń aǵısınıń ózgerisi konturdaǵı e.q.kúshiniń payda bolıwına alıp keledi. Solay etip, konturdaǵı toqtıń ózgerisi usı konturdaǵı indukciyanıń e.q.kúshiniń payda bolıwına alıp keledi. Bul qubılıstı *ózlik indukciya* dep ataydı.

Ózlik indukciya ushın ózine tán bolǵan mısıl tutastırıw hám ajratıw ekstratoqları bolıp tabıladı. Bizler konturdı tuyıqlaydıq dep esaplayıq. Usınıń nátiyjesinde konturda toq payda boladı. Bunday jaǵdayda toqtıń magnit maydanı ósedi, demek, kontur tárepinen sheklengen bettiń maydanı arqalı ótetuǵın magnit indukciyasınıń aǵısı da ózgeredi. Lenc qaǵıydası boyınsha, payda bolǵan indukciyalıq toq indukciyanıń aǵısın payda etedi hám bul aǵıs dáslepki magnit aǵısınıń ósiwin kompensaciyalaydı. Demek, magnit maydanınıń baǵıtı dáslepki toqtıń magnit maydanınıń baǵıtına qarama-qarsı bolǵan toq payda boladı. Bunnan indukciyalıq toqtıń kontur tuyıqlanganda payda bolatuǵın toqtıń baǵıtına qarama-qarsı ekenligi kelip shıǵadı. Bul keri baǵıttaǵı

indukciyalanatuğın toq *tuyıqlanıwdırn ekstratoğı* dep ataladı. Tuyıqlanıw ekstratoğı konturda ótetuğın toqtı kishireytedi.

Tap sonday qubılıstı biz shınjırdı ajıratqanda da baqlaymız. Eger konturdağı toqtıń shaması kishireyse, onda kontur tárepinen sheklengen bettiń maydanı arqalı ótetuğın magnit indukciyasınıń ağısı da kishireyedi. Konturda Lenc qağıydasına sáykes kishireyetuğın ağıstı úlkeytetuğın toq indukciyalanadı, yaǵnıy tiykarǵı toq júrgen baǵıttaǵı júretuğın toq indukciyalanadı. Indukciyalanǵan bul toqtı *ajratıw ekstratoğı* dep ataydı. Ajratıw ekstratoǵınıń baǵıtı tiykarǵı toqtıń baǵıtı menen baǵıtlas.

Tuyıqlanıw ekstratoǵınıń bolıwınıń saldarınan shınjırdıaǵı toqtıń úlkeyiwi ekstratoq bolmaǵan jaǵdaydaǵıǵa salıstırǵanda ásterek júredi. Eger, mısalı, elektr lampasın ádewir ózlik indukciyaǵa iye konturǵa jalǵaǵanda lampa sezilerliktey ózlik indukciya qubılısı bolmaytuğın konturǵa jalǵaǵan jaǵdayǵa salıstırǵanda ástelik penen jaqtılıq shıǵara baslaydı.



297-súwret.
Ajratıw ekstratoǵı tabıw.

Ajratıw ekstratoǵın 297-súwrette keltirilgen sxemaniń járdeminde baqlawǵa boladı. *B* batareyasınan shıǵatuğın toq *A* noqatında ekiye tarmaqlanadı. Olardıń biri *ACD* ózlik indukciyanıń ádewir úlken toǵın beriw qásiyeti menen táriyiplenedi. Ekinshi *AGD* tarmaǵına *G* galvanometri tutastırılǵan. Meyli, toq *ACD* hám *AGD* uchastkalarında tutas strelkalar menen kórsetilgen baǵıtta shepten ońǵa qaray júretuğın bolsın. Eger *k* gıltın ajıratsaq, onda *ACD* uchastkasında baǵıtı dáslepki toqtıń baǵıtınday ajratıw ekstratoğı payda boladı. Ol tolıǵı menen shınjırdıń *DGA* uchastkası arqalı tuyıqlanadı, sebebi shınjırdıń basqa bólimi ajratılǵan. Álbette, *DGA* uchastkasındaǵı bul toq ońnan shepke qaray júredi (punktir strelka). Bul jaǵdaydı galvanometrdiń strelkasınıń dáslepki burılǵan baǵıtınan qarama-qarsı baǵıtqa burılıwı boyınsha tabıwǵa boladı.

Bul tájiriybede ajratıw ekstratoğı tiykarınan *ACD* uchastkasında payda boladı. Bul uchastka iyilgen bir neshe oramnan turatuğın ótkizgish bolıp tabıladı; tuwrı sıızılıq *AGD* uchastkasında payda bolatuğın ekstratoq sezilerliktey orındı iyelemeydi. Bul jaǵday hár qıylı formaǵa iye bolǵan ótkizgishlerde hár qıylı ózlik indukciyanıń júzege keletuǵınlıǵın kórsetedi. Konturdiń ádewir kóp bolǵan yamasa ázzi ózlik indukciyaǵa iye bolıw qásiyeti *ózlik indukciya koefficienti* dep atalatuğın fizikalıq shama menen táriyiplenedi. Bul shamanıń mánisin anıqlaymız.

Kúshi *I* ge teń toq ótip turǵan ıqtıyarlı konturdı alamız. Bio-Savar-Laplas nızamı boyınsha bul toq tárepinen hár bir noqatta payda etilgen magnit maydanınıń kernewligi, demek indukciya vektory, toqtıń kúshine proporcional. Bunnan toq konturı tárepinen sheklengen maydan arqalı ótip atırǵan indukciya Φ tiń ağısı toqtıń kúshi *I* ge proporcional:

$$\Phi = LI. \quad (1)$$

Proporcionallıq koefficienti bolǵan *L* shaması *konturdiń ózlik indukciya koefficienti* dep ataladı. (1)-teńliktegi toqtıń kúshi *I* di birge teń dep boljap, *ózlik indukciya koefficientiniń ótip turǵan toqtıń shaması bir birlikke teń bolǵan kontur tárepinen sheklengen maydan arqalı ótetuğın magnit indukciyasınıń aǵısınıń shamasına teń bolatuǵınlıǵın kóremiz.*

Ózlik indukciyanıń elektr qozǵawshı kúshi bolǵan $\mathcal{E}_{si}$ shamasın biz 222-paragraftaǵı (3)-formula boyınsha ańǵartılatuğın indukciyanıń ulıwmalıq nızamı boyınsha alamız:

$$\mathcal{E}_{si} = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Bul ańlatpada Φ usı konturdıń ózi boyınsha ótetuǵın toq payda etken biz qarap atırǵan kontur arqalı ótetuǵın magnit indukciyasınıń aǵısı. Bul ańlatpaǵa Φ aǵısınıń ornına onıń ózlik indukciya koefficienti L hám konturdaǵı toq I boyınsha (1)-teńliktegi mánisin qoyıp, turaqlı ózlik indukciya bolǵan jaǵday ushın mınanı alamız:

$$\mathcal{E}_{si} = -L \frac{dI}{dt}. \quad (2)$$

Bul qatnas ózlik indukciya koefficienti ushın jáne bir (dinamikalıq) anıqlamanı beriwge múmkinshilik beredi: *konturdıń ózlik indukciya koefficienti san mánisi boyınsha konturdaǵı toqtırın shaması waqıt birliginde bir birlikke ózgergen jaǵdaydaǵı sol konturda payda bolǵan e.q.kúshine teń.*

Ózlik indukciya koefficienti konturdıń tek geometriyalıq forması menen usı kontur jaylasqan ortalıqtan ǵárezli.

(1)- yamasa (2)-qatnas ózlik indukciya koefficientiniń ólshem birligin anıqlawǵa múmkinshilik beredi. Ádette, ózlik indukciya koefficientiniń eki túrli birliği qollanıladı: absolyut elektromagnitlik CGSM-sisteması hám xalıq aralıq birlikler sisteması. Konturdıń ózlik indukciya koefficientiniń CGSM-birligi sıpatında (1)-qatnas boyınsha kontur arqalı bir elektromagnitlik birlikke teń toq ótip atırǵanda usı kontur arqalı ótip atırǵan magnit indukciyanıń aǵısı bir maksvelge teń bolatuǵın konturdıń ózlik indukciyası alınadı. Xalıq aralıq sistemadaǵı ózlik indukciya koefficientiniń birliği *genri* dep ataladı. Onıń shaması toqtırın shaması $1 a$ bolǵan jaǵdayda indukciyanıń aǵısı $1 \text{ vb} = 10^8$ mks bolatuǵın konturdıń ózlik indukciya koefficientine teń.

1 gn shamasınıń ózlik indukciyanıń CGSM-birliginen qansha ese úlken bolatuǵınlıǵın ańsat tabıwǵa boladı. Onıń ushın (1)-qatnastan paydalanamız. Bul qatnas boyınsha

$$1 \text{ gn} \times 1 a = 10^8 \text{ mks}. \quad (3)$$

Ózlik indukciyanıń $1 \text{ CGSM-birligi} \times \text{toq kúshiniń } 1 \text{ CGSM-birligi} = 1 \text{ mks}$.

Toq kúshiniń $1 \text{ CGSM-birligi} = 10 a$ ekenligin esapqa alıp, sońǵı ańlatpanı bılayınsha qaytadan jazamız:

$$\text{ózlik indukciyanıń } 1 \text{ CGSM-birligi} \times 10 a = 1 \text{ mks}. \quad (4)$$

(3)- hám (4)-teńliklerdi salıstırıp, mınanı alamız:

$$1 \text{ gn} = 10^9 \text{ CGSM}.$$

(2)-qatnastı paydalanıp, genrige jáne mınaday anıqlamanı beriwge boladı: *eger 1 sekundtıń ishinde toqtırın kúshi 1 amperge ózeretuǵın jaǵdayda ózlik indukciyanıń e.q.kúshi 1 voltke teń bolatuǵın jaǵdaydaǵı ózlik indukciya koefficientiniń shaması 1 genrige teń.*

Ózlik indukciya koefficientiniń anıqlamasınan paydalanıp, solenoid ushın onıń ańlatpasın keltirip shıǵaramız.

Oramlarınıń ulıwma salı N ge, oramnıń kesimi S , uzınlıǵı l ge teń bolǵan solenoidtı alamız; meyli, solenoidtıń ishindegi quwıslıq magnit sińirgishligi μ ge teń bolǵan ortalıq penen toltırılǵan bolsın. Solenoidtı 194-paragraftaǵı (4)-formulanı jetkilikli dárejedegi dállikte paydalanıwǵa bolatuǵınday uzın dep esaplaymız. Bunday jaǵdayda sol (4)-formula boyınsha solenoidtıń ishindegi maydannıń kernewligi H mınaǵan teń:

$$H = 4\pi \frac{N}{l} I. \quad (5)$$

Bul teńlikte I - solenoid boyınsha ótetuǵın toqtırın kúshi.

Solenoidtaǵı indukciyanı B arqalı belgilep, solenoidtıń kese-kesimindegi indukciyanıń aǵısınıń

$$\Phi' = BS = \mu HS$$

shamasına teń bolatuǵınlıǵın alamız. Solenoidtıń barlıq N oramı arqalı aǵıs mınaǵan teń boladı:

$$\Phi = N \cdot \Phi' = \mu HSN.$$

Bul teńlikke H tıń ornına onıń (5)-ańlatpa boyınsha mánisin qoyıp, tómendegidey teńlikke iye

bolamız:

$$\Phi = 4\pi\mu \frac{N^2}{l} SI.$$

Bul teńlikke solenoidtıń uzınlıǵınıń bir birligindegi oramlar sanı $n = \frac{N}{l}$ di hám solenoidtıń kólemi $V = lS$ ti kirgizemiz. Bunday jaǵdayda

$$\Phi = 4\pi\mu n^2 VI$$

teńligi orınlı boladı. Bunnan, (1)-qatnastı paydalanıp, solenoidtıń ózlik indukciya koefficientiniń

$$L = \frac{\Phi}{I} = 4\pi\mu n^2 V \quad (6)$$

shamasına teń bolatuǵınlıǵın tabamız.

Solay etip, solenoidtıń ózlik indukciya koefficienti uzınlıq birligindegi oramlardıń sanına hám solenoidtıń kólemine proporcional. Anıqlaması boyınsha, ózlik indukciya koefficienti oramdaǵı toqtıń kúshinen gárezli emes; biraq, eger solenoidtıń ózegi ferromagnitlik zattan soǵılǵan bolsa, onda magnit sińirgishlik μ magnit maydanınıń kernewliginen hám, demek, toqtıń kúshinen gárezli; bunday jaǵdayda gárezliktiń júdá kúshli bolıwı da múmkin (203-paragrafqa qarańız). Ózeklerge iye bolǵan solenoidlardıń ózlik indukciya koefficientlerin esaplaǵanda bul jaǵdaydı esapqa alıw kerek boladı.

Mınaday san mánislerde solenoidtıń ózlik indukciya koefficientiniń qanday bolatuǵınlıǵın esaplaymız: solenoidtıń uzınlıǵı $l = 50 \text{ sm}$, kese-kesiminiń maydanı $S = 10 \text{ sm}^2$, $\mu = 1$, oramlardıń tolıq sanı $N = 3000$.

(6)-formula boyınsha mınaǵan iye bolamız:

$$L = 4\pi \left(\frac{3000}{50} \right)^3 \cdot 10 \cdot 50 \cong 2,3 \cdot 10^7 \text{ CGSM}.$$

Eger bul shamanı genrige ótkersek

$$L \cong 0,023 \text{ gn}$$

shamasına iye bolamız. Biraq, bul shama usınday uzınlıqtaǵı hám usınday oramlar sanı bar solenoidtıń haqıyqıy ózlik indukciya koefficientinen ádewir úlken. Onıń sebebi, birinshiden, bul jaǵdayda solenoidtıń shekli ekenligi esapqa alınǵan joq. Usınıń menen birge solenoidtıń oramları ádette bir biriniń ústine oralǵan qatlamlardan turadı, usınıń sebebinen indukciyanıń aǵısı tolıǵı menen hár bir oramnıń kese-kesimi arqalı ótpeydi.

Joqarıda ayılǵanlardan biz qarap atırǵan shınjırdıń ózlik indukciya koefficienti qanshama úlken bolsa, tutasıw ekstratoǵınıń da sonshama kúshli bolatuǵınlıǵı kórinip tur. Solenoid túrinde oralǵan ótkizgishler ushın, onıń ústine olardıń ortası ferromagnit zat penen toltırılǵan bolsa, ózlik indukciya koefficientiniń mánisi úlken boladı.

Ajratıw ekstratoǵın baqlaw ushın biz 297-súwrette kórsetilgen tarmaqlanǵan shınjırdan paydalandıq. Biraq ajratıw ekstratoǵınıń bar ekenligi tarmaqlanbaǵan shınjırda da kórinedi. Bunday shınjırda rubilnikti qosqanda dáslepki toqtıń shaması keskin túrde kishireydi, al bul qubılıs, óz gezeginde, úlken shamadaǵı ajratıw e.q.kúshiniń payda bolıwına alıp keledi. Bul e.q.kúshiniń shaması sonshama úlken bolıp, ajratqısıhtıń polyuslarınń arasındaǵı hawanıń tesiliwi orın aladı hám olardıń arasında elektr doǵası payda boladı.

Ajratıw ekstratoǵınıń sebebinen ajratqısıhtıń polyuslarınń arasında kúshli ushqınlardıń payda bolıwı ajratqısıhtıń isten shıǵıwına alıp keliwi múmkin hám sonlıqtan elektrotexnikada onı joq qılıwǵa háreket etiletuǵın qáwipti payda ete aladı.

§ 226. Qosıw hám ajratıw ekstratoqları. Qosıw hám ajratıw ekstratoqlardıń xarakterin tolıǵıraq tallaymız.

Ajratıw ekstratoǵınıń xarakterin anıqlaw ushın bazı bir konturda I_0 toǵın uslap turıw ushın eń dáslep E_0 e.q.kúshi bar edi dep boljaymız. Bunnan keyin waqıttıń bir momentinde (bul moment ushın $t = 0$

teńligi orınlanadı dep boljaymız) bul e.q.kúshi óshiriledi, biraq kontur tuyıq bolıp qaladı. Onıń tolıq qarsılıǵı R ge teń bolsın. Bunday jaǵdayda konturdaǵı toq birden joq bolmaydı, al ele de bir qansha waqıt ózlik indukciyanıń e.q.kúshiniń esabınan ótip turadı.

225-paragraftaǵı (2)-formula boyınsha ózlik indukciyanıń bul e.q.kúshi mınaǵan teń:

$$\mathcal{E}_{si} = -L \frac{dI}{dt}.$$

Bul teńlikte L arqalı biz qarap atırǵan konturdıń ózlik indukciya koefficienti belgilengen. Ózlik indukciya toǵınıń kúshi I Om nızamı boyınsha anıqlanadı:

$$I = \frac{\mathcal{E}_{si}}{R} = -\frac{L}{R} \cdot \frac{dI}{dt}.$$

Bul teńlikti

$$\frac{dI}{I} = -\frac{R}{L} dt \quad (1)$$

túrinde qaytadan jazıwǵa boladı. Al alınǵan teńlik ózlik indukciya toǵı I dıń waqıt t dan ǵárezligin anıqlaytuǵın differenciallıq teńleme bolıp tabıladı. (1)-teńlemenıń on hám shep táreplerin integrallap, mınanı alamız:

$$\ln I = -\frac{R}{L} t + \ln C. \quad (2)$$

Bul teńlikte C - iqtıyarlı turaqlı. Bul iqtıyarlı turaqlınıń mánisin $t = 0$ momentte $I = I_0$ shártiniń tiykarında alamız. Bunnan, (2) boyınsha:

$$\ln I_0 = \ln C.$$

Solay etip, (2)-ańlatpa

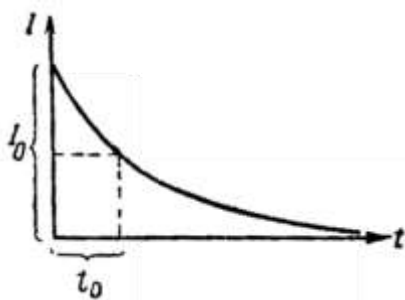
$$\ln \frac{I}{I_0} = -\frac{R}{L} t \quad (3)$$

túrine yamasa

$$I = I_0 e^{-\frac{R}{L} t} \quad (3a)$$

túrine enedi.

Bul qatnas e.q.kúshin óshirgendegi toqtır kúshiniń kórsetkishli (eksponenciallıq) nızam boyınsha kishireytetuǵınlıǵın kórsetedi. Sonıń menen birge ózlik indukciya koefficienti L qanshama úlken hám qarsılıq R kishi bolsa ástelik penen kishireyedi. Ajratıw ekstratoǵınıń waqıttan ǵárezligi grafikte 298-súwrette keltirilgen.



298-súwret.

Ajratıw ekstratoǵınıń kúshiniń waqıttan ǵárezligi.

Ajratıw ekstratoǵınıń shamasınıń óziniń dáslepki shamasınıń yarımına shekem kemeyetuǵın t_0 waqıtınıń shaması $\frac{I}{I_0} = \frac{1}{2}$ qatnası orın aladı dep esaplanganda (3a) qatnasınıń járdeminde anıqlanadı. Bunnan:

$$t_0 = \ln 2 \cdot \frac{L}{R}. \quad (4)$$

$\ln 2 \cong 0,7$ teńliginiń orınlı ekenligin esapqa alsaq, onda juwıq túrdegi

$$t_0 \cong 0,7 \frac{L}{R} \quad (4a)$$

teńligine iye bolamız. Mısalı, ózlik indukciyası $L = 0,1$ gn hám qarsılıǵı $R = 0,7$ om bolǵan konturdaǵı toqtır kúshiniń eki ese kishireyiwi ushın ketken waqıt (4a) formulası boyınsha mınaǵan teń:

$$t_0 \cong 0,7 \cdot \frac{0,1}{0,7} \text{ sek} = 0,1 \text{ sek}.$$

Endi tutastırıw ekstratoǵın qarawǵa ótemiz. Berilgen R qarsılıǵına iye bolǵan konturǵa sırttan $\mathcal{E}_0$ e.q.kúshi tutastırıldı dep esaplaymız. Bunday jaǵdayda, ózlik indukciya qubılısına baylanıslı konturdaǵı tolıq e.q.kúshi mınaǵan teń boladı:

$$\mathcal{E}_0 + \mathcal{E}_{si} = \mathcal{E}_0 - L \frac{dI}{dt}.$$

Bunnan, konturdaǵı toqtır kúshi I mınaǵan teń boladı:

$$I = \frac{\mathcal{E}_0 - \frac{dI}{dt}}{R}.$$

$\mathcal{E}_0/R$ shamasınıń konturda ózlik indukciya bolmaǵan jaǵdaydaǵı toqtır kúshi I_0 ge teń ekenligin ańǵarıp, sońǵı ańlatpanı

$$I_0 - I = \frac{L}{R} \frac{dI}{dt}$$

túrinde jaza alamız. I_0 shaması turaqlı bolǵanlıqtan, dI shamasın $-d(I_0 - I)$ shaması menen almasıra alamız. Bunday jaǵdayda

$$\frac{d(I_0 - I)}{(I_0 - I)} = -\frac{R}{L} dt$$

teńlemesine iye bolamız. Bul teńlemenıń eki bólimin de integrallap

$$\ln(I_0 - I) = -\frac{R}{L} t + \ln C_1 \quad (5)$$

teńlemesin alamız. Iqtıyarlı $\ln C_1$ turaqlısın $t = 0$ waqıt momentinde $I = 0$ teńliginiń orınlanatuǵınlıǵı shártı boyınsha anıqlaymız. Bunnan $\ln C_1 = \ln I_0$ hám (5)-ańlatpa mınaday túrge enedi:

$$\ln \frac{I_0 - I}{I_0} = -\frac{R}{L} t.$$

Bunnan

$$I_0 - I = I_0 e^{-\frac{R}{L} t}$$

teńligine yamasa eń aqırında

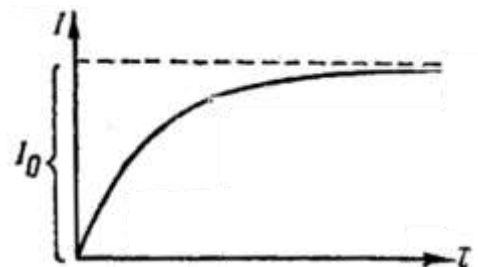
$$I = I_0 \left(1 - e^{-\frac{R}{L} t} \right). \quad (6)$$

formulasına iye bolamız.

Bul ańlatpa e.q.kúshin qosqanda shıńjırdaǵı toqtır dárhál I_0 shamasına jetpeytuǵınlıǵın hám ózlik indukciya koefficienti L qansha úlken bolsa hám konturdıń qarsılıǵı R qansha kishi bolsa ástelik penen úzliksiz túrde jetetuǵınlıǵın kórsetedi. E.q.kúshin qosqanda toqtır kúshiniń waqıttan ǵárezligi grafikalıq túrde 298-súwrette kórsetilgen. Teoriyalıq jaqtan toq óziniń aqırǵı I_0 mánisine sheksiz úlken waqıttır ishinde jetiwi kerek. Al, haqıyqatında, ózlik indukciya koefficienti L diń ádettegidey mánislerinde toq óziniń sheklik mánisine tez jetedi.

299-súwret.

Ózlik indukciyaǵa iye shıńjırduı tuyıqlaǵanda toqtır kúshiniń waqıttan ǵárezligi.



Sanlı mısaldı tallaymız: meyli, konturdıń ózlik indukciya koefficienti $L = 0,1$ gn hám onıń qarsılıǵı $R = 1$ om bolsın. Konturǵa e.q.kúshin qosqannan 0,01 sek hám 1 sek waqıttan keyin toqtır aqırǵı mánisi I_0 diń qanday mánislerine iye bolatuǵınlıǵın anıqlaymız.

(6)-formula boyınsha mınaǵan iye bolamız:

$$I = I_0 \left(1 - e^{-\frac{R}{L} t} \right) = I_0 (1 - e^{-10t}).$$

Bunnan $t = 0,01$ sek ushın

$$I = I_0 (1 - e^{-0,1}) \cong 0,1 I_0$$

hám $t = 1$ sek ushın

$$I = I_0(1 - e^{-10}) \cong 0,99995I_0.$$

mánislerge iye bolamız.

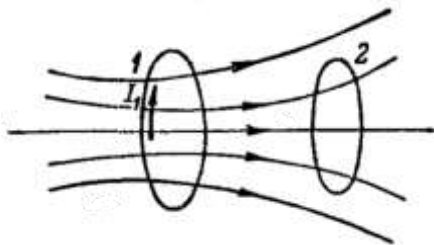
Solay etip, $t = 0,01$ sek waqıttan keyin toqtır kúshiniń eń aqırǵı mánisiniń $0,1$ bólimin, al 1 sek waqıttan keyin toqtır mánisiniń aqırǵı mánisinen tek $0,005\%$ ke ǵana ayırmaǵa iye, yaǵnıy ámeliy jaqtan aqırǵı mániske teń bolatuǵınlıǵın kóremiz.

Ajratıw ekstratoqlarınıń bar bolıwı *asa ótkizgishlik* qubılısınıń ashılıwına alıp keldi (154-paragrafqa qarańız). Asa ótkizgishlik halında $R = 0$ hám (3a) formulası boyınsha e.q.kúshi óshirilgennen keyin konturdaǵı toqtır hálisiremey, qálegenshe kóp waqıt dawam ete beretuǵınlıǵı kórinip tur. Asa ótkizgishliktiń bolatuǵınlıǵına alıp kelgen Kammerling-Onnestiń tájiriybeleri bılayınsha ótkerildi: ushları bir biri menen tutastırılǵan solenoid elektromagnittiń polyuslarınıń arasına jaylastırıldı. Bunnan keyin solenoid suıq geliye solenoidtiń simlarınıń materialı asa ótkizgish halına kelgende salqınlatıldı. Bunnan keyin elektromagnittiń magnit maydanı óshirilgen. Nátiyjede solenoidta indukciyalıq toq payda bolǵan. Ádettegidey sharayatlarda bul toq júdá kishi waqıttır ishinde toқтаған bolar edi, al asa ótkizgishlik hal orın alǵanda solenoid boyınsha toqtır ótiwi kóp saatlardan keyin de, hesh qanday hálisiremey dawam etken.

§ 227. Óz-ara indukciya. Óz-ara indukciya qubılısın qarawǵa ótemiz. Elektromagnitlik indukciya qubılısı boyınsha tájiriybedlerdi qaraǵanımda biz bul qubılıstı ulıwma túrde qaraǵan edik. Bul qubılıstıń mánisi mınadan ibarat: qanday da bir konturdaǵı elektr toǵınıń ózgerisi ózgermeli magnit maydanın payda etedi, al bul ózgermeli magnit maydanı qońsılás konturlarda e.q.kúshlerin indukciyalaydı. 1 hám 2 konurların alamız (300-súwret). Birinshi konturdaǵı toqtır kúshin I_1 ge teń dep boljayıq. Bul toq payda etken magnit indukciyasınıń aǵısı Φ toqtır kúshi I_1 ge proporcional. Usı Φ aǵısınıń 2 konturı arqalı ótetuǵın bólimin Φ_{21} arqalı belgileymiz. Bunday jaǵdayda biz

$$\Phi_{21} = L_{21} \cdot I_1 \quad (1)$$

teńligi orın aladı dep boljay alamız.



300-súwret.

Eki kontur arqalı ótetuǵın indukciyanıń aǵısı.

300-súwrette Φ_{21} aǵısı eki kontur arqalı ótetuǵın magnit indukciyasınıń sızıqları menen kórsetilgen (1 hám 2). Birinshi konturdaǵı I_1 toq kúshi ózgergende Φ_{21} aǵısı da ózgeredi hám ekinshi konturda indukciyanıń e.q.kúshi $\mathcal{E}_2$ payda boladı. Onıń shaması 222-paragraftaǵı (3)-qatnas boyınsha anıqlanadı:

$$\mathcal{E}_2 = -\frac{d\Phi_{21}}{dt}.$$

Eger konturlardıń ólshemleri menen turǵan orınları ózgerissiz qalatuǵın bolsa, onda (1)-formuladaǵı L_{21} koefficienti turaqlı hám

$$\frac{d\Phi_{21}}{dt} = L_{21} \frac{dI_1}{dt}$$

teńligi orınlı boladı. Bunnan mınaday formulaǵa iye bolamız.

$$\mathcal{E}_2 = -L_{21} \frac{dI_1}{dt}. \quad (2)$$

Bul formuladaǵı L_{21} koefficienti 2 hám 1 konturlarınıń óz-ara indukciya koefficienti dep ataladı.

Álbette, joqarıda ayılǵanlardıń barlıǵın 2 konturandaǵı toq ózgeretuǵın, al 1 konturında toq indukciyalanatuǵın jaǵday ushın da qaytalawǵa boladı. Bunday jaǵdayda ekinshi konturdaǵı toqtır kúshin I_2 arqalı, al birinshi konturda payda bolatuǵın e.q.kúshti $\mathcal{E}_1$ arqalı belgilep, mınanı

alamız:

$$\mathcal{E}_1 = -L_{12} \frac{dI_2}{dt}. \quad (2a)$$

L_{12} koeficienti 1 konturı menen 2 konturınıń arasındaǵı óz-ara indukciya koeficienti L_{12} dep ataladı.

Tómende barlıq waqıtta da

$$L_{21} = L_{12} \quad (3)$$

teńliginiń orınlı bolatuǵınlıǵı kórsetiledi.

Solay etip, eki konturdıń óz-ara indukciyası koeficienti haqqında gáp etiwge boladı.

(1)-qatnastı paydalanıp, biz mınaday anıqlamanı keltirip shıǵarıwımız múmkin: *eki konturdıń óz-ara indukciya koeficienti L_{12} dıń san mánisi boyınsha konturlardıń birewindegi bir birlik toqtırn ekinshi kontur arqalı ótetuǵın magnit indukciyasınıń aǵısına teń.* (2)-qatnastan ekinshi (dinamikalıq) anıqlamanı alamız: *eki konturdıń óz-ara indukciya koeficienti L_{12} bir kontur arqalı ótip atırǵan toqtırn san shaması waqıt birliǵi ishinde bir birlikke ózgergen jaǵdayda ekinshi konturda payda bolǵan e.q.kúshiniń shamasına teń.*

Óz-ara indukciya koeficientiniń shaması konturlardıń geometriyalıq forması menen ólshemlerinen hám olardıń bir birine salıstırǵandaǵı jaylasıwlarınan ǵárezli. Tek ferromagnit zatlar bar bolǵan jaǵdayda ǵana óz ara indukciya koeficienti toqlardıń kúshinen de ǵárezli boladı (μ dıń magnit maydanınıń kernewligi H tan ǵárezli bolıwına baylanıslı).

Ózlik indukciya koeficienti qanday atamaǵa iye bolsa, óz ara indukciya koeficientiniń ataması da sonday. Óz-ara indukciya koeficientiniń absolyut elektromagnitlik birliǵi bolıp bir kontur arqalı ótetuǵın toq kúshi bir elektromagnitlik birlikke teń bolǵanda ol ekinshi kontur arqalı bir maksvellge teń aǵıstı payda bolatuǵın jaǵdaydaǵı óz-ara indukciya xızmet etedi. Óz-ara indukciya koeficientiniń ámeliy birliǵi bolıp genri xızmet etedi. Ol óz-ara indukciya koeficientiniń 10^9 absolyut elektromagnitlik birligine teń. Óz-ara indukciya koeficientiniń dinamikalıq anıqlamasınan mınaday jaǵday kelip shıǵadı: genri konturlardıń birinde 1 sekund waqıt ishinde toqtırn kúshi 1 amperge ózgeretuǵın jaǵdayda ekinshi konturda 1 v shamasındaǵı e.q.kúshi payda bolatuǵındaǵı óz-ara indukciya koeficientine teń.

§ 228. Toqlardıń magnit maydanınıń energiyası. Ótkizgish simlar arqalı turaqlı toq ótkende e.q.kúshiniń dereǵı tárepinen beriletuǵın barlıq quwat lenc-djoul jıllılıǵınıń bólinip shıǵıwı ushın jumsaladı. SHaması ósetuǵın yamasa kemeyetuǵın toqlarda jaǵday basqasha boladı. Joqarıda kórgenimizdey, toqtırn shaması úlkeygende konturda e.q.kúshi payda boladı hám onıń baǵıtı toqtı qozdırǵan e.q.kúshtiń baǵıtına qarama-qarsı. Nátiyjede, toqtırn kúshi kishi boladı hám sırtqı e.q.kúshiniń jumısınıń tek bir bólimi ǵana lenc-djoul jıllılıǵınıń bólinip shıǵıwı ushın jumsaladı. Kerisinshe, toqtırn kúshi kishireygende konturda ózlik indukciyanıń e.q.kúshi payda bolıp, onıń baǵıtı sırtqı e.q.kúshtiń baǵıtına sáykes keledi. Nátiyjede toq kúshlirek boladı hám berilgen sırtqı e.q.kúshiniń tásirinede bólinip shıqqan lenc-djoul jıllılıǵına salıstırǵanda kóbirek jıllılıq bólinip shıǵadı. Álbette, toqtırn úlkeyiwinde jumsalǵan artıqmash jumıstıń energiyasınıń qanday da bir túrine aylanıwınıń orın alıwı kerek hám bul energiya, kerisinshe, toqtırn kúshi kemeygende shınjırda bólinip shıǵıwı kerek. Toqtırn kúsheyiwi menen usı toq payda etken magnit maydanı da kúsheydi, sonlıqtan bul bólinip shıǵatuǵın energiya magnit maydanınıń energiyası bolıp tabıladı.

Magnit maydanınıń energiyasın esaplaw ushın ózlik indukciyası L bolǵan konturdı qaraymız. Bul konturdaǵı toqtırn shaması nolden bazı bir shekli I mánisine shekem ózgeretuǵın bolsın. Konturdaǵı toq óskende konturda ózlik indukciyanıń e.q.kúshi $\mathcal{E}_s$ payda boladı. Bul e.q.kúshine qarsı islengen jumıs magnit maydanınıń energiyasınıń payda bolıwına alıp keledi. Eger, berilgen momentte shınjırdaǵı toqtırn kúshi I ge teń bolsa, onda ózlik indukciyanıń e.q.kúshi beretuǵın quwat $I\mathcal{E}_s$ shamasına teń. Demek, kishi dt waqıt aralıǵında islengen jumıstıń shaması mınaǵan teń:

$$dA = I\mathcal{E}_s dt.$$

225-paragrafta ayılğanlar boyınsha, ózlik indukciyanıń e.q.kúshi $d\Phi/dt$ shamasına teń, bul qatnasta Φ - biz qarap atırğan kontur arqalı ótetuǵın indukciyanıń aǵısı.

Bunnan, dt waqıtı ishinde islengen elementar jumıs san mánisi boyınsha mınaǵan teń:

$$dA = I \frac{d\Phi}{dt} \cdot dt = Id\Phi.$$

Ózlik indukciyanıń turaqlı koefficientinde $d\Phi = LdI$ hám elementar jumıs dA ushın jazılǵan ańlatpanı mına túrde qaytadan jazıwǵa boladı:

$$dA = IL dI. \quad (1)$$

Toqtır shaması nolden bazı bir I mánisine shekem óskendegi islengen jumıstır shamasına teń magnit energiyası W_m niń mánisin esaplaw ushın barlıq elementar jumıslardı summalaw, yaǵnıy (1)-ańlatpanı 0 den I ge shekemgi shekte integrallaw kerek; bunday jaǵdayda mınanı alamız:

$$W_m = \int_0^I ILdI.$$

Eger integrallawdı orınlasaq, onda mınaday teńlikke iye bolamız:

$$W_m = \frac{1}{2} LI^2. \quad (2)$$

Bul jerde magnitlik energiya toǵı bar konturdı táriyipleytuǵın parametrler bolǵan toqtır kúshi I hám ózlik indukciya koefficienti L arqalı ańlatılǵan. Biz tómende usı W_m energiyasın maydannır ózin táriyipleytuǵın parametrler arqalı ańǵartıwǵa bolatuǵınlıǵın kóremiz. Magnit maydanınıń kernewligi H , magnit indukciyası B hám maydan iyelep turǵan keńisliktiń kólemi maydandı táriyipleytuǵın parametrler bolıp tabıladı. Bizler elektrostatikalıq zaryadlardıń energiyasın elektrostatikalıq maydan bar bolǵan keńislikte qanday etip lokalizaciyalǵan bolsaq, tap sol sıyaqlı magnitlik energiyanı keńisliktiń magnit maydanı bar bóliminde lokalizaciyalay alamız.

Bul mäseleni I_1 hám I_2 toqları ótip turǵan eki konturdı alıw jolı menen sheshe alamız. Bunday sistemanıń energiyası tek ózlik indukciya koefficientlerinen ǵana emes, al óz-ara indukciya koefficientinen de ǵárezli boladı.

Bul jaǵdaydı kórsetiw ushın toqlardıń payda bolıw jumısın esaplaymız. Meyli, dáslep eki kontur da tuyıqlanbaǵan bolsın. Bunnan keyin birinshi konturdı tuyıqlaymız hám usı konturǵa tutastırılǵan e.q.kúshi lenc-djoul jıllılıǵınıń payda bolıwı hám ózlik indukciyanıń e.q.kúshin jeńiw ushın islenedi. Toqtır magnit maydanınıń energiyasın anıqlaytuǵın jumıstır bul sońǵı bóliminiń

$$A_1 = \frac{1}{2} L_1 \cdot I_1^2$$

shamasına teń bolatuǵınlıǵın keyinirek kórsetemiz. Bul teńlikte L_1 - birinshi konturdıń ózlik indukciya koefficienti. Birinshi konturda toqtı payda etkennen keyin ekinshi konturdı tuyıqlaymız. Bunday jaǵdayda qosılǵan e.q.kúshi ekinshi konturda lenc-djoul jıllılıǵınıń bólinip shıǵıwı hám ekinshi konturdıń ózlik indukciyasın jeńiw ushın jumıs isleydi; joqarıda kórsetilgendey, ózlik indukciyanıń e.q.kúshin jeńiw ushın islengen jumıs mınaǵan teń:

$$A_2 = \frac{1}{2} L_2 \cdot I_2^2.$$

Bul teńlikte L_2 - ekinshi konturdıń ózlik indukciyası koefficienti. Biraq jumıstır isleniwi usınıń menen tamam bolmaydı. Sebebi ekinshi konturda toq payda bolǵanda birinshi konturda óz-ara indukciya e.q.kúshi payda boladı. Onıń san mánisi mınaǵan teń:

$$|\mathcal{E}_i| = \frac{d\Phi_{12}}{dt}. \quad (3)$$

Bul teńlikte Φ_{12} arqalı ekinshi konturdaǵı I_2 toǵı tárepinen payda etiletuǵın hám birinshi kontur arqalı ótetuǵın magnit indukciyasınıń aǵısı.

I_1 turaqlı etip uslap turıw ushın birinshi konurǵa tutastırılǵan e.q.kúshi óz-ara indukciyanıń e.q.kúshin jeńiw ushın qosımsha jumıstı islewi kerek. Bul A_{12} jumısınıń bilayınsha esaplanıwı

múmkín. Júdá kishi bolǵan dt waqıtınıń ishinde orınlangan elementar dA_{12} jumısı mınaǵan teń:

$$dA_{12} = |\mathcal{E}_i| I_1 dt.$$

Eger $|\mathcal{E}_i|$ shamasınıń ornına onıń (3)-ańlatpa boyınsha mánisin qoysaq mınaday teńliklerdi alamız:

$$dA_{12} = I_1 \frac{d\Phi_{12}}{dt} dt = I_1 d\Phi_{12}.$$

I_1 toq kúshi turaqlı uslap turılatuǵın bolǵanlıqtan, óz-ara indukciyanı jeńiw ushın islenetuǵın tolıq jumıs mınaǵan teń:

$$A_{12} = I_1 \int_0^{d\Phi_{12}} d\Phi_{12} = I_1 \Phi_{12}.$$

Bul ańlatpada Φ_{12} - indukciya aǵısınıń aqırǵı mánisi.

$\Phi_{12} = L_{12} I_2$ teńliginiń orınlı ekenligin ańǵarıp (L_{12} arqalı birinshi hám ekinshi konturlardıń óz ara indukciya koefficienti belgilengen), mınaǵan iye bolamız:

$$A_{12} = L_{12} I_1 I_2.$$

Eger biz A_1, A_2 hám A_{12} jumısların qossaq eki toqtan turatuǵın sistemaniń magnit maydanınıń energiyasın alamız:

$$W_m = A_1 + A_2 + A_{12} = \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + \frac{1}{2} L_2 I_2^2 + L_{12} I_1 I_2. \quad (4)$$

Álbette, tap usınday bolǵan toqlardıń sistemasın biz basqa izbe-izlikte de alǵan bolar edik: dáslep toqtı ekinshi konturda, al onnan keyin toqtı birinshi konturda payda etiw arqalı. Joqarıda ótkerilgen tallawlardı qaytalap, biz bul jaǵdayda sistemaniń energiyası ushın mınaday ańlatpanı alǵan bolar edik:

$$W_m = \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + \frac{1}{2} L_2 I_2^2 + L_{21} I_1 I_2. \quad (4a)$$

Toqlardıń sistemasınıń energiyasınıń olardı belgilewdiń izbe-izliginen ǵárezli bolmawı hám sonlıqtan (4)- hám (4a) ańlatpalar bir biri menen teppe-teń bolıwı shárt. Bunnan mınaday teńlikti alamız:

$$L_{21} = L_{12}.$$

Bul teńlikti biz 227-paragrafta [(3)-teńlik] alǵan edik.

(2)-formula toqtıń kúshi I menen ózlik indukciya koefficienti L diń funkciyası sıpatında toqtıń magnit maydanınıń energiyasın beredi. Biraq biz bul formulaǵa energiyanıń qorshaǵan ortalıqtaǵı magnit maydanınıń táriyipleytuǵın shamalardıń funkciyası sıpatındaǵı túrdi beriwimiz kerek. Bunday túrlendiriwdi dara jaǵday bolǵan uzın solenoidtiń ishindegi bir tekli magnit maydanı ushın orınlaymız.

(2)-formula boyınsha, solenoid boyınsha ótetuǵın toqtıń magnit energiyası mınaǵan teń:

$$W_m = \frac{1}{2} L I^2.$$

225-paragraftaǵı (6)-formula boyınsha ózlik indukciya koefficienti mınaǵan teń:

$$L = 4\pi\mu n^2 V.$$

Bul teńlikte V - solenoidtiń kólemi, n - uzınlıqtıń bir birliğine sáykes keletuǵın oramlar sanı, μ - solenoidtiń ishki bólimin toltırıp turǵan ortalıqtıń magnit sińirgishligi.

Usınıń menen bir qatarda, solenoidtiń ishindegi toqtıń kúshi I menen magnit maydanınıń kernewligi

$$I = \frac{H}{4\pi n}$$

qatnası boyınsha baylanısqa. L menen I diń mánislerin (2) ge qoyıp

$$W_m = \frac{1}{8\pi} \mu H^2 V \quad (5)$$

teńligin yamasa, μH shamasınıń magnit indukciyası B ǵa teń ekenligin ańǵarıp, (5)-ańlatpanı bılayınsha kóshirip jazamız:

$$W_m = \frac{1}{8\pi} HB V. \quad (6)$$

Magnit maydanın tek solenoidtiń ishinde, yaǵnıy V kóleminde toplanǵan dep esaplap, magnit energiyasınıń tıǵızlıǵı ushın mınaday ańlatpanı jazı alamız:

$$w_m = \frac{W_m}{V} = \frac{1}{8\pi} HB. \quad (7)$$

Solay etip, magnit energiyasınıń tıǵızlıǵı maydanniń kernewligi H penen magnit indukciyası B nıń kóbeymesine teń eken. Eger (7)-formulada eki shama da $CGSM$ -sistemasında, yaǵnıy sáykes erstedler menen gausslarda ólshengen bolsa, onda w_m shaması erg/sm^3 birliklerinde alınadı.

Keńisliktegi magnit maydanı bir tekli bolmaǵan jaǵdayda keńislikti sheklerinde $\mathbf{H}$ hám $\mathbf{B}$ shamaların turaqlı dep esaplawǵa bolatuǵınday júdá kishkene bolǵan uchastkalarǵa bóliw kerek. Bunday jaǵdayda (7)-formula usınday uchastkaniń sheklerindeki magnit energiyasınıń tıǵızlıǵın beredi. Kólemi dV shamasına teń bolǵan uchastkaǵı sáykes keletuǵın energiya mınaǵan teń boladı:

$$dW_m = w_m dV = \frac{1}{8\pi} HB dV. \quad (7a)$$

Shekli V kóleminiń ishindegi energiya

$$W_m = \frac{1}{8\pi} \int_V HB dV \quad (8)$$

ańlatpasınıń járdeminde beriledi. Bul jaǵdayda integrallaw barlıq V kólemi boyınsha alıp barıladı.

§ 229. Qaytadan magnitlew jumısı. Magnetikti magnitlew magnitlewshi maydanniń kernewliginiń bir mánisli funkciyası bolıp tabılmaıdı. 203-paragrafta biz gisterezis qubılısın qaradıq. Bul qubılıs H tiń berilgen mánisindegi magnitleniwdiń kernewliktiń usı H mánisiniń qalayınsha alınǵanlıǵınan ǵárezli.

301-súwrette keltirilgen gisterezis ilmegindegi a noqatı menen táriyiplenetuǵın magnetiktiń halın qaraymız. Usı a halınan shıǵıp magnetikti gisterezis ilmegin $abkfela$ jolı menen júriwge sáykes keletuǵınday etip qaytadan magnitleyik dep boljaymız. Bunday qaytadan magnitlew processiniń jumıs islew menen baylanıslı ekenligin kórsetemiz. Onıń ushın bunnan burınǵı paragrafta keltirip shıǵarılǵan qatnastan paydalanamız. Bul qatnas boyınsha kontur boyınsha magnit indukciyasınıń aǵısı $d\Phi$ shamasına úlkeygende (toqtır kúshiniń úlkeyiwiniń esabınan) konturdiń magnit maydanınıń energiyasınıń payda bolıwı ushın jumsalatuǵın elementar dA jumısı mınaǵan teń:

$$dA = Id\Phi. \quad (1)$$

Bul teńlikte I - konturdaǵı toqtır kúshi⁵⁹.

Biz qarap atırǵan magnetik uzın solenoidtiń ózegi bolıp xızmet etedi dep boljayıq. Meyli, solenoid N dana oramǵa iye hám oramlardıń (ózektiń de) kese kesiminiń maydanı S bolsın. Bunday jaǵdayda solenoidtiń N oramı arqalı aǵıs mınaǵan teń boladı:

$$\Phi = NBS.$$

Bul teńlikte B - solenoidtiń ózegindegi magnit maydanınıń indukciyası.

Solenoidtiń oramındaǵı toqtır kúshi menen onıń tásirinde payda bolǵan magnit maydanınıń kernewligi bilayınsha baylanısqa (194-paragraf):

$$I = \frac{H}{4\pi N/L}.$$

Bul teńlikte l - solenoidtiń uzınlıǵı. Demek, (1)-ańlatpa boyınsha indukciya aǵısınıń ózgerisi menen

⁵⁹ Biz qarap atırǵan ferromagnetik deneler bolatuǵın jaǵday ushın bunnan aldırǵı paragraftaǵı (1)-formulanı paydalanıw durıs bolmaǵan bolar edi. Sebebi olar ushın ózlik indukciya koefficienti L turaqlı shama emes hám $d\Phi \neq LdI$.

baylanıslı bolğan, elementar jumıs mınağan teń:

$$dA = \frac{H}{4\pi N/l} d(NBS) = \frac{Sl}{4\pi} H dB.$$

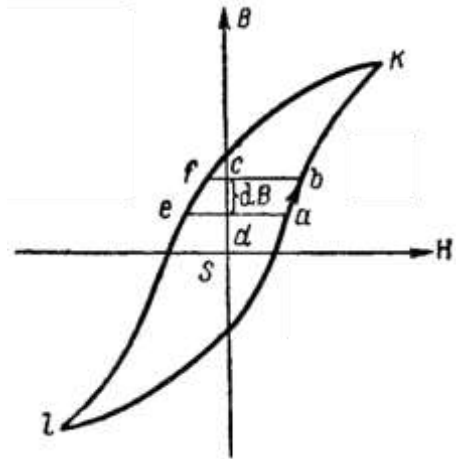
Sl shaması magnetiktıń kólemi bolğanlıqtan, onda ózektiń kóleminiń bir birligine sáykes keletuǵın jumıs dA'

$$dA' = \frac{1}{4\pi} H dB$$

shamasına teń, yaǵnıy indukciya vektorınıń ósimi dB ǵa proporcional.

301-súwret.

Qaytadan magnitleniw jumısın esaplawǵa.



301-súwretke itibar berip, biz gisterezis ilmeginiń baǵı bir ab uchastkası ushın $H \cdot dB$ kóbeymesiniń $abcd$ jolaǵınıń maydanı menen ańǵartılatuǵınıń kóremiz, sebebi bul uchastkaǵa indukciya vektorınıń $dB = dc$ ósimi sáykes keledi. Tap sonday bolğan $dB = cd$ mánisi gisterezis iymekliginiń fe uchastkasına da sáykes keledi, biraq bul uchastkada dB nıń mánisi teris, sebebi bul orında indukciya kishireydi (f noqatınan e noqatına ótiw). fe uchastkasındaǵı H vektorı da teris; demek, $H \cdot dB$ kóbeymesi oń hám $cdef$ jolaǵınıń maydanı menen ańǵartıladı. Solay etip, magnitlegende biz qarap atırǵan dB nıń mánisine $abcd$ jolaǵınıń maydanına proporcional, al magnitsizlendirende $cdfe$ jolaǵınıń maydanına proporcional jumıs sáykes keledi. Eki jumıstı da birge esapqa alıp, gisterezis iymekliginiń ab hám ef uchastkalarına $\frac{1}{4\pi} \times (abfe)$ jolaǵınıń maydanı shamasına teń jumıs sáykes keledi.

Qaytadan magnitleniwdiń tolıq cikliniń usınday uchastkalardıń summası túrinde kórsetiliwi múmkin; demek, ózektiń kóleminiń bir birligin qaytadan magnitlegende islengen tolıq jumıs $abfe$ jolaǵınıń maydanı sıyaqlı barlıq jolaqlardıń maydanlarınıń qosındısına proporcional, yaǵnıy gisterezis iymekliginiń ilmeginiń maydanı S_1 ge proporcional:

$$A' = \frac{1}{4\pi} S_1.$$

Qaytadan magnitleniwde jumshalatuǵın jumıs solenoidtiń magnit maydanınıń energiyasına yamasa jıllılıqqa aylanıwı kerek. Óziniń baslanǵısh noqatına qaytıp kelgende onıń energiyası da ózgergen joq yamasa ózgere almadı. Bunnan gisterezis bar bolğan jaǵdaydaǵı qaytadan magnitleniwdiń ózektiń qızıwına alıp keletuǵınlıǵı belgili boladı hám bul jaǵday tájiriybede baqlanadı. Jumıstı esaplaw ushın berilgen magnit material ushın gisterezis ilmeginiń formasın bilwı kerek.

Ferromagnitlerden soǵılǵan ózeklerdi qaytadan magnitlegende energiyanıń joǵalıwın hár qıylı texnikalıq máselelerde esapqa alıw kerek boladı. Bunday jaǵdayda jumıstı anıqlaw ushın kóplegen magnit materiallar ushın jetkilikli dárejede durıs nátiye beretuǵın tómendegidey emperikalıq formuladan paydalanıw kerek:

$$A' = \eta B_{max}^{1,6}.$$

Bul teńlikte B_{max} - qaytadan magnitleniwdiń berilgen cikında jetiw múmkin bolǵan magnit indukciyasınıń maksimalıq mánisi. η koefficienti berilgen materialdıń qásiyetlerinen ǵárezli; mısalı, transformatorlıq temir ushın

$$\eta = 0,0008 \text{ gr/sm}^3 \cdot (\text{gs})^{1,6};$$

qattı polat ushın

$$\eta = 0,008 \text{ gr/sm}^3 \cdot (\text{gs})^{1,6};$$

§ 230. Kabeldiń ózlik indukciya koefficienti. 227-paragrafta keltirip shıǵarılǵan qatnaslardı paydalanıwǵa mısál sıpatında sheksiz uzın cilindr tárizli kabeldiń ózlik indukciya koefficientin esaplaymız. Kabel degenimizde eki koaksiallıq cilindr tárizli ótkizgishti názerde tutamız, ishki cilindr arqalı ótetuǵın toq sırtqı cilindr arqalı ótetuǵın toqqa shaması jaǵnan teń, baǵıtları boyınsha qarama-qarsı (302-súwret).

Ishki hám sırtqı cilindrlerdiń radiusların sáykes R_1 hám R_2 arqalı belgileybiz. Kabeldiń uzınlıǵı l ge teń uchastkasın ayırıp alamız. Bul uchastka arqalı ótetuǵın toqtıń magnit energiyasın eki usıl menen kórsetiwge boladı: birinshiden, kabeldiń berilgen uchastkasınıń ózlik indukciya koefficienti L diń járdeminde 227-paragraftaǵı (2)-formula boyınsha:

$$W_m = \frac{1}{2} LI^2 \quad (1)$$

hám, ekinshiden, 227-paragraftaǵı (8)-formula boyınsha toqlardıń magnit maydanın táriyipleytiuǵın shamalar boyınsha:

$$W_m = \frac{1}{8\pi} \int_V \mu H^2 dV. \quad (2)$$

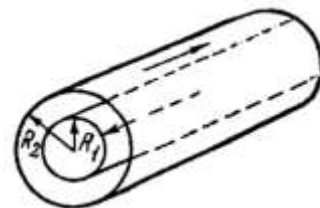
Bul ańlatpada integral kabeldiń ayırıp alınǵan uzınlıǵı l bolǵan uchastkasındaǵı magnit maydanı nolge teń bolmaǵan kólemge tarqatıladı. Bul eki ańlatpanı salıstırıw bizge ózlik indukciya koefficientiniń mánisin anıqlawǵa múmkinshilik beredi. Dáslep W_m energiyasın (2)-formula boyınsha esaplaymız. Onıń ushın ishi quwıs cilindr tárizli ótkizgish arqalı toq ótkende cilindrdiń ishindegi magnit maydanınıń nolge teń ekenligin eske túsiremiz (199-paragrafqa qarańız). Demek, radiusı R_1 ge teń bolǵan cilindrdiń ishinde magnit maydanınıń kernewligi nolge teń hám bul oblast integrallaw oblastınan shıǵıp qaladı. Cilindrlik betlerdiń arasındaǵı kernewlik tek ishki cilindr arqalı ótip atırǵan toq boyınsha anıqlanadı, sebebi sırtqı cilindrdiń bul oblastta payda etken kernewligi de nolge teń. 199-paragrafta ayılǵanlar boyınsha, cilindr tárizli ótkizgish boyınsha ótetuǵın toqtıń magnit maydanı cilindrden tısta usı cilindrdiń kósheri boyınsha ótetuǵın sızıqlı toqtıń magnit maydanınday boladı. Demek, cilindrlerdiń arasındaǵı oblasttaǵı magnit maydanınıń kernewligi H mınaǵan teń:

$$H = \frac{2I}{r}.$$

Bul teńlikte r arqalı cilindrdiń kósherinen shekemgi qashıqlıq belgilengen. Eki cilindrdiń sırtında jaylasqan barlıq noqatlarda maydanınıń kernewligi nolge teń, Sebebi onıń mánisi ulıwmalıq kósherge iye cilindr tárizli ótkizgishler boyınsha shaması boyınsha birdey, biraq baǵıtları boyınsha qarama-qarsı bolǵan toqlardıń payda etken magnit maydanlarınıń payda etken bir birine qarama-qarsı baǵıtlangan kernewlikleriniń qosındısına teń. Demek, (2)-formuladaǵı integrallawdı cilindrlerdiń arasında jaylasqan uzınlıǵı l ge teń cilindrlik qatlamnıń uchastkasına ǵana tarqatıw kerek.

302-súwret.

Eki koaksiallıq cilindrden turatuǵın kabel.



Esaplaw ushın barlıq kólemdi kólemi $dV = 2\pi r \cdot dr \cdot l$ shamasına teń juqa qatlamlarǵa bólemiz; bunday qatlamnıń sheklerinde magnit maydanınıń kernewligi H tı turaqlı dep esaplawǵa boladı. Usı qatlamǵa tiyisli bolǵan energiya mınaǵan teń:

$$w_n \cdot dV = \frac{1}{8\pi} \mu H^2 dV = \mu I^2 l \frac{dr}{r}.$$

Bul ańlatpanı r boyınsha R_1 den R_2 ge shekem integrallaw jolı menen tolıq energiya W_n nı alamız:

$$W_m = \mu I^2 l \int_{R_1}^{R_2} \frac{dr}{r} = \mu I^2 l \ln \frac{R_2}{R_1}.$$

Energiya W_m ushın jazılǵan bul ańlatpanı usı energiyalı ózlik indukciya koefficienti L arqalı anıqlaytuǵın (1)-ańlatpa menen salıstırıp, kabeldiń uzınlıǵı l ge teń bolǵan uchastkasınıń ózlik indukciya koefficientiniń

$$L = 2\mu l \cdot \ln \frac{R_2}{R_1}$$

shamasına teń ekenligin tabamız.

Cilindrlik ótkizgishlerdiń arasındaǵı ortalıqtıń magnit sińirgishligi μ barlıq waqıtta birge jaqın bolǵanlıqtan, juwıq túrdegi

$$L = 2l \cdot \ln \frac{R_2}{R_1}$$

ańlatpasına iye bolamız.

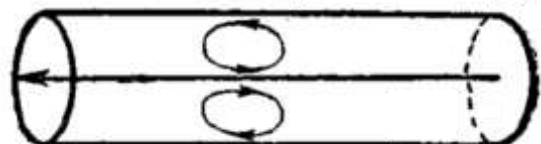
§ 231. Fuko toqları. Betlik effekt. Indukciyalıq toqlar sıızılı kontur dep qarawǵa bolmaytuǵın tutas ótkizgishlerde de payda boladı. Bunday jaǵdayda olardı toqlardı izertlewshi Fukonıń atı menen ataydı. Ózgermeli magnit maydanında turǵan metaldıń tutas bólegi kishi qarsılıqqa iye bolǵan ótkizgish bolıp tabıladı; usınıń nátiyjesinde indukciyalıq toqlardıń kúshi júdá úlken shamalǵa shekem jetedi.

Indukciya e.q.kúshiniń shaması magnit indukciyasınıń aǵısınıń ózgeriw tezligine proporcional bolǵanlıqtan, berilgen ótkizgishke kirgizilgen magnit maydanı qanshama tez ózgeretuǵın bolsa, Fuko toqlarınıń shaması da sonshama úlken boladı. Sonlıqtan Fuko toqlarınıń payda bolıwın oramları arqalı tez ózgeretuǵın toq ótkeriletuǵın, sonlıqtan payda bolǵan magnit maydanı da tez ózgeretuǵın solenoidtiń ishindegi quwıslıqqa ótkizgishti jaylastırıw jolı menen baqlawǵa boladı. Bunday jaǵdayda úlken massaǵa iye bolǵan jaqsı ótkeretuǵın ótkizgishlerdegi Fuko toqlarınıń mánisi sonday úlken boladı, bunday jaǵdayda bólinip shıǵatuǵın jıllılıqtıń shaması sol ótkizgishti balqıtıw ushın jetkilikli boladı. Bul usıl vakuumlıq texnikada hawası sorıp alınǵan ásbaptıń ishindegi metallıq bólimlerdi gazlerden tazalaw ushın keńnen paydalanıladı. Tap usı usıl vakuumda metallardı balqıtıw ushın da qollanıladı.

Biraq, kóp jaǵdaylarda Fuko toqlarınıń tásirinde qızıw zıyanlı bolıp tabıladı. Bunday jaǵdaylarǵa transformatorlardıń yamasa ózgermeli toq ótip turǵan qálegen oramlardıń ózekleriniń qızıwı kiredi (236-paragrafqa qarańız). Usınday qızıwlarıń bolmawı ushın oramlardı qatlamlar túrinde soǵadı hám olardı Fuko toqlarınıń baǵıtına perpendikulyar qoyılǵan izolyaciyanıń juqa qatlamları menen bir birinen ajratadı.

Fuko toqlarınıń payda bolıwın mınaday dúziliستیń járdeminde baqlawǵa boladı. Metaldan soǵılǵan hám elektromagnittiń polyuslarınıń arasında jip penen ildirip qoyılǵan mayatnik elektromagnitte toq bolmaǵan jaǵdayda teń salmaqlıq halınan awıstırıladı hám sonlıqtan ázzi sónetuǵın terbeliske keledi. Toq tutastırılǵanda terbelis dárhál sónedi hám bul jaǵdaydaǵı mayatniktiń toqtayman degenshe qozǵalıstı jabisqaq ortalıqtaǵı qozǵalıstı eske túsiredi. Bul jaǵday ańsat túsindiriledi: magnit maydanında qozǵalǵanda mayatnikte payda bolatuǵın Fuko toqlarınıń magnit maydanınıń baǵıtı sırtqı magnit maydanınıń baǵıtına qarsı baǵıtlanǵan hám sonlıqtan mayatniktiń qozǵalıstına qarsılıq kórsetedi.

303-súwret.
Betlik effektiniń payda bolıwı.



Fuko toqları ózgermeli toq ótip turgan ótkizgishtiń ózinde de payda bola aladı. Bunday toqlardıń payda bolıwı ayırıqsha *betlik effektke* alıp keledi (ingliz teri mánisin beretuǵın skin sózinen *skin-effekt* dep atalatuǵın). Eger ózgermeli toq cilindr tárizli ótkizgish boyınsha ótetuǵın bolsa, onda toqtıń úlkeyiwiniń momentlerinde Fukonıń indukciyalıq toqları 303-súwrette kórsetilgendey baǵıtta boladı. Ótkizgishtiń betinde bul toqlardıń baǵıtı dáslepki elektr toǵınıń baǵıtınday, al ótkizgishtiń kósherinde - toqqa qarama-qarsı baǵıtlangan. Usınıń nátiyjesinde ótkizgishtiń ishinde toq hálisireydi, al betinde kúsheydi. Solay etip, Fukonıń indukciyalıq toqlarınıń payda bolıwınıń nátiyjesinde toq ótkizgishtiń beti boyınsha teń ólsheuli tarqalmaydı. Tez ózgeretuǵın toqlarda ótkizgishtiń kósheriniń qasındaǵı toqtıń tıǵızlıǵı ámeliy jaqtan nolge teń boladı hám toqtıń barlıǵı ótkizgishtiń beti boyınsha ótedi. Usınıń nátiyjesinde ótkizgishtiń ishindegi magnit maydanı nolge teń boladı. Bul qubilis ótkizgishtiń qarsılıǵınıń úlkeyiwine alıp keledi, sebebi onıń ishki bólimleri arqalı toq ótpeydi. Ótkizgishtiń ishki bólimleri paydasız bolǵanlıqtan, metaldı ekonomlaw maqsetinde tez ózgeretuǵın toqlardıń ótkizgishleriniń ishin quwıs etip isleydi. Fuko toqları ótkizgishtiń ózlik indukciya koefficientiniń mánisiniń kishireyiwine de alıp keledi. Bul jaǵdayda cilindr tárizli ótkizgish misalında túsindiriwge boladı. 227-paragraftaǵı (2)-formula boyınsha ózlik indukciya koefficienti L toqtıń magnit energiyası menen mınaday qatnas boyınsha baylanısqan:

$$W_m = \frac{1}{2} LI^2. \quad (1)$$

Magnit maydanınıń energiyası W_m magnit maydanınıń kernewliginen ǵárezli. Skin-effektte ótkizgishtiń ishindegi magnit maydanı nolge teń etip aladı, al ótkizgishten sırttaǵı maydan bolsa ótkizgishtiń kesimi arqalı toqtıń shaması turaqlı bolǵan jaǵdaydaǵıday mániske iye. Nátiyjede maydannıń energiyası kishi boladı, bunnan (1)-formulaǵa sáykes ózlik indukciya koefficienti L kishireydi.

Tutas ótkizgishlerde skin-effekttiń nátiyjesinde jıllılıqtıń bir tekli bolmaǵan bólinip shıǵıwı orın aladı: jıllılıq tiykarınan ótkizgishtiń betinen bólinip shıǵadı. Bul effekt V.P.Vologdin tárepinen polattı betlik shınıqtırıw usılın islep shıǵıw ushın qollanıldı.

§ 232. Ózgermeli toq. Tuyıq konturda ózgermeli e.q.kúshiniń tásirinde ózgermeli toq payda boladı. Tarmaqlanbaǵın ótkizgishtiń hár qıylı kesimlerindegi usınday ózgermeli toqlardıń kúshleriniń shamaları turaqlı bolmaydı. Turaqlı toq qanaatlandıratuǵın tiykarǵı talaptıń bunday bolıp orınlanbawı elektromagnit maydanlarınıń tarqalıwınıń tezliginiń shekli ekenligi menen baylanıslı. Eger toqtıń kúshi menen zaryadlardıń tarqalıwınıń shaması ózgeretuǵın t waqıtı biz qarap atırǵan elektrlik sistemanıń bir birine salıstırǵanda eń qashıq noqatlarınıń arasındaǵı elektromagnit uyıtqıwdıń barıp jetetuǵın waqıtınan ádewir úlken bolǵan jaǵdayda onday turaqlı toq qanaatlandıratuǵın tiykarǵı talaptıń orınlanbawın esapqa almawǵa boladı. Usınday shártti qanaatlandıratuǵın toqlardı *kvazistacionar toqlar* dep ataydı. 232 - 234 paragraflarda bizler tek sonday toqlardı qaraymız. Kvazistacionar toqlar ushın hár bir momentte Kirxgof nızamları orınlanadı.

Bir tekli magnit maydanda konturdı aylandırǵanda (224-paragrafqa qarańız) konur tárepinen sheklengen bet arqalı magnit indukciyasınıń aǵısınıń dáwirli túrde ózgeretuǵınlıǵın kórdik. Usınıń saldarınan konturda dáwirli túrde ózgeretuǵın toq indukciyalanadı. Bul processtiń xarakterin tolıǵıraq qaraymız.

224-paragrafta kórsetilip ótilgendey, ramkanı magnit maydanında ω múyeshlik tezligi menen aylandırǵanda ramkanıń konturı sheklep turgan bet arqalı ótetuǵın indukciyanıń aǵısı Φ waqıt t ǵa baylanıslı

$$\Phi = \Phi_0 \cos \omega t \quad (1)$$

nızamı boyınsha ózgeredi. Bul teńlikte Φ_0 konturdıń maydanı arqalı ótetuǵın aǵıstıń eń úlken aǵısın bildiredi. Usınıń saldarınan shınjırda payda bolatuǵın elektr qozǵawshı kúsh mınaǵan teń

boladı:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt} = \omega\Phi_0 \sin \omega t = \mathcal{E}_0 \sin \omega t. \quad (2)$$

Bul waqıtqa baylanıslı sinusoidallıq nızam boyınsha ózgeretuǵın ózgermeli e.q.kúshine eń ápiwayı misal bolıp tabıladı. $\mathcal{E}_0 = \omega\Phi_0$ shaması e.q.kúshiniń *amplitudası* dep ataladı hám onıń eń úlken mánisin beredi.

Toqtıń kúshi ózgermeli bolǵanlıqtan, sırtqı e.q.kúshi $\mathcal{E}$ den basqa, konturda ózlik indukciyanıń e.q.kúshi de bar boladı. Meyli, L arqalı biz qarap atırǵan shınjırdıń ózlik indukciya koefficienti belgilengen bolsın. Ózlik indukciyanıń e.q.kúshiniń mınaǵan teń ekenligi belgili:

$$\mathcal{E}_{si} = -L \frac{dI}{dt}. \quad (3)$$

Kirxgof nızamı bolıynsha e.q.kúshlerdiń $\mathcal{E} + \mathcal{E}_{si}$ qosındısı konturdıń qarsılıǵı menen olar arqalı ótip turǵan toqtıń kóbeymesine teń:

$$IR = \mathcal{E} + \mathcal{E}_{si}. \quad (4)$$

(4)-formulaǵa $\mathcal{E}$ hám $\mathcal{E}_{si}$ shamalarınıń (2)- hám (3)-ańlatpalar boyınsha mánislerin qoysaq, onda

$$RI + L \frac{dI}{dt} = \mathcal{E}_0 \sin \omega t \quad (5)$$

teńlemesin alamız. Bul qatnas berilgen e.q.kúshi $\mathcal{E} + \mathcal{E}_0 \sin \omega t$, ózlik indukciya koefficienti L hám R qarsılıǵına iye bolǵan konturdaǵı toqtıń kúshi I di anıqlaytuǵın differenciallıq teńleme bolıp tabıladı. Bul teńlemenıń toqtıń kúshi I ushın dara sheshimin toqtı waqıttıń dáwirlik funkciyası, al dáwirdiń shaması e.q.kúshiniń ózgeriw dáwirine teń dep, yaǵnıy I ushın sheshimdi

$$I = I_0 \sin(\omega t - \varphi) \quad (6)$$

túrinde izleybiz. Bul teńlikte I_0 hám φ shamaları turaqlı shamalar bolıp tabıladı hám olardıń mánislerin anıqlaw kerek. Bul ańlatpanı (5)-teńlemege qoyıp hám differenciallawdı orınlap,

$$RI_0 \sin(\omega t - \varphi) + LI_0 \omega \cos(\omega t - \varphi) = \mathcal{E}_0 \sin \omega t \quad (5a)$$

yamasa

$$RI_0(\sin \omega t \cos \varphi - \cos \omega t \sin \varphi) + LI_0 \omega (\cos \omega t \cos \varphi + \sin \omega t \sin \varphi) - \mathcal{E}_0 \sin \omega t = 0$$

ańlatpaların alamız. Bul teńliktiń waqıttıń qálegen momentinde orınlanıwı ushın $\sin \omega t$ hám $\cos \omega t$ shamalarınıń aldında turǵan koefficientlerdiń bir waqıtta nolge teń bolıwı kerek; bul shárt mınaday eki teńlemenı beredi:

$$\left. \begin{aligned} LI_0 \omega \cos \varphi - RI_0 \sin \varphi &= 0, \\ LI_0 \omega \sin \varphi + RI_0 \cos \varphi - \mathcal{E}_0 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Bul teńlemelerdiń keyingisin bılayınsha kóshirip jazamız:

$$LI_0 \omega \sin \varphi + RI_0 \cos \varphi = \mathcal{E}_0. \quad (8)$$

(7) degi teńliklerdiń birinshisindegi eki aǵzanı da $RI_0 \cos \varphi$ shamasına bólgennen keyin mınanı beredi:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{L\omega}{R}. \quad (9)$$

(7)-teńliklerdiń birinshisin hám (8)-teńlikti kvadratqa kóterip, bunnan keyin olardı qosıp, mınaday ańlatpanı alamız:

$$I_0^2(L^2\omega^2 + R^2) = \mathcal{E}_0^2.$$

Bunnan mınaday teńleme kelip shıǵadı:

$$I_0 = \frac{\mathcal{E}_0}{\sqrt{L^2\omega^2 + R^2}}. \quad (10)$$

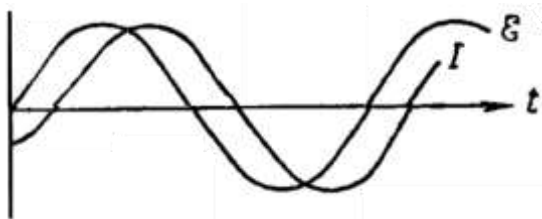
(9)- hám (10)-ańlatpalar belgisiz bolǵan I_0 hám φ turaqlıların anıqlaydı. I_0 hám φ shamalarınıń usı mánislerin paydalanıp, (6)-qatnastıń tiykarında biz qarap atırǵan shınjırdaǵı toqtıń kúshi I ushın ańlatpanı alamız:

$$I = \frac{\mathcal{E}_0}{\sqrt{L^2\omega^2 + R^2}} \sin \left(\omega t - \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{L\omega}{R} \right). \quad (11)$$

Bul formulani indukciyanıń e.q.kúshi ushın jazılǵan (2)-ańlatpa menen salıstırıp, biz toq I diń de, e.q.kúsh $\mathcal{E}$ niń de sinusoida ekenligin, biraq fazası boyınsha bir birine salıstırǵanda φ shamasına jılısqan ekenligin kóremiz. Toq penen e.q.kúshi eń úlken mánisleri arqalı bir waqıtta ótpeydi hám nol mánisine bir waqıtta jetpeydi. 304-súwrette fazalardıń ayırmasınıń bazı bir φ mánisi ushın e.q.kúshi $\mathcal{E}$ menen toq kúshi I diń ózgeriwleri grafik túrinde kórsetilgen. (9)-qatnas berilgen ω jiyiligindegi e.q.kúsh penen toqtıń kúshi arasındagı fazalardıń jılısıwınıń L/R qatnası boyınsha anıqlanatuǵınlıǵın kórsetedi. L/R qatnası qanshama úlken bolsa, $t g \omega$ nıń da mánisiniń, yaǵnıy faza boyınsha jılısıw φ diń mánisiniń úlken boladı. $L \neq 0$ hám shıńjırdıń qarsılıǵın nolge teń dep esaplaǵanda ω eń úlken mánisin qabıl etedi. Bunnan

$$\varphi = \frac{\pi}{2}$$

teńligine iye bolamız, yaǵnıy toq e.q.kúshten sherek dáwirge keyin qaladı.



304-súwret.

Ózlik indukciya bar shıńjırda ózgermeli toq bolǵan jaǵdaydaǵı e.q.kúshi $\mathcal{E}$ menen toqtıń kúshi I diń waqıttan ǵárezligi.

Toq kúshiniń amplitudası I_0 diń e.q.kúshiniń amplitudası $\mathcal{E}_0$ den ǵárezligin anıqlaytuǵın (10)-formula Om nızamın eske túsiredi. Bunday jaǵdayda qarsılıqtıń ornın *tolıq qarsılıq* dep atalatuǵın (yamasa *kórinetuǵın qarsılıq* yamasa *shıńjırdıń impedansı* dep atalatuǵın)

$$z = \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2} \quad (12)$$

shaması iyeleydi. $L\omega$ shaması *induktivlik qarsılıq* dep ataladı. Induktivlik qarsılıqtı R_ω arqalı belgilep, mınaǵan iye bolamız:

$$R_\omega = L\omega. \quad (13)$$

Kórinip turǵanıday, toq kúshiniń amplitudası tolıq qarsılıq z ten ǵárezli. Berilgen R omliq qarsılıǵında ózlik indukciya koefficienti L menen jiyilik ω qansha úlken bolsa tolıq qarsılıq z tiń shaması da úlken boladı.

Induktivlik qarsılıqtıń tutqan ornın bahalaw ushın solenoid arqalı ótetuǵın toqtıń kúshin anıqlaymız. Solenoidtıń ózlik indukciya koefficientiniń mánisin biz 225-paragrafta anıqlaǵan edik. Meyli, bul solenoidtıń omliq qarsılıǵı $R = 20 \text{ om}$ bolsın, al onıń ózlik indukciya koefficientiniń $L = 0,023 \text{ gn}$ shamasına teń ekenligin biz anıqladıq. Solenoidtıń ushlarındaǵı potenciallar ayırmasınıń amplitudalıq $V_1 - V_2$ mánisi 100 v, bir sekundtaǵı dáwirler sanı: a) 50, b) 250, c) 500 bolǵan jaǵdaylardaǵı toq kúshiniń amplitudlası I_0 di anıqlaymız. (10)-formula boyınsha toq kúshiniń amplitudası

$$I_0 = \frac{V_1 - V_2}{\sqrt{L^2 \omega^2 + R^2}}$$

formulasınıń járdeminde esaplanadı. Joqarıda keltirilgen úsh jaǵday ushın cikllıq jiyilik ω mınaǵan teń:

- a) $\omega = 2\pi\nu = 2\pi \cdot 50 = 314 \text{ sek}^{-1}$,
- b) $\omega = 2\pi\nu = 2\pi \cdot 250 = 1570 \text{ sek}^{-1}$,
- c) $\omega = 2\pi\nu = 2\pi \cdot 500 = 3140 \text{ sek}^{-1}$.

Toq kúshiniń amplitudaları mınaǵan teń:

$$\begin{aligned} \text{a) } I_0 &= \frac{100}{\sqrt{(0,023 \cdot 314)^2 + 20^2}} \cong 4,8 \text{ a}, \\ \text{b) } I_0 &= \frac{100}{\sqrt{(0,023 \cdot 1570)^2 + 20^2}} \cong 2,4 \text{ a}, \\ \text{c) } I_0 &= \frac{100}{\sqrt{(0,023 \cdot 3140)^2 + 20^2}} \cong 1,3 \text{ a}. \end{aligned}$$

Eger usı solenoidtiń ushlarındaǵı potenciallar ayırması 100 v bolǵanda ol arqalı ótetuǵın turaqlı toqtıń shaması mınaday bolǵan bolar edi:

$$I = \frac{V_1 - V_2}{R} = 5 \text{ a.}$$

Alınǵan nátiyjelerdi salıstırǵanda toqtıń ózgeriw jıyliginiń tutqan ornı kórinip tur: 1 sek ishinde 50 dáwir bolǵanda induktivlik qarsılıqtıń tutqan ornı úlken emes, biraq 1 sek waqıttıń ishinde 500 dáwir bolǵanda toqtıń kúshi turaqlı toqtıń kúshinen derlik tórt ese kishi boladı.

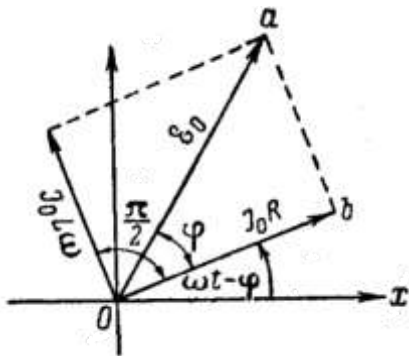
(5a) formulanı ózgermeli toqtı anıqlaytuǵın shamalardıń grafikalıq xarakteristikası ushın paydalanıwǵa boladı. Onıń ushın (5a) nı bılayınsha jazamız:

$$RI_0 \sin(\omega t - \varphi) + LI_0 \omega \sin\left(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2}\right) = \mathcal{E}_0 \sin \omega t. \quad (5b)$$

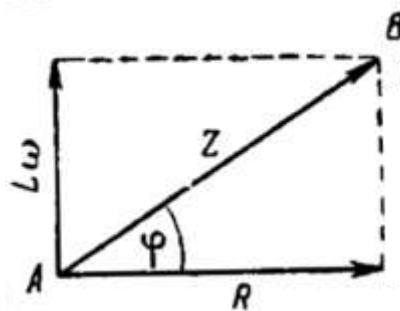
SHep tárepte turǵan aǵzalar birdey dáwirge iye, fazalar ayırması $\pi/2$ ge teń eki gramonikalıq terbelistiń qosındısı bolıp tabıladı. Qosındı nátiyjeni alıw ushın I tomnıń 97-paragrafında bayanlanǵanday tártipte amplitudalardı grafikalıq túrde qosıwǵa boladı. Onıń ushın (305-súwret) amplitudanıń vektorı RI_0 shamasın OX kósherine $\omega t - \varphi$ múyeshi menen hám amplituda vektorı $LI_0 \omega$ shamasın $\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2}$ múyeshi menen jaylastırıw kerek. Bul amplitudalardıń geometriyalıq qosındısı (5b) ańlatpasına sáykes $\mathcal{E}_0$ e.q.kúshiniń amplitudasınıń vektorın beredi. Sızılmadan RI_0 amplitudası menen $\mathcal{E}_0$ amplitudasınıń arasındaǵı múyeshitiń

$$\frac{LI_0 \omega}{RI_0} = \frac{L\omega}{R} = \operatorname{tg} \varphi$$

teńlikleriniń orınlı ekenligine baylanıslı φ ge teń ekenligi kórinip tur. $\mathcal{E}_0$ amplituda vektorınıń OX kósherine proekciyası waqıttıń hár bir momentindegi e.q.kúshti beredi. RI_0 hám $L\omega I_0$ vektorlarınń sol kósherge túsilgen proekciyaları omliq qarsılıq R diń hám ózlik indukciyanıń bar bolıwınıń sebebinen konturdaǵı potencialdı túsiwin beredi. Oab úsh múyeshliginen φ múyeshiniń tangensiniń I_0 diń mánisinен gárezsiz ekenligi kórinip tur; sonlıqtan belgili bolǵan omliq hám induktivli qarsılıqlardaǵı fazalardıń ayırması menen tolıq qarsılıqtı grafikalıq jollar menen tabıw ushın katetleri R hám $L\omega$ ge, al AB gipotenuzası tolıq qarsılıq $z = \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}$ shamasına teń bolǵan tuwrı múyeshli úsh múyeshlikti qurıw kerek (306-súwret). Bunday jaǵdayda φ múyeshi toq penen e.q.kúshtiń arasındaǵı fazalardıń ayırmasına sáykes keledi.



305-súwret. Ózlik indukciyaǵa iye ózgermeli toq shınjırı ushın vektorlıq diagramma.



306-súwret. Ózlik indukciyaǵa iye ózgermeli toq shınjırındaǵı tolıq qarsılıq z ti omliq qarsılıq R hám induktivlik qarsılıq $L\omega$ arqalı anıqlaw.

Usı waqıtqa shekem biz (5)-teńlemenıń dara sheshiminen paydalandıq. Eger (11)-dara sheshimge sáykes

$$RI + L \frac{dI}{dt} = 0$$

bir tekli teńlemenıń ulıwmalıq sheshimin qossaq, onda (5)-teńlemenıń tolıq sheshimin alamız. Bul bir tekli teńlemenıń sheshimi mınaday túrge iye:

$$I = Ae^{-\frac{R}{L}t}.$$

Bul teńlikte A - baslanǵısh shártler boyınsha anıqlanatuǵın turaqlı. Bul waqıttır ótiwi menen kishireyetuǵın toqtır bólimin beredi hám ádette onı nolge teń dep esaplaydı. Solay etip, ornıqlı bolǵan toq ushın jazılǵan ańlatpa ǵana qızıǵıwdı payda etedi. Al bunday ańlatpa (11)-teńlemenin sheshimi bolıp tabıladı.

§ 233. Ózgermeli toq shıńjırında bólinip shıǵatuǵın quwat. Ózgermeli toq shıńjırında bólinip shıǵatuǵın quwatı qaraymız. Eger toqtır kúshiniń bir zamatlıq mánisin menen e.q.kúshtiń bir zamatlıq mánisin kóbeytsek, onda quwatıń bir zamatlıq mánisin alamız:

$$M = I\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \sin \omega t \cdot I_0 \sin(\omega t - \varphi). \quad (1)$$

Waqıttır hár qıylı momentlerinde quwatıń bul bir zamatlıq mánisleri hár qıylı boladı. Mısalı, I yamasa $\mathcal{E}$ shamaların biriniń mánisi nolge teń bolǵanda quwatıń mánisi de nolge teń boladı. Sonlıqtan, bizdi quwatıń bir zamatlıq mánisi emes, al dáwirdiń ishindegi ortasha mánisi qızıqtıradı. Bul ortasha mánisti esaplaw ushın $\bar{W}$ ushın jazılǵan (1)-ańlatpanı bılayınsha túrlendiremiz:

$$\bar{W} = \mathcal{E}_0 I_0 \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \varphi) = \frac{\mathcal{E}_0 I_0}{2} [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)].$$

Solay etip, bir dáwirdiń ishindegi $\bar{W}$ ortasha mánis $\frac{\mathcal{E}_0 I_0}{2} \cos \varphi$ hám $-\frac{\mathcal{E}_0 I_0}{2} \cos(2\omega t - \varphi)$ shamaların ortasha mánisleriniń qosındısınan turadı eken. Birinshi aǵza waqıttan ǵárezli emes; demek, onıń ortasha mánisi onıń óziniń mánisine teń; ekinshi aǵza bolsa $\cos(2\omega t - \varphi)$ shamasınıń waqıtqa baylanıslı ózgeriwi menen ózgeredi. Álbette bir dáwirdiń ishindegi $\cos(2\omega t - \varphi)$ shamasınıń ortasha mánisi nolge teń. Sebebi bir dáwirdiń ishinde $\cos(2\omega t - \varphi)$ oń mánislerge de, teris mánislerge de iye boladı. Nátiyjede shıńjırda bólinip shıǵatuǵın quwatıń bir dáwir ishindegi ortasha mánisi mınaǵan teń boladı:

$$\bar{W} = \frac{\mathcal{E}_0 I_0}{2} \cos \varphi. \quad (2)$$

Mınaday belgilewdi kirgizemiz:

$$\mathcal{E}_{ef} = \frac{\mathcal{E}_0}{\sqrt{2}}, I_{ef} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}. \quad (3)$$

$\mathcal{E}_{ef}$ hám I_{ef} shamaları *e.q.kúshiniń effektivlik mánisi* hám *toq kúshiniń effektivlik mánisi* dep ataladı; olardı (2)-teńlikke qoyıp, quwatıń bir dáwir ishindegi ortasha mánisi ushın mınaday ańlatpaǵa iye bolamız:

$$\bar{W} = \mathcal{E}_{ef} I_{ef} \cdot \cos \varphi. \quad (2a)$$

Eger toq penen e.q.kúshiniń arasındaǵı fazalardıń ayırması nolge teń bolsa, onda ortasha quwat toq kúshiniń effektivlik mánisi menen e.q.kúshtiń effektivlik mánisiniń kóbeymesine teń boladı. Solay etip, turaqlı toq ushın toq kúshi menen e.q.kúsh qanday orındı iyeleytuǵın bolsa, ózgermeli toq ushın e.q.kúsh penen toqtır effektivlik mánisleri tap sonday orındı iyeleydi.

Quwatıń ortasha mánisi fazalardıń ayırmasınan ǵárezli. Eń úlken mániske ol fazalar ayırması nolge teń bolǵan jaǵdayda jetedi. Bul jaǵday shıńjırda ózlik indukciya bolmaǵan jaǵdayda orın aladı. Eger fazalar ayırması $\pi/2$ ge teń bolsa, onda quwatıń ortasha mánisi nolge teń boladı. Demek, bul jaǵdayda dáwirdiń bir sheregindegi derek tárepinen jetkerilip beriletuǵın energiya dáwirdiń basqa shereginde ózlik indukciyanıń elektromagnitlik energiyasınıń derekke qaytıp beriliwi orın aladı. Bul jaǵday shıńjırda omıq qarsılıǵı nolge teń bolǵan jaǵdayda ǵana júzege keledi. Biraq shıńjırda omıq qarsılıǵınıń nolge teń bolıw shárti ámeliy jaqtan hesh waqıtta orınlanbaydı.

Toq tárepinen islep shıǵılǵan quwat jıllılıq túrinde bólinip shıǵadı. Sonlıqtan, t waqıtı ishindegi barlıq shıńjırdaǵı bólinip shıǵatuǵın energiya mınaǵan teń:

$$Q = \mathcal{E}_{ef} \cdot I_{ef} \cos \varphi \cdot t. \quad (4)$$

(3)-formula boyınsha toq kúshiniń effektivlik mánisi I_{ef} menen e.q.kúshtiń effektivlik mánisi

$\mathcal{E}_{ef}$ maksimalıq I_0 hám $\mathcal{E}_0$ mánislerinen turaqlı kóbeytiwshi boyınsha ǵana ayrılatuǵın bolǵanlıqtan, yaǵnıy

$$I_{ef} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_0 \cong 0,707 I_0, \mathcal{E}_{ef} = \frac{1}{\sqrt{2}} \mathcal{E}_0 \cong 0,707 \mathcal{E}_0$$

teńlikleri orınlı bolǵanlıqtan, I_{ef} hám $\mathcal{E}_{ef}$ shamalarınń arasında I_0 hám $\mathcal{E}_0$ shamalarınń arasındaǵı qatnastay qatnas orın aladı [232-paragraftaǵı (10)-formulaǵa qarańız]:

$$I_{ef} = \frac{\mathcal{E}_{ef}}{\sqrt{L^2 \omega^2 + R^2}}.$$

Bul qatnastı paydalanıp, shıńjırda bólinip shıǵatuǵın jıllılıq ushın jazılǵan (4)-ańlatpanı

$$Q = I_{ef}^2 \sqrt{L^2 \omega^2 + R^2} \cdot \cos \varphi \cdot t$$

túrinde yamasa

$$Q = I_{ef}^2 \cdot R \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{L\omega}{R}\right)^2} \cos \varphi \cdot t \quad (4a)$$

túrinde jazamız. Fazalar ayırması φ [232-paragraftaǵı (9)-formula boyınsha]

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{L\omega}{R}$$

teńliginiń járdeminde anıqlanadı. Bunnan mınaday teńliklerge iye bolamız:

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{L\omega}{R}\right)^2}}$$

$\cos \varphi$ shamasınıń bul mánisin (4a) ǵa qoyıp, mınaday ańlatpanı tabamız:

$$Q = I_{ef}^2 R t. \quad (5)$$

Bunnan eger toqtıń effektivlik mánisin paydalanatuǵın bolsaq, onda berilgen omalıq qarsılıǵı bar ózgermeli toq shıńjırında bólinip shıǵatuǵın jıllılıqtıń muǵdarı Lenc-Djoul formulası menen ańlatılatuǵınlıǵı kelip shıǵadı (157-paragrafqa qarańız).

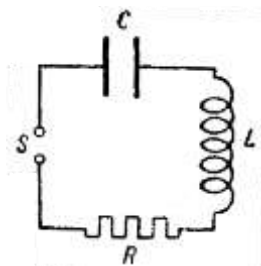
Demek, bólinip shıǵatuǵın jıllılıqtıń muǵdarı tek toqtıń effektivlik mánisi I_{ef} penen omalıq qarsılıq R diń járdeminde anıqlanadı eken. *Jıllılıqtıń bólinip shıǵıw processinde induktivlik qarsılıq $L\omega$ tikkeley orındı iyelemeydi.* Sonlıqtan onı geypara jaǵdaylarda vattsız qarsılıq dep te ataydı. Eger shıńjırda omalıq qarsılıǵı R júdá kishi bolsa, onda shıńjırda bólinip shıǵatuǵın jıllılıq ta az boladı; eger shıńjırda ózlik indukciyası úlken bolsa hám usı shıńjır arqalı ótetuǵın ózgermeli toqtıń jıyilıǵı ω úlken bolsa, onda ulıwmalıq qarsılıq bolǵan $z = \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}$ shamasınıń úlken bolıwı múmkin.

Ózgermeli toqtıń kúshin ólshew ushın jıllılıq ampermetrin paydalanıwǵa boladı (158-paragraf). Turaqlı toqqa graduırovkalanǵan jıllılıq ampermetri ózgermeli toq ushın toqtıń effektivlik kúshin beredi. Toq kúshiniń maksimalıq mánisi effektivlik kúsh boyınsha (3)-qatnastıń járdeminde anıqlanadı. Bul qatnas boyınsha $I_0 = I_{ef} \cdot \sqrt{2} \cong 1,41 I_{ef}$.

Ózgermeli toqlardı ólshewdiń basqa da usılları haqqında 237-paragraftı qarańız.

§ 234. Ózlik indukciyaǵa hám sıyımlıqqa iye ózgermeli toqtıń shıńjırı. Turaqlı toq shıńjırınan ózgermeli toq shıńjırınıń ayırması izbe-iz jalǵanǵan kondensatordıń bar bolıwınan ibarat.

Eger kondensatordıń astarların turaqlı toqtıń dereǵine tutastırsa, onda usı astarlarda derektiń e.q.kúshin kompensaciyalaytuǵın potencıallar ayırması payda bolaman deǵenshe shıńjırda toq ótedi. Eger kondensatordıń astarların ózgermeli e.q.kúshiniń dereǵine tutastırsa, onda astarlar úzliksiz túrde qaytadan zaryadlanadı hám shıńjırda barlıq waqıt ózgermeli toq ótedi.



307-súwret.

R omliq qarsılıǵına, L ózlik indukciyaǵa hám C sıyımlıǵına iye shınjır.

Meyli, S qısqışlarına (307-súwret) ózgermeli e.q.kúsh $\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \sin \omega t$ túsirilgen bolsın. SHınjır izbe-iz tutasqan C sıyımlıǵınan, L ózlik indukciyasınan hám R omliq qarsılıǵınan turǵan bolsın (ayırım ótkizgishlerdiń omliq qarsılıǵın esapqa almaymız). Konturdiń L ózlik indukciyaǵa iye bóliminde ózlik indukciyanıń e.q.kúshi $\mathcal{E}_{si} = -L \frac{dI}{dt}$ payda boladı. Bul teńlikte I - shınjırdaǵı toqtır kúshi. Konturda háreket etetuǵın tolıq e.q.kúsh $\mathcal{E} - L \frac{dI}{dt}$ shamasına teń boladı. Hár bir momentte onıń shaması shınjır boylap túsetuǵın potenciallyardıń qosındısına teń. Bul túsiw kondensatordıń astarlarındaǵı potencialdıń túsiwi $V = V_1 - V_2$ menen shınjırdıń omliq qarsılıǵı R bolǵan bólimine túsetuǵın IR shamasına teń potencialdıń qosındısınan turadı. Demek, mınaday teńlikke iye bolamız:

$$IR + V = \mathcal{E} - L \frac{dI}{dt}.$$

Bunnan $\mathcal{E}$ niń ornına onıń $\mathcal{E}_0 \sin \omega t$ mánisin qoyıp, mınanı alamız:

$$L \frac{dI}{dt} + IR + V = \mathcal{E}_0 \sin \omega t. \quad (1)$$

Kondensatordıń astarlarındaǵı potenciallyar ayırması V astarlarda toplanǵan Q zaryadı menen

$$Q = VC \quad (2)$$

qatnası boyınsha baylanısqan. Bul qatnasta C - kondensatordıń sıyımlıǵı. dt waqıtı ishinde Q zaryadı $dQ = Idt$ shamaǵa úlkeyedi. Bunnan (2)-qatnas tiykarında

$$I = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dV}{dt}$$

yamasa

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{C} I. \quad (3)$$

ańlatpalarına iye bolamız. (1)teńlikti waqıt boyınsha differenciallap, mınanı alamız:

$$L \frac{d^2 I}{dt^2} + R \frac{dI}{dt} + \frac{dV}{dt} = \mathcal{E}_0 \omega \cdot \cos \omega t.$$

Bul teńlikke dV/dt shamasınıń ornına onıń (3)-teńlik boyınsha mánisin qoyıp, izbe-iz tutastırılǵan sıyımlıqqa, ózlik indukciyaǵa hám qarsılıqqa iye bolǵan shınjırdaǵı toqtır kúshin qanaatlandıratuǵın differenciallıq teńleme ni tabamız:

$$L \frac{d^2 I}{dt^2} + R \frac{dI}{dt} + \frac{1}{C} I = \mathcal{E}_0 \omega \cdot \cos \omega t. \quad (4)$$

Bul teńlemenıń sheshimin dáwiri e.q.kústıń dáwirindey bolǵan waqıttıń dáwirli funkciyası túrinde izleybiz:

$$I = I_0 \sin(\omega t - \varphi). \quad (5)$$

Bul ańlatpada I_0 menen φ shamaları turaqlılar bolıp tabıladı hám bul turaqlılırdıń mánislerin anıqlawımız kerek. I den waqıt boyınsha birinshi hám ekinshi tártipli tuwındılardı alıp, mınaday teńliklerge iye bolamız:

$$\frac{dI}{dt} = I_0 \omega \cos(\omega t - \varphi), \quad \frac{d^2 I}{dt^2} = -I_0 \omega^2 \sin(\omega t - \varphi).$$

dI/dt menen $d^2 I/dt^2$ lerdiń mánislerin hám I di (4)-teńlemege qoyıp hám onıń oń hám shep táreplerin ω ǵa qısqartıp, mınaday ańlatpanı tabamız:

$$RI_0 = \cos(\omega t - \varphi) - \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right) I_0 \omega^2 \sin(\omega t - \varphi) \varepsilon_0 \cos \omega t. \quad (4a)$$

$\cos(\omega t - \varphi)$ penen $\sin(\omega t - \varphi)$ lardı ωt menen φ lerdiń sinusi hám kosinusi arqalı ańlatıp, mınanı alamız:

$$RI_0 \cos \omega t \cos \varphi + RI_0 \sin \omega t \sin \varphi - \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right) I_0 \sin \omega t \cos \varphi + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right) I_0 \cos \omega t \sin \varphi - \varepsilon_0 \cos \omega t = 0. \quad (5a)$$

Bul teńlik waqıttıń qálegen momenti ushın orınlanatuǵın bolǵanlıqtan, $\sin \omega t$ hám $\cos \omega t$ funkciyalarınń aldında turǵan kóbeytiwshilerdiń nolge teń bolıwı kerek. Bunnan tómendegidey eki teńlemeńi alamız:

$$R \sin \varphi - \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right) \cos \varphi = 0, \quad (6)$$

$$R \cos \varphi + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right) \sin \varphi = \frac{\varepsilon_0}{I_0}, \quad (7)$$

(6)-teńlemeden mınanı alamız:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R}. \quad (8)$$

(6)- hám (7)-teńliklerdi aǵzama-aǵza kvadratqa kóterip hám olardı qosıp

$$R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2 = \frac{\varepsilon_0^2}{I_0^2}$$

teńligin alamız hám bunnan

$$I_0 = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}}. \quad (9)$$

formulasına iye bolamız.

(5)-, (8)- hám (9)-teńlikler biz izlegen sheshimdi beredi: shıńjırǵa tutastırılǵan e.q.kúshi qanday jiyilikke iye bolatuǵın bolsa, shıńjırda tap sonday jiyiliktegi I toǵı ótedi; bul toqtırń amplitudası I_0 (9)-ańlatpanıń járdeminde anıqlanadı. I toǵı fazası boyınsha e.q.kúshi ε den (8)-teńlik boyınsha anıqlanatuǵın φ múyeshine awısqa.

$z = \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}$ shaması tolıq qarsılıq xarakterine iye (impedans), onıń mánisi R, L, C shamalarınan hám toqtırń jiyiligi ω dan ǵárezli. Sonıń menen birge

$$L\omega - \frac{1}{C\omega} = 0 \quad (10)$$

teńligin qanaatlandıratuǵın ω nıń mánisinde qarsılıq minimumǵa jetedi; bunday jiyilikte toq kúshiniń amplitudası maksimumlıq mániske jetedi:

$$I_{0max} = \frac{\varepsilon_0}{R}.$$

Ózgermeli toqtırń sıyımlıqqa hám ózlik indukciyaǵa iye bolǵan shıńjır arqalı ótiwi menen baylanıslı bolǵan barlıq qubılıslar mexanikalıq rezonans qubılısın eske túsiredi: toq kúshiniń amplitudası jiyilik ω dan ǵárezli hám *rezonanslıq jiyilik* dep atalatuǵın bazı bir ω_{rez} mánisinde maksimumǵa jetedi. Onıń mánisi (10)-ańlatpa boyınsha mınaǵan teń:

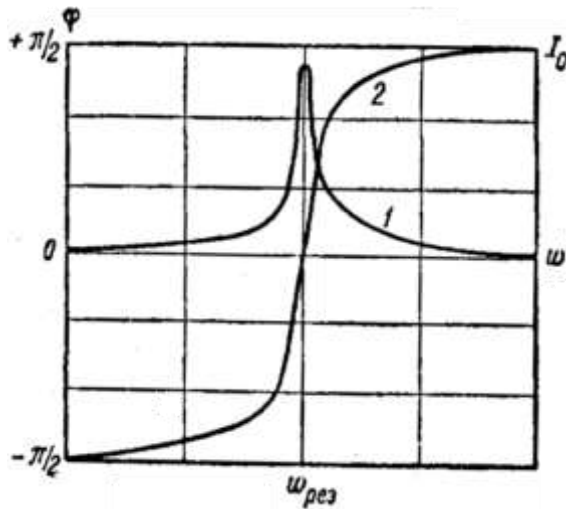
$$\omega_{rez} = \sqrt{\frac{1}{LC}}. \quad (10a)$$

Omliq qarsılıq R qansha kishi bolsa, rezonanslıq iymeklik ótkir ushqa iye boladı.

(8)-formula boyınsha rezonansda fazalar ayırması $\varphi = 0$ shamasına teń.

$\omega \rightarrow 0$ sheginde fazalar ayırması ushın $\varphi \rightarrow -\pi/2$ shamasın alamız, yaǵnıy toq e.q.kúshten

ozadı; $\omega \rightarrow \infty$ sheginde fazalar ayırması $\varphi \rightarrow +\pi/2$; bul jaǵdayda toq e.q.kúshten artta qaladı. 308-súwrette 1 iymekligi berilgen e.q.kúshinde hám turaqlı L menen C daǵı toqtırn kúshiniń jiyilikke baylanıslı ózgerisi; 2 iymekligi φ diń jiyilikten ǵárezligi kórsetilgen.



308-súwret.
Toq kúshiniń (1) hám fazalardıń ayırmasınıń
(2) jiyilikten ǵárezligi.

Eger kondensatordı ótkizgishtiń uchastkası menen almastırsaq, onda shınjırda qosımsha $V = \frac{Q}{C}$ potenciallar ayırması payda bolmaydı. Demek, kondensatordı ótkizgish penen almasıw $C = \infty$ teńliginiń orın alıwına alıp keledi hám bunday jaǵdayda (8)- hám (9)- formulalar ózlik indukciyası menen qarsılıǵı bar, biraq kondensatorsız shınjırǵa tiyisli bolǵan 232-paragraftaǵı (9)-xam (10)-formulalarǵa ótedi.

ω nıń ózgeriwi menen toqtırn kúshi menen bir waqıtta ózgermeli toq shınjırınıń hár bir uchastkasına túsetuǵın potencialdıń shaması da ózgeredi. 307-súwrette keltirilgen shınjırda R omliq qarsılıǵı, L ózlik indukciyası hám C sıymlıǵı izbe-iz tutasqan. SHınjırdıń usı uchastkalarınıń hár biriniń ushlarındaǵı V_R, V_L ham V_C arqalı belgilep, shınjırdaǵı potencialdıń tolıq túsiwin alamız. SHınjırda háreket etetuǵın e.q.kúshke sáykes keletuǵın onıń shamasın bılayınsha kórsetiw múmkin:

$$\mathcal{E}_0 \sin \omega t = V_R + V_L + V_C.$$

234-paragrafta ayılǵan boyınsha

$$\left. \begin{aligned} V_R &= IR = RI_0 \sin(\omega t - \varphi), \\ V_L &= L \frac{dI}{dt} = L\omega I_0 \cos(\omega t - \varphi) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

yamasa

$$V_L = L\omega I_0 \sin(\omega t - \varphi + \pi/2) \quad (12)$$

teńliklerine iye bolamız.

Kondensatordıń astarlarındaǵı potenciallar ayırmasın anıqlaw ushın shınjırda omliq qarsılıq penen ózlik indukciya bolmaytuǵın jaǵdayda qaraymız ($R = 0$ hám $L = 0$). Bunday jaǵdayda (9)-formula mınanı beredi:

$$I_0 = \frac{\mathcal{E}_0}{1/C\omega}.$$

Bul qatnastan kondensatordıń $1/C\omega$ shamasına teń omliq qarsılıqqa ekvivalent ekenligi kórinedi. Bunday jaǵdayda (8) boyınsha $\operatorname{tg} \varphi = -\infty$ hám, demek, $\varphi = -\pi/2$, yaǵnıy toq e.q.kúshten $\pi/2$ shamasına *alda júredi*. Bunnan kondensatordıń astarlarında potenciallar ayırmasınıń amplitudalıq mánisiniń $\frac{1}{C\omega} I_0$ shamasına teń ekenligi kelip shıǵadı. Waqıttırn hár bir momentinde potenciallar ayırmasınıń shaması toqtırn kúshiniń shamasınan $\pi/2$ shamasına *artta* qaladı. Solay etip, V_C ushın biz mınanı jaza alamız:

$$V_C = \frac{1}{C\omega} I_0 \sin(\omega t - \varphi - \pi/2).$$

Bul teńlikti bılayınsha da jazıwǵa boladı:

$$V_C = -\frac{1}{C\omega} I_0 \sin(\omega t - \varphi + \pi/2). \quad (13)$$

(11)-, (12)- hám (13)-ańlatpalardı qosıp, mınaday teńlikke iye bolamız:

$$\mathcal{E}_0 \sin \omega t = RI_0 \sin(\omega t - \varphi) + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right) I_0 \sin(\omega t - \varphi + \pi/2). \quad (14)$$

Rezonansta, yaǵnıy toq kúshiniń amplitudası maksimumǵa jetkende mınaday teńlikler orınlı boladı.

$$\omega = \omega_{rez} = \sqrt{\frac{1}{LC}}, \varphi = 0.$$

Bul sharayatta (14)-formula mınanı beredi:

$$\mathcal{E}_0 \sin \omega t = RI_{0max} \cdot \sin \omega t.$$

Demek, shınjırdaǵı potencialdıń túsiwi omliq qarsılıq R ge túsken potencialǵa sáykes keledi. Usınıń bir waqıtta potenciallardıń V_L hám V_C túsiwi maksimalıq mánisine jetedi:

$$\mathcal{E}_{0L} = L\omega_{rez} \cdot I_{0max} = \frac{\mathcal{E}_0}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

hám

$$\mathcal{E}_{0S} = \frac{1}{S\omega_{rez}} \cdot I_{0max} = \frac{\mathcal{E}_0}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Biraq potenciallardıń túsiwiniń ekewi de qarama-qarsı fazada ózgeredi, sonlıqtan olardıń qosındısı nolge teń.

Biz qarap ótken qubılıs *kernewler rezonansı* dep ataladı.

Ózgermeli toq shınjırındaǵı kondensatordıń tutqan ornın anıqlaw ushın sıyımlıǵı 1 mkf bolǵan kondensatordıń bir sekunda 50 dáwirge iye toq ótken jaǵdayda qansha omǵa ekvivalent ekenligin esaplaymız.

Joqarıda ayılǵanlardan sıyımlıǵı C shamasına teń kondensator arqalı cikllıq jiyiligi ω ǵa teń toq ótkende usı kondensatordıń $R = \frac{1}{C\omega}$ qarsılıǵına ekvivalent ekenligi kelip shıǵadı. Bul jaǵdayda sıyımlıqtı faradaǵa ótkerip hám cikllıq jiyiliktiń $\omega = 2\pi\nu = 314 \text{ sek}^{-1}$ shamasına teń ekenligin esapqa alıp, mınanı alamız:

$$R = \frac{1}{C\omega} = \frac{1}{314 \cdot 10^{-6}} \text{ om} \cong 3200 \text{ om}.$$

Ózgermeli toqtıń úlken jiyiliginde tap sol kondensator kishi omliq qarsılıqqa ekvivalent.

232-paragrafta ózlik indukciyası bar shınjır ushın paydalanǵanday, sıyımlıq penen ózlik indukciya bar bolǵan shınjırdaǵı qubılıslardı vektorlıq diagrammanıń járdeminde kórsetiwge boladı. Onıń ushın (4a) teńlemenı

$$RI_0 \sin\left(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2}\right) - I_0 \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right) \sin(\omega t - \varphi) = \mathcal{E}_0 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

túrinde jazamız. Áhmiyetke baslanǵısh fazalar emes, al fazalar ayırması iye bolǵanlıqtan, bul teńlikti mınaday teńlik penen almasırwǵa boladı:

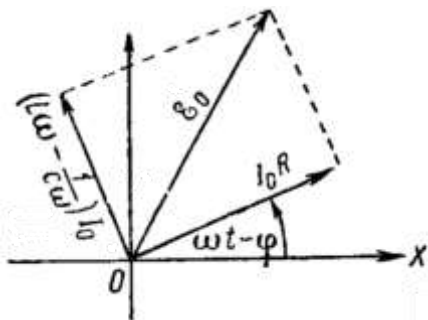
$$RI_0 \sin(\omega t - \varphi) + I_0 \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right) \sin\left(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2}\right) = \mathcal{E}_0 \sin \omega t. \quad (15)$$

Bul teńliktiń shep tárepindegi eki aǵzanı bir birine perpendikulyar bolǵan hám amplitudaları RI_0 hám $I_0 \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)$ shamalarına teń, OX kósheri menen sáykes $\omega t - \varphi$ hám $\omega t - \varphi + \pi/2$

múyeshlerin jasyatúgún vektorlar túrinde kórsetiwge boladı (309-súwret). Qosındı amplituda uzınlıgı $\mathcal{E}_0$ bolğan vektor menen súwretlenedi hám onıń shaması mınaday teńliktiń járdeminde anıqlanadı:

$$\mathcal{E}_0^2 = R^2 I_0^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega} \right)^2 I_0^2.$$

Bunnan (9)-formula kelip shıgadı. $\mathcal{E}_0$ vektorı menen $I_0 R$ vektorınıń arasındaǵı múyeshtiń φ ge teń ekenligin ańsat kóriwge boladı.



309-súwret.

Ózlik indukciya hám sıyımlıq bar ózgermeli toq shınjırı ushın vektorlıq diagramma.

Eger I tomdaǵı 105-paragrafta kórsetilgen garmonikalıq processlerdi kompleksli sanlardıń járdeminde táriyiplew usılın paydalanatúgún bolsaq, onda (4)-teńlemenıń sheshimin ańsat alıwǵa boladı (4)-teńlemedegi $\cos \omega t$ funkciyasın kompleksli dáreje kórsetkishli bar kórsetkishli funkciya menen ańǵartıp mınaday teńlemenı alamız:

$$L \frac{d^2 I}{dt^2} + R \frac{dI}{dt} + \frac{1}{C} I = \mathcal{E}_0 \omega e^{i\omega t}. \quad (16)$$

Bul teńlemenıń dara sheshimin

$$I = I_0 e^{i(\omega t + \alpha)} \quad (17)$$

túrinde izleybiz. Bul ańlatpada I_0 hám α arqalı anıqlanıwı kerek zatlıq sanlar belgilengen. (17)-ańlatpanı differenciallap, mınaday teńliklerdi alamız:

$$\frac{dI}{dt} = i I_0 \omega e^{i(\omega t + \alpha)}, \quad \frac{d^2 I}{dt^2} = -I_0 \omega^2 e^{i(\omega t + \alpha)}.$$

dI/dt hám $d^2 I/dt^2$ shamaların (16) ǵa qoysaq, mınaday algebralıq teńlemenı alamız:

$$-L I_0 \omega^2 e^{i(\omega t + \alpha)} + i R I_0 \omega e^{i(\omega t + \alpha)} + \frac{1}{C} I_0 \omega e^{i(\omega t + \alpha)} = \mathcal{E}_0 \omega e^{i\omega t}. \quad (18)$$

Bul teńlemenıń oń hám shep táreplerin $I_0 \omega e^{i(\omega t + \alpha)}$ kóbeytiwshisine bólip

$$-L\omega + \frac{1}{C\omega} + iR = \frac{\mathcal{E}_0}{I_0} e^{-i\alpha}$$

túrindegi teńlemege iye bolamız. $e^{-i\alpha}$ nı $\cos \alpha - i \sin \alpha$ menen almasırsaq

$$-L\omega + \frac{1}{C\omega} + iR = \frac{\mathcal{E}_0}{I_0} \cos \alpha - i \frac{\mathcal{E}_0}{I_0} \sin \alpha \quad (19)$$

túrindegi teńleme kelip shıgadı. Eger eki kompleksli sannıń zatlıq hám jormal bólimleri bir birine teń bolsa, onda usı kompleksli sanlardıń bir birine teń ekenligi belgili. Sonlıqtan (19) dan mınaday nátiye kelip shıgadı:

$$-L\omega + \frac{1}{C\omega} = \frac{\mathcal{E}_0}{I_0} \cos \alpha, \quad R = -\frac{\mathcal{E}_0}{I_0} \sin \alpha. \quad (20)$$

Tul teńliklerdiń ekinshisi birinshisine aǵzama-aǵza bólsek, mınanı alamız:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{R}{L\omega - \frac{1}{C\omega}}. \quad (21)$$

(20)-teńlikti kvadratqa kóterip qossaq

$$I_0 = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}} \quad (22)$$

ańlatpasın tabamız.

(17)-, (21)- hám (22)-ańlatpalar biz izlegen sheshimler bolıp tabıladı. Bul sheshimlerdiń usı paragraftaǵı tiykargı tekstte berilgen (4)-teńlemenıń sheshimine sáykes keletuǵınlıǵın ańsat kóriwge boladı. Haqıyqatında da, (17)-ańlatpanıń zatlıq bólimi mınanı beredi:

$$I = I_0 \cos(\omega t + \alpha)$$

yamasa

$$I = I_0 \sin\left(\omega t + \alpha + \frac{\pi}{2}\right).$$

Bunnan keyin

$$\alpha + \frac{\pi}{2} = -\varphi,$$

teńligi orınlı dep bolıp, mınaǵan iye bolamız:

$$I = I_0 \sin(\omega t - \varphi).$$

Bul ańlatpa bolsa (5)-formulaǵa sáykes cikllıq jıyılıǵı ω hám amplitudası I_0 bolǵan sinusoida boyınsha ózgeretuǵın toqtı beredi. I_0 amplitudası (9)-formula menen sáykes keletuǵın (22)-formulanıń járdeminde anıqlanadı. Endi eki usıldıń járdeminde fazalardıń awısıwı ushın da bir mánisti alatuǵınlıǵımızdı kórsetiw qaldı. Haqıyqatında da, (21)-ańlatpa boyınsha (8)-ańlatpa menen sáykes keletuǵın

$$\operatorname{tg} \varphi = -\operatorname{tg}\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right) = \operatorname{ctg} \alpha = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R}$$

teńligine iye bolamız.

Ózgermeli toq shıńırında júzege keletuǵın processlerdi grafikalıq súwretlew ushın kompleksli shamalardan zatlıq shamalarǵa ótiwdiń zárúrliǵı joq. Onıń ushın kompleksli $ae^{i\alpha}$ shamasına uzınlıǵı a bolǵan hám berilgen kósher menen α múyeshin jasaytuǵın vektordı sáykes keltiriw hám bunday jaǵdayda jormal birlik i ge kóbeytiwdiń tuwrı múyeshke burıwǵa sáykes keletuǵınlıǵın ańǵarıw kerek. Haqıyqatında da: $iae^{i\alpha} = e^{i\frac{\pi}{2}} ae^{i\alpha} = ae^{i(\alpha+\frac{\pi}{2})}$. Bunnan $i^2 = -1$ shamasına kóbeytiwdiń π múyeshine burıwǵa sáykes keletuǵınlıǵın esapqa alamız. Bul eskertiwlerdi názerde tutıp, (18)-teńlikti bilayınsha qaytadan jazamız:

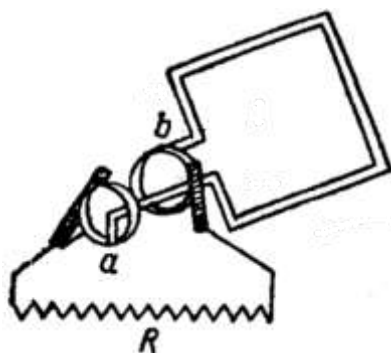
$$\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right) I_0 e^{i(\omega t + \alpha + \pi)} + R I_0 e^{i(\omega t + \alpha + \pi/2)} = \varepsilon_0 e^{i\omega t}.$$

Usınıń menen birge α nı $-\varphi - \frac{\pi}{2}$ arqalı almasıwı, mınaǵan iye bolamız:

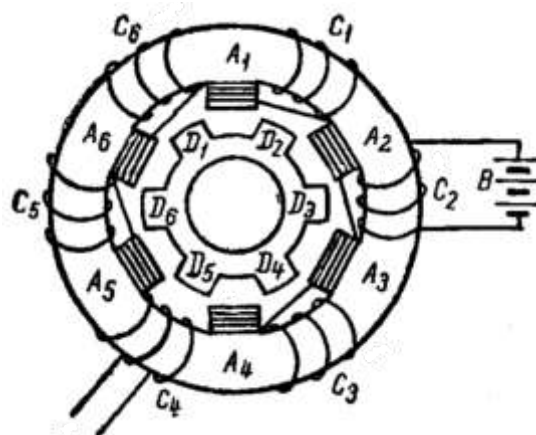
$$\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right) I_0 e^{i(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2})} + R I_0 e^{i(\omega t - \varphi)} = \varepsilon_0 e^{i\omega t}.$$

Bul ańlatpa uzınlıqları menen baǵıtları 309-súwretke sáykes keletuǵın úsh vektordı bir biri menen baylanıstıradı.

§ 235. Dinamomashinalar menen elektromotorlar. Dinamomashinalar (yamasa generatorlar) elektromagnit indukciya qubılısın paydalanıw jolı menen toqlardı alıw ushın xızmet etetuǵın mashinalar bolıp tabıladı. Ózgermeli toqtıń eń ápiwayı dinamomashinası sıpatında turaqlı magnittiń maydanında aylanatuǵın ótkizgishtiń bir oramına iye ramka xızmet ete aladı. Usınday ramkadaǵı ózgermeli toqtıń payda bolıwı 224-paragrafta tallandı. 310-súwrette eki saqıynanı hám a menen b ıetkanı paydalanıw jolı menen toqtı aylanatuǵın ramkadan shıńırdań sırtqı R bólimine qalayınsha alıp beriwdiń múmkinshiligi kórsetilgen. Álbette, ámelde bir ramkadan paydalanbaydı, al barabanǵa (rotorga) oralǵan kóp sanlı ótkizgish sımnan paydalanadı. Texnikada qozǵalmaytuǵın oramlar menen turaqlı magnittiń ornına elektromagnitlerden de paydalanadı. Usınday mashinanıń sxeması 311-súwrette kórsetilgen. Toq indukciyalanatuǵın katushkalar temir ózektiń shıǵıp turǵan $A_1, A_2, A_3, \dots$ orınlarına oraw jolı menen alınadı. Ózek sırtqı B dereginen $C_1, C_2, C_3, \dots$ oramları arqalı ótetuǵın toq penen magnitlenedi. Mashinanıń aylanatuǵın bólimi (rotor) $D_1, D_2, D_3, \dots$ tislari bar saqıyna túrine iye. Rotordı aylındırǵanda tislir shıǵıp turǵan $A_1, A_2, A_3, \dots$ orınlarına salıstırǵanda qozǵaladı hám usınday jollar menen qońsılás shıǵıp turǵan orınlarda magnitlik shıńırdań azlı-kópı tuyıqlaydı. Usınıń nátiyjesinde $A_1, A_2, A_3, \dots$ orınlarına oralǵan katushkalarda magnit indukciyasınıń aǵısı ózgeredi hám olardı toq indukciyalanadı.



310-сүwрет. Айланатуғын рамкadan тоқты a һәм b сақылнарынның јәрдемнде алу.

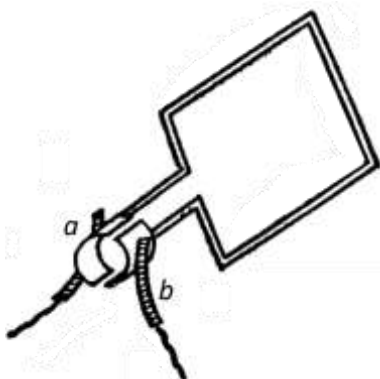


311-сүwрет. Қозғалмайтуғын орамларға ие өзгөрмели тоқ генераторының схемасы.

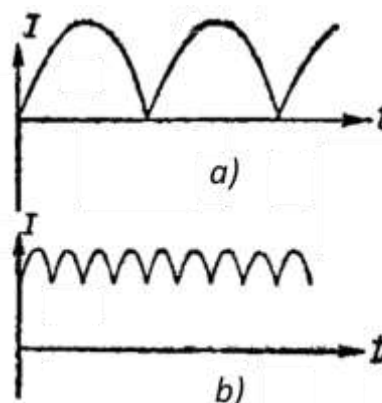
Joqarıda kórsetilgen ózgermeli toq generatorları menen bir qatarda turaqlı toq generatorların da soǵıwǵa boladı. Eger aylanatuǵın ramkanıń ushların bir birinen izolyaciyalanǵan eki yarım saqıyna (kollektor) menen tutastırsaq (312-сүwрет), onda a һәм b ұетkaları birinshi һәм ekinshi yarım saqıynaǵa gezekpe-gezek tiyedi һәм sırtqı shınjırdaǵı toq tek óziniń kúshin ózǵertip, barlıq waqıtta bir baǵıtta ótedi. 313a сүwrette usınday I toǵınıń waqıttan ǵárezligi kórsetilgen. Bir ramkanıń ornına ushları quramalı kollektordıń ayırım sekciyalarına tutastırılǵan oramlardıń sistemasın paydalanıp kúshi waqıtqa baylanıslı azmaz pulsaciyalanatuǵın turaqlı toqtı alıwǵa boladı (313-b сүwрет). Ólshemlerin ádewir úlken bolǵan turaqlı toqtıń dinamomashinalarındaǵı magnit maydanı elektromagnit tárepinen payda etiledi. Bunday jaǵdayda *óz-ózinен qozıw principі* paydalanıladı. Bul princip boyınsha elektromagnit toq penen dinamomashınanıń ózi tárepinen támiyinlenedi. Elektromagnitti toq penen támiyinlewdiń tiykarǵı eki tipi bar: 1) izbe-iz һәм 2) parallel.

Izbe-iz qozıw mashinalarında elektromagnittiń oramları sırtqı shınjır menen izbe-iz tutastırılǵan (314-сүwрет). Bunday mashina elektromagnittiń ózeginiń qaldıq magnitleniwiniń esabınan jumıs isley baslaydı, bunnan keyin onda payda bolǵan toq tolıǵı menen M elektromagnitiniń oramları arqalı ótedi һәм ishinde rotor aylanatuǵın magnit maydanınıń kúsheyiwine alıp keledi. Sırtqı shınjırda ajratqanda bunday mashınanıń e.q.kúshi qaldıq magnitleniw menen baylanıslı bolǵan kishi mániske shekem tómenleydi.

Parallel qozdırıwǵa iye mashinalarda (shuntlı mashinalar) elektromagnittiń oramları sırtqı shınjır menen parallel tutastırılǵan (315-сүwрет). Oramlardaǵı toqtıń kúshi C reostatınıń јәрдемнде ózǵertiledi. SHuntlı mashinalar keń túrde tarqalǵan. Aralas qozdırıwǵa iye mashinalar da paydalanıladı: olar eki oramǵa iye, olardıń biri sırtqı shınjır menen izbe-iz, al ekinshisi parallel tutastırılǵan.



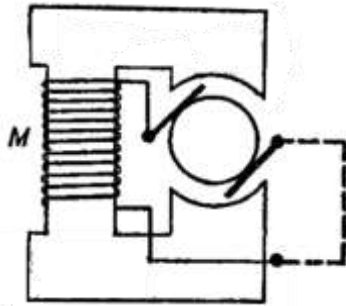
312-сүwрет. Тuraqlı toq generatorының kollektorының схемасы.



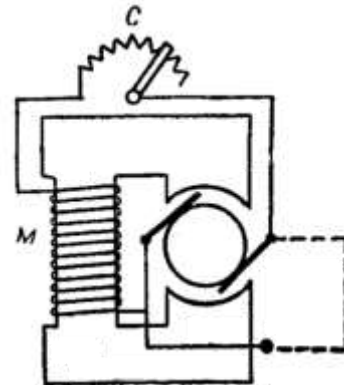
313-сүwрет. Тоқ кúshiniń waqıttan ǵárezligi. a - eki yarım saqıynaǵa iye generator ushin, b - quramalı kollektori bar generator ushin.

Turaqlı toqtıń qálegen dinamomashınasın elektrodvigatelge aylandırwǵa boladı: onıń ushın rotorǵa ұetka arqalı basqa derekten toqtı jiberiw kerek. Bunday jaǵdayda rotordıń oramları arqalı ótetuǵın toq

penen magnet maydanınıń arasıdaǵı óz-ara tásirlesiwdiń saldarınan rotor aylanısqa keledi.



314-súwret. Izbe-iz qozıwǵa iye dinamomashınanıń sxeması.



315-súwret. Parallel qozıwǵa iye dinamomashınanıń sxeması.

Is júzinde háreket etetuǵın elektromotor birinshi ret B.S.YAkobi tárepinen Rosciyada soǵıldı hám Neva dáryasındaǵı kemeniń qozǵalıwı ushın qollanıldı.

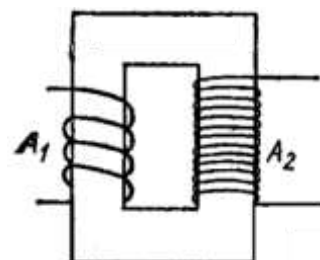
Elektromotordıń rotorı aylanǵanda onıń oramlarında aylanıwǵa alıp kelgen toqtıń baǵıtına keri baǵıtlanǵan toq indukciyalanadı. Sonlıqtan, sırtqı derektiń tásirinde rotordıń oramları arqalı ótetuǵın toqtıń shaması kemeyedi. Eger sırtqı e.q.kúshi elektromotordıń aylanıwında zárurli bolǵan kúshti uslap turıwı ushın jetkilikli bolsa, onda baslanǵısh momentte elektromotordı iske qosqandaǵı toqtıń shamasınıń júdá úlken bolıwı hám, sonlıqtan, rotordıń oramlarınıń janıp ketiwi múmkin. Usınday jaǵdaydan qutılıw ushın motor menen izbe-iz reostat tutastırıladı. Onı *iske qosıw reostatı* dep ataydı.

Házirgi waqıtlardaǵı dinamomashınalar menen elektromotorlar júdá joqarı paydalı tásir koefficientine iye mashınalar bolıp tabıladı. Úlken mashınalar ushın p.t.k. niń shaması 95 procentke jetedi. Qashıp qutılıwǵa bolmaytuǵın súykeliske, lenc-djoul jıllılıǵı, Fuko toqları hám gisterezis penen baylanıslı bolǵan joǵaltıwlardıń shamasın 5 procentke shekem kemeytiw múmkin.

§ 236. Transformatorlar. Kóp sanlı texnikalıq hám laboratoriyalıq maqsetler ushın dinamomashınalar beretuǵın e.q.kúshlerine salıstırǵanda ádewir joqarı bolǵan e.q.kúshleri kerek boladı. Texnikada elektr energiyasın bir orınnan ekinshi orınǵa uzın sımardıń járdeminde alıp beriw ushın (geypara jaǵdaylarda paydalanıwshınıń elektrostanciyadan júzlegen kilometr qashıqlıqta jaylasqan bolıwı múmkin). Bul jaǵdayda másele sonnan ibarat, shınjırda islep shıǵılǵan tolıq quwat e.q.kúshiniń toqtıń kúshine kóbeymesi bolǵan $\mathcal{E}I$ shamasına teń. Bunnan e.q.kúsh $\mathcal{E}$ qansha joqarı bolsa, sol quwattıǵı toqtıń kúshi I sonshama kishi boladı. Alıp beretuǵın sımardaǵı energiyanıń joǵalıwı $Q = RI^2$ shamasına teń, yaǵnıy toqtıń kúshi qansha úlken bolsa, joǵalıw da úlken boladı. Sonlıqtan, zıyanlı joǵaltıwlar kishireytiw ushın úlken e.q.kúshi hám kishi toq kúshi menen is alıp barıw kerek.

Ózgermeli toqlar bolǵan jaǵdayda e.q.kúshin (texnikada "kernew" dep ataydı) joqarılatıwshı transformatorlardıń járdeminde ańsat joqarılatıwǵa boladı. Transformatorlar birinshi ret rus elektrotehnikleri P.N.YAblochkov (1876-j.) hám I.F.Usagin (1882-jıl) tárepinen birinshi ret kontrukciyalandı hám is júzine engizildi. Eń ápiwayı túrde transformator (316-súwret) ulıwmalıq tuyıq temir ózekke oralǵan eki katushkadan turadı. Birinshi katushka A_1 juwan sımnan turadı hám oramlardıń sanı az, ekinshi katushka A_2 jińishke sımnan hám kóp sanlı oramlardan turadı. A_1 oramı arqalı ótetuǵın birinshi toq magnet indukciyasınıń ózgermeli Φ aǵsın payda etedi. Bul aǵıs ózektiń ishinde derlik tolıǵı menen toplanǵan hám, demek, tolıǵı menen ekinshi katushkanıń oramları arqalı ótedi.

316-súwret.
Transformator.



Ekinshi katushka tuyıqlanbaǵan jaǵdayda birinshi katushka bazı bir omliq hám induktivlik qarsılıqqa iye bolǵan shıńjırdıń bólimi bolıp tabıladı. Eger omliq qarsılıqtı kishikene dep esaplasaq, onda onıń tutqan ornın esapqa almawǵa boladı. Bunnan birinshi katushkadaǵı $\mathcal{E}_1$ e.q.kúshi san mánisi boyınsha onda payda bolǵan ózlik indukciyanıń e.q.kúshi $\mathcal{E}_{si}$ ge teń, al baǵıtı boyınsha qarama-qarsı:

$$\mathcal{E}_1 = -\mathcal{E}_{si}.$$

Birinshi katushkanıń hár bir oramında $-\frac{d\Phi}{dt}$ shamasına teń ózlik indukciyanıń e.q.kúshi payda boladı. Bunnan

$$\mathcal{E}_{si} = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}.$$

Bul teńlikte N_1 arqalı birinshi katushkanıń oramlar sına belgilengen. Bunnan birinshi katushkadaǵı háreket etetuǵın $\mathcal{E}_1$ e.q.kúshi ushın mınanı alamız:

$$\mathcal{E}_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (1)$$

Tap sol aǵıs Φ ekinshi katushka arqalı da ótetuǵın bolǵanlıqtan, onda onıń hár bir oramında $-\frac{d\Phi}{dt}$ shamasına teń indukciyanıń e.q.kúshi payda boladı. Ekinshi katushkada payda bolǵan barlıq e.q.kúshtiń shaması:

$$\mathcal{E}_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (2)$$

Bul teńliktegi N_2 - ekinshi katushkadaǵı oramlar sanı. (1)- hám (2)-ańlatpalardı salıstırıp, ekinshi katushkadaǵı payda bolǵan e.q.kúshiniń mınaǵan teń bolatuǵınlıǵın kóremiz:

$$\mathcal{E}_2 = -\frac{N_2}{N_1} \mathcal{E}_1. \quad (3)$$

Solay etip, transformator e.q.kúshti ekinshi katushkadaǵı oramlar sanınıń birinshi katushkadaǵı ormalardıń sanına qatnası ese joqarılatadı eken. Minus belgisi birinshi hám ekinshi katushkalardaǵı e.q.kúshileriniń fazaları boyınsha qarama-qarsı ekenligin kórsetedi.

Ádette transformatordaǵı ekinshi katushka tuyıqlanbaǵan bolsa, birinshi katushkanıń ózlik indukciya koefficienti úlken boladı. Bul birinshi katushkanıń induktivlik qarsılıǵınıń úlken bolıwına alıp keledi. Usınıń nátiyjesinde ekinshi katushka tuyıqlanbaǵan jaǵdayda birinshi katushkadaǵı I_1 toǵı ázzi. Bul toqtıń mánisi *bos toq* dep ataladı. Ekinshi katushkanı tuyıqlaǵanda onda magnit maydanın payda etetuǵın toq indukciyalanadı. Al, bul magnit maydanı, Lenc qaǵıydası boyınsha, birinshi katushkanıń payda etken magnit maydanın kompensaciyalaydı. Bul birinshi katushkanıń induktivlik qarsılıǵınıń kishireyiwine hám I_1 toǵınıń úlkeyiwine alıp keledi. Solay etip, birinshi shıńjırda paydalanılatuǵın quwat ekinshi shıńjırda alınatuǵın quwattan gárezli eken.

Ekinshi shıńjır hárekette bolǵan jaǵdayda (3)-teńlik durıs bolıwdan qaladı. Birinshi shıńjırdaǵı toqtıń shaması bos toqtıń shamasınan kúshli ayırmaǵa iye bolmaǵan jaǵdayda (3)-teńlik jaqsı orınlanadı. Ózektiń gisterezisiniń tutqan ornın esapqa alatuǵın transformatordıń ulıwmalıq teoriyası júdá quramalı.

Transformatordaǵı zıyanlı joǵaltıwlar katushkalardaǵı lenc-djoule jıllılıǵınıń bólinip shıǵıwı, magnit indukciyası sızılqarınıń sırtqa shıǵıwı, ózektegi Fuko toqları hám ózektiń gisterezisiniń bolıwına baylanıslı qaytadan magnitleniw menen baylanıslı.

Sońǵı sebeptiń tutqan ornın kishireytiw ushın transformatorlardıń ózeklerin temirdiń eń jumsaq sortlarınan, sonıń menen birge izolyaciyalıq qatlamlar menen izolyaciyalangan juqa temirdiń ayırım jolaqlarınan soǵadı. Házirgi waqıtlardaǵı úlken transformatorlarda joǵaltıwlar ulıwma quwatıń 2 procentine shekem tómendetiwdiń sáti túsedı. Sonlıqtan, olardıń paydalı tásir koefficienti 98 procentke jetedi.

Bunday transformatorlardaǵı birinshi hám ekinshi shıńjırlarda islep shıǵılǵan quwatlar ushın mınanı alamız:

$$\mathcal{E}_1 I_1 = \mathcal{E}_2 I_2.$$

Bunnan (3)-qatnas boyınsha

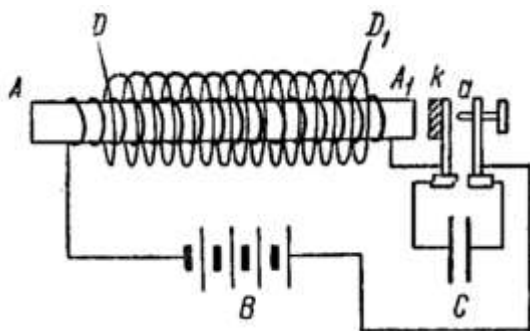
$$I_2 = \frac{N_1}{N_2} I_1 \quad (4)$$

qatnasına iye bolamız. Solay etip, birinshi hám ekinshi shıńjırlardaǵı toqlardıń kúshi birinshi hám ekinshi

katushkalardağı oramlardıń sanına kerı proporcional eken.

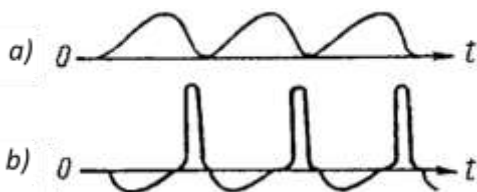
Joqarılatıwshı bolıp isleytuǵın qálegen transformatordı tómenletiwshi transformator túrinde paydalanıwǵa boladı. Onıń ushın birinshi toqtı oramlardıń sanı úlken bolǵan katushka arqalı ótkeriw kerek. Bunday jaǵdayda ekinshi katushkada toqtıń kúshi úlken, al e.q.kúshtiń shaması birinshi katushkadaǵı salıstırǵanda kishi boladı. Ádette stanciyadan alıp beriletuǵın "joqarı" kernewge iye toq paydalanıwshıda qaytadan tómenletiwshi transformatordıń járdeminde tómengi "kernewge" shekem tómenletiledi.

Joqarıda kórsetilgen texnikalıq qollanıwları menen bir qatarda, transformatorlar laboratoriyalıq texnikada keńnen qollanıwmaqta (joqarılatatuǵınlar da, tómenletetuǵınlar da). Qoyılatuǵın talaplarǵa baylanıslı laboratoriyalıq transformatorlarǵa hár qıylı konstrukciyalar beriledi. Úlken bolmaǵan quwatlarda joqarı e.q.kúshlerin alıw ushın indukciyalıq katushka dep atalatuǵın dúzilislerden paydalanadı. Ol ulıwmalıq tuyıqlanbaǵın temir ózekke iye eki cilindrlik solenoidlardan turadı (317-súwret). Birinshi katushkanıń xızmetin ishki AA_1 solenoid atqaradı. Bul katushka juwan sımardan soǵıladı hám oramlardıń sanı az. Ekinshi katushka xızmetin sırtqı solenoid DD_1 atqaradı, onıń oramlarınıń sanı kóp hám onı júdá jıńışke sımnan soǵadı. Ádette, birinshi katushkanıń ushlarına turaqlı toq dereginen (mısalı B batareyalar akkumulyatorınan) e.q.kúshi túsiriledi. Birinshi katushkanıń ózgermeli magnit maydanın payda etiwı ushın ondaǵı toqtı dáwirli túrde ajratadı hám tuyıqlaydı. Ajratıw menen tuyıqlawdı anaw yamasa mınaw konstrukciyadaǵı avtomat ajratqıstıń járdeminde ámelge asıradı. Eń ápiwayı ajratqısh temir k sapqa iye prujınaǵa bekitilgen kishkene balǵadan turadı (317-súwret). Toq birinshi katushka arqalı óte baslaǵanda onıń ózeǵı magnitlenedi hám ózine prujınanı tartadı. Nátiyjede shıńjır prujına k menen a shtiftiń arasında ajratıladı. Kontakt ajratılǵanda intensivli ushqınıń shıqpawı ushın k menen a nıń arasına C kondensatorı tutastırıladı. Bunday jaǵdayda ajratıwda B batareyasınan toq kondensatordı zaryadlaw ushın ketedi hám ushqın payda bolmaydı.



317-súwret.
Indukciyalıq katushka.

Birinshi katushkadaǵı balǵa yamasa basqa mexanikalıq dúzilistiń járdeminde ajratılatuǵın toq sinusoidalıq ózgermeli toq bolıp tabılmaıdı. Onıń kúshiniń waqıttan ǵárezliginiń iymekligi 318-a súwrette kórsetilgen. SHıńjırdı tuyıqlaǵannan keyin onıń shaması salıstırmalı ástelik penen ósedı, bul ózlik indukciya menen baylanıslı, al shıńjırdı ajratqanda toqtıń shaması tez kemeyedi. Ekinshi shıńjırdaǵı e.q.kúsh birinshi katushkadaǵı toqtıń kúshiniń ózgeriw tezligi bolǵan dI/dt shamasına proporcional bolǵanlıqtan (226-paragrafqa qarańız), ajratıw momentlerindeǵı toqtıń shaması tuyıqlaw momentindeǵı toqtıń shamasınan ádewir úlken mániske jetedi. SHıńjırdıń ekinshi katushkasındaǵı e.q.kúshtiń waqıttan ǵárezligi 318-b súwrette kórsetilgen. E.q.kúshtiń teris mánisi onıń tásirinde ekinshi katushkada payda bolǵan toqtıń birinshi katushkadaǵı toqtıń baǵıtına qarama-qarsı ekenligin, al e.q.kúshtiń oń mánisi bolsa ekinshi katushkadaǵı toqtıń baǵıtınıń birinshi katushkadaǵı toqtıń baǵıtı menen baǵıtlas ekenligin arǵartadı.



318-súwret.
Indukciyalıq katushkadaǵı toqtıń shamasınıń waqıttan ǵárezliginiń iymekligi. a - birinshi katushkadaǵı, b - ekinshi katushkadaǵı.

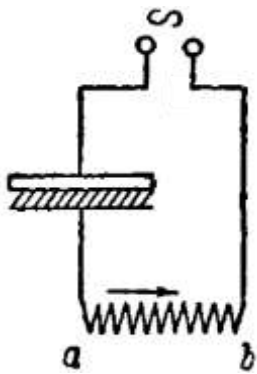
Eger ekinshi katushkanı qısqa tuyıqlasaq, onda ol arqalı simmetriyalı bolmaǵan formadaǵı ózgermeli toq ótedi. Biraq eki baǵıtta alıp ótiletuǵın elektr zaryadlarınıń muǵdarları birdey boladı. Eger ekinshi shıńjırda ádewir úlken ushqınlıq qashıqlıq qaldırılsa, onda ekinshi shıńjırda tuyıqlaǵanda payda bolatuǵın

e.q.kúsh tesiwdi payda etiw ushın jetkiliksiz boladı. Bunday jaǵdayda birinshi shıńırdı ajıratqanda ǵana ushqın payda boladı hám ekinshi shıńırdı úzik-úzik, biraq hár bir ret bir baǵıtta toq júredi.

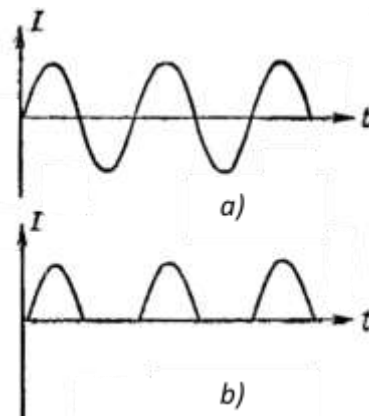
§ 237. Ózgermeli toqlardı tuwrılaw hám ólshew. Ańsat generaciyalanatuǵın hám alıp beriletuǵınlıǵına baylanıslı ózgermeli toqlar texnikada oǵada keń qollanıladı. Biraq, kóplegen jaǵdaylarda paydalanıw ushın turaqlı toq kerek. Sonlıqtan házirgi texnika ózgermeli toqtı tuwrılawdıń hár qıylı usıllarınan paydalanadı.

Toqtı tuwrılawdıń hár qıylı usıllar menen, mısalı qattı yarım ótkizgish tuwrıláǵıshlardıń yamasa elektrolitlik tuwrıláǵıshlardıń járdeminde ámelge asırılıwı múmkin (178-paragraf). 171-paragrafta eki yarım ótkizgishlerdiń yamasa yarım ótkizgish penen metaldıń arasındaǵı kontakttıń toqtıń baǵıtına baylanıslı júdá hár qıylı qarsılıqlarǵa iye bolatuǵınlıǵı kórsetildi. Sonlıqtan, bir baǵıtta toq kontakt arqalı sezilerliktey hálisirewsiz ótedi, al qarama-qarsı baǵıtta júdá ázzi toq óte aladı. Házirgi zaman texnikasında yarım ótkizgishli tuwrıláǵıshlar keńnen qollanıla basladı. Mısal sıpatında germaniy plastinkasınan turatuǵın hám oǵan bir tárepten indiyden soǵılǵan sharik dánekerlengen, al ekinshi tárepten qalayıdan soǵılǵan sharik dánekerlengen germaniy tuwrıláǵıshların kórsetiwge boladı. Indiy elektrodınıń qasında "tesiklik" ótkizgishlik payda boladı, al bunnan keyin tuwrılawshı $p - n$ -ótkeli oblastı júzege keledi. Bunday tuwrıláǵın kontakttıń 1 sm^2 maydanı arqalı júz amperge shekem toqtı ótkeriwge qábiletli. Basqa yarım ótkizgishli tuwrıláǵısh sıpatında eki metall disktiń arasına jaylastırılǵan selennen turatuǵın *selenli tuwrıláǵısh*ti kórsetiwge boladı.

Qattı tuwrılawshılardıń ornına *kenotronlardı* paydalanıwǵa boladı. Kenotronlarda toq tek bir baǵıtta, atap aytqanda anodtan qızdırılǵan katodqa qaray ótedi. Aqırında *sınaptı tuwrıláǵıshlar* dep atalatuǵın keńnen tarqalǵanlıǵın atap ótemiz. Olar razryadlı trubka bolıp tabıladı, bul trubkada suyıq sınaptıń beti menen grafit elektrod arasındaǵı sınaptıń puwlarında razryad júzege keledi; bunday jaǵdayda sınaptıń qızǵan beti tiykarınan katodtıń ornın iyeleydi. Usınıń nátiyjesinde sınap katodtıń, al grafit anodtıń xızmetin atqarǵanda razryad júzege keledi. Al, toqtıń keri baǵıtında razryad óshedi. Qattı yamasa basqa túrdegi tuwrıláǵıshtı ózgermeli toq shıńırına qosqanda (319-súwret) shıńırdıń *ab* uchastkasında bir baǵıttaǵı toq ótedi. Biraq, bul toqtıń kúshi, álbette, turaqlı bolmaydı, al waqıtqa baylanıslı ózgeredi.



319-súwret. Ózgermeli toq shıńırına qattı tuwrıláǵıshtı tutastırıw.



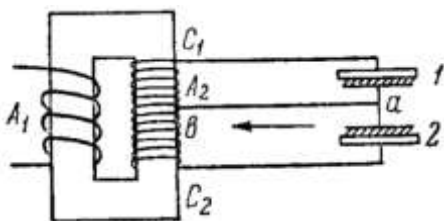
320-súwret. Waqıtqa baylanıslı *a* - ózgermeli toqtıń, *b* - tuwrıláǵısh arqalı ótetuǵın toqtıń kúshiniń ózgeriwi.

320-*a* súwrette sinusoidallıq ózgermeli toqtıń waqıtqa baylanıslı ózgeriwi, al 320-*b* súwrette bolsa tuwrıláǵısh arqalı ótken toq kórsetilgen. Transformator menen eki tuwrıláǵıshtı paydalanıp, ózgermeli toqtıń "ekinshi yarımın" da paydalanıwǵa boladı.

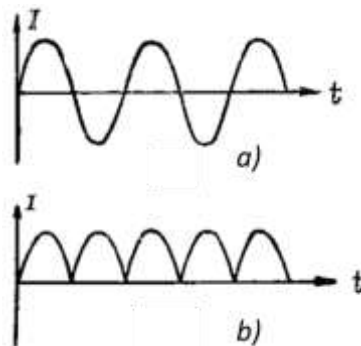
321-súwrette A_1 ózgermeli toqtıń shıńırına tutastırılǵan transformatordıń birinshi katushkası bolıp tabıladı, A_2 - ekinshi katushka. 1 hám 2 eki tuwrıláǵısh ekinshi katushkanıń ushlarına tutastırılǵan. Ekinshi katushkanıń orta bóliminen *ba* ushın shıǵarılǵan. Bunday jaǵdayda dáwirdiń birinshi yarımında ekinshi katushkanıń C_1b bólimi ushırıladı hám toq 1 tuwrıláǵısh arqalı ótedi. Dáwirdiń ekinshi yarımında katushkanıń C_2b bólimi isleydi hám toq 2 tuwrıláǵısh arqalı ótedi. Shıńırdıń *ab* bóliminde toq barlıq waqıtta bir baǵıtta ótedi. 322-*a* súwrette qaytadan sinusoidallıq ózgermeli toq, al 322-*b* súwrette bolsa táriyiplengen sxema boyınsha tuwrılǵan toq kórsetilgen. Onıń kúshindegi terbelislerdi ózlik indukciyanıń yamasa sıyımlıqtıń járdeminde tegisleniwi múmkin.

Ózgermeli toqlardı ólshew ushın qozǵalatuǵın ramkaǵa iye bolǵan magnitoelektrlik ásbaplar paydalanılmaıdı. Sebebi ramkanıń burılıw múyeshi toqtıń baǵıtınıń ózgeriwi menen ózgeredi. 233-paragrafta aytııp ótilgenindey, ózgermeli toqlardı jıllılıq ásbaplarınıń járdeminde ólshewge boladı.

Ózgermeli toqlardı ólshew ushın eki katushkaǵa iye bolǵan elektrodinamikalıq ásbaplar hám katushkaǵa temirdiń bir bólegi tartılauǵın elektromagnitlik ásbaplar paydalanıladı. Bul elektromagnitlik ásbaplarda tartılauǵın kishkene sterjenniń múmkin bolǵanınsha kishi gistereziske iye bolǵan temirdiń sortınan isleniwi kerek.



321-súwret. Transformatordıń orta noqatı bar katushkasına eki tuwrılǵıshtı tutastırıw sxeması.

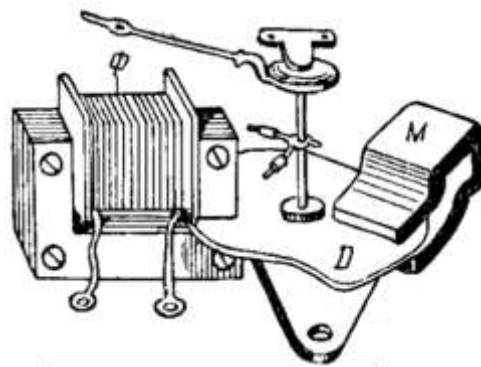


322-súwret. Waqıtqa baylanıslı *a* - ózgermeli toqtıń, *b* - 321-súwrette sxema boyınsha tuwrılǵan toqtıń kúshiniń ózgeriwi.

Joqarıda ayılǵanlardan basqa, ózgermeli toqlardı indukciyalıq (elektrodinamikalıq) ásbaplardıń járdeminde ólshewge boladı. Bul ásbaplardıń islew principi mınaday (323-súwret): kúshi ólshenetuǵın ózgermeli toq elektromagnittiń Φ oramı arqalı ótedi hám ózgermeli magnit maydanın qozdıradı. Ásbaptıń qozǵalmalı bólimi *D* plastinka bolıp tabıladı hám ol usı ózgermeli toqqa qatnası boyınsha maydandı tek yarımday ekranlaydı. Plastinkada indukciyalıq Fuko toqları payda boladı hám magnit maydanı bul toqlarǵa plastinkanı maydanniń sheklerin shıǵarıp taslawǵa baǵdarlangan kúsh penen tásir etedi. Nátiyjede plastinka burıladı hám ol ózine tutastırılǵan strelkanı da buradı. Turaqlı *M* magniti plastinkanıń terbelisin tınıshlandırıw ushın xızmet etedi.

323-súwret.

Indukciyalıq ampermetrdiń sxeması.



Eń aqırında, ózgermeli toqlardı eger tuwrılǵıshtı tutastırsa qozǵalatuǵın ramkaǵa iye bolǵan magnitoelektrlik ásbaplardıń járdeminde de ólshewge boladı. Usınday maqsetlerde ádette qattı tuwrılǵıshlar (kuprokslar) paydalanıladı. 324-súwrette *A* ampermetrin usı ampermetr arqalı toqtıń bir baǵıtta ótiwin támiyinleytuǵın *a, b, c, d* tórt kuprokslarınıń járdeminde tutastırıwdıń sxeması kórsetilgen. *R* qarsılıǵı hám *L* ózlik indukciyası shunttıń ornın iyeleydi.

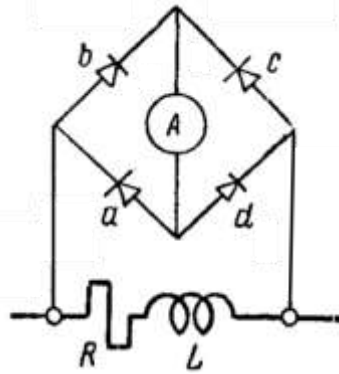
§ 238. Úsh fazalı toq. Biz qarap ótken ápiwayı sinusoidalıq ózgermeti toq penen bir qatarda texnikada *úsh fazalı toq* dep atalatuǵın toq keńnen paydalanıladı. Úsh ólshemli toq dep fazaları bir birinen $\frac{2}{3}\pi$ shamasına (yaǵnıy graduslarda 120° qa) ayrılauǵın tarmaqlanǵan ótkizgishlerde payda bolatuǵın e.q.kúshke aytadı. Dáslep tuyıq bir biri menen tutaspaǵan $A_1B_1C_1D_1$, $A_2B_2C_2D_2$ hám $A_3B_3C_3D_3$ shinjirlarin qaraymız (325-súwret). Meyli,

$$\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_0 \sin \omega t,$$

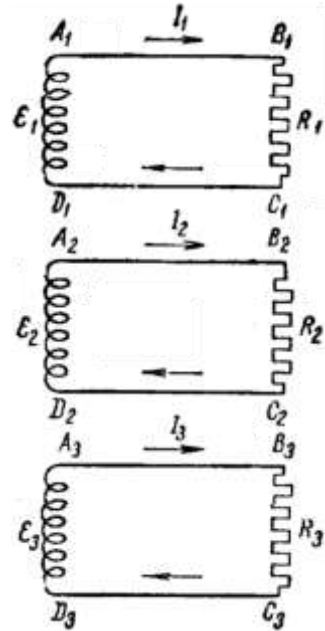
$$\varepsilon_2 = \varepsilon_0 \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right),$$

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_0 \sin\left(\omega t + \frac{4}{3}\pi\right)$$

e.q.kúshleri shıńjırlardıń sáykes A_1D_1 , A_2D_2 , hám A_3D_3 uchastkalarında payda etiletuǵın bolsın. Biz qarap atırǵan shıńjırlarda ózlik indukciya joq hám olardıń hár qaysısına bir birine teń $R_1 = R_2 = R_3 = R$ omliq qarsılıqlar tutastırılǵan dep esaplayıq.



324-súwret. Ózgermeli toqtır kúshin ólshew ushın tuwrılǵıshlardı tutastırıw.



325-súwret. Úsh fazalı toqtı qozdırıwdıń sxeması.

Bunday jaǵdayda, 232-paragrafta ayılǵanlarǵa sáykes, bul shıńjırlarda sáykes

$$I_1 = I_0 \sin \omega t,$$

$$I_2 = I_0 \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right),$$

$$I_3 = I_0 \sin\left(\omega t + \frac{4}{3}\pi\right),$$

shamalarına teń toqlar indukciyalanadı. Bul teńliklerde $I_0 = \varepsilon_0/R$ arqalı toqlardıń ulıwmalıq amplitudası belgilengen. Úsh shıńjırdıń D_1, D_2 hám D_3 noqatların bir biri menen jalǵaymız. Bunday jaǵdayda olardıń potencıalları birdey boladı; sáykes C_1, C_2 hám C_3 noqatlarınıń potencıalları da birdey boladı hám qarsılıqlar arqalı ótetuǵın I_1, I_2 hám I_3 toqların ózertpey olardı da bir biri menen jalǵaw múmkin. Bunday jalǵawda D_1C_1, D_2C_2 hám D_3C_3 sımların bir sim menen almasırwǵa boladı hám bir 326-súwrette kórsetilgendeı shıńjırdı alamız. Álbette, F sımı boyınsha $I_1 + I_2 + I_3$ toqlarınıń qosındısına teń bolǵan toq ótedi. Bul qosındı toqtır barlıq waqıtta nolge teń bolatuǵınlıǵın ańsat kóriwge boladı.

Haqıyqatında da:

$$I_1 + I_2 = I_0 \sin \omega t + I_0 \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right) = I_0 \sin\left(\omega t + \frac{1}{3}\pi\right).$$

Bunnan

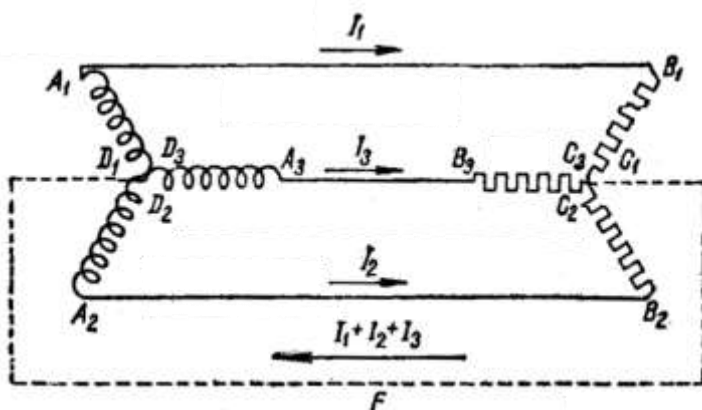
$$I_1 + I_2 + I_3 = I_0 \sin\left(\omega t + \frac{1}{3}\pi\right) + I_0 \sin\left(\omega t + \frac{4}{3}\pi\right) = 2I_0 \sin\left(\omega t + \frac{5}{6}\pi\right) \cdot \cos \frac{\pi}{2} = 0.$$

teńligi kelip shıǵadı.

Tap usınday nátiyjeni úsh amplitudalardıń vektorları I_0 di grafikalıq qosıw jolı menen de alıwǵa boladı. Olar teń qaptalı úsh múyeshlik túrindegi tuyıq sınıq sıızıqtı payda etedi.

Toqlardıń qosındısı $I_1 + I_2 + I_3$ barlıq waqıtta nolge teń bolǵanlıqtan, F sımınıń keregi bolmaydı hám onı alıp taslawǵa boladı. Usınıń nátiyjesinde bir birinen 120° qa jılǵan úsh ózgermeli I_1, I_2, I_3 toqların generaciyanıǵan orınnan R_1, R_2, R_3 qarsılıqlarına bir biri menen baylanıspaǵan shıńjarlar bolǵan

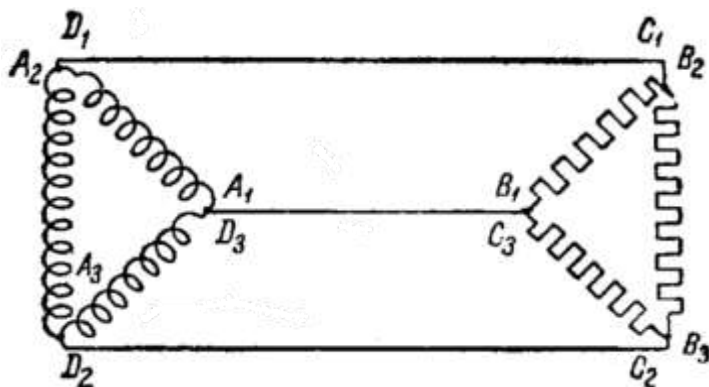
jaǵdaydaǵı sımlardıń úsh jubınıń ornına úsh sımnıń járdeminde jetkerip beriwdiń múmkinshiligi tuwıladı. Biz qarap ótken úsh fazalı toqtıń shınjırın *juldız sxeması* boyınsha tutastırılǵan úsh fazalı toqtıń shınjırı dep ataydı.



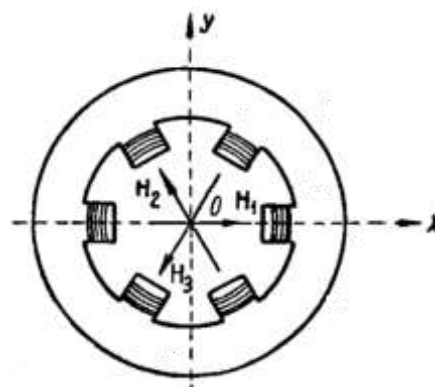
326-súwret.
Juldız túrinde tutastırıwdıń
sxeması.

325-súwrette kórsetilgen bir birinen ǵárezsiz bolǵan shınjırlardı basqa usıldıń járdeminde de, *úsh múyeshlik sxeması* boyınsha tutastırılǵa boladı (327-súwret).

Bul sxemada bir biri menen A_1D_3, A_2D_1, A_3D_2 noqatları hám B_1C_3, B_2C_1, B_3C_2 noqatları tutastırılǵan. Bunday sxema da R_1, R_2, R_3 qarsılıqları arqalı ótetuǵın toqlardıń shamaların ózǵertpey sımlardıń úsh jubın úsh sim menen albastırılǵa múmkinshilik beredi.



237-súwret. Úsh múyeshlik túrinde tutastırıwdıń sxeması.



328-súwret. Saqıyna tárizli magnit
shınjırı.

Toqlardıń qosındısı $I_1 + I_2 + I_3$ dıń nolge teń bolıwı tek R_1, R_2, R_3 qarsılıqları birdey bolǵan jaǵdayda ǵana orın aladı. Eger qarsılıqlar bir birine teń bolmasa, onda fazalar ayırmasınıń shamaları ózgermey qalǵanda qosındı toq $I_1 + I_2 + I_3$ nolge teń bolmaydı. Haqıyqatında, (juldız sxemasında) C_1, C_2, C_3 noqatları tutastırılǵan bolǵanlıqtan, olar túyinlik noqattı payda etedi. Bunday noqat ushın Kirxgof nızamı boyınsha qalatuǵın hám ketetuǵın toqlardıń qosındısı nolge teń bolıwı kerek. Solay etip, is júzinde, R_1, R_2, R_3 qarsılıqları bir birine teń bolmaǵan jaǵdayda da toqlardıń qosındısı ushın $I_1 + I_2 + I_3 = 0$ teńligi orınlanadı. Bul B_1, B_2, B_3 noqatlarınıń arasında qosımsha fazalar ayırmasınıń payda bolıwınıń esabınan júzege keledi.

Úsh fazalı toqlardı paydalanıwdıń qolaylı ekenligi olardıń aylanıwshı magnit maydanı dep atalatuǵın magnit maydanın payda ete alatuǵınlıǵında.

328-súwrette kórsetilgendey polyuslıq nakonechniklerdiń úsh jubı bar saqıyna tárizli magnitlik shınjırda qaraymız. Polyuslıq nakonechniklerdiń hár bir jubı óziniń magnit maydanın payda etedi, al olardıń kernewlik vektorları H_1, H_2, H_3 ler saqıynanıń sáykes diametrleri boyınsha baǵtlanǵan boladı. Meyli, nakonechniklerdiń hár bir jubı úsh fazalıq toqtıń qurawshıları menen tutastırılǵan katushkalarǵa iye bolsın. Eger saqıynanıń materialındaǵı gisterezisti esapqa almaytuǵın bolsaq, onda magnit maydanınıń kernewlikleri H_1, H_2 hám H_3 ler waqıtqa baylanıslı mınaday nızam boyınsha ózgeredi:

$$H_1 = H_0 \sin \omega t,$$

$$H_2 = H_0 \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right),$$

$$H_3 = H_0 \sin\left(\omega t + \frac{4}{3}\pi\right).$$

Koordinata kósherlerin 328-súwrette kórsetilgendey etip ótkeremiz hám olardıń hár qaysısındaǵı H_1, H_2, H_3 lardıń proekciyalarınıń qosındısın tabamız:

$$H_x = H_0 \sin \omega t + H_0 \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right) \cos \frac{2}{3}\pi + H_0 \sin\left(\omega t + \frac{4}{3}\pi\right) \cos \frac{4}{3}\pi,$$

$$H_y = H_0 \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right) \sin \frac{2}{3}\pi + H_0 \sin\left(\omega t + \frac{4}{3}\pi\right) \sin \frac{4}{3}\pi,$$

Sáykes túrlendiriwlerden keyin

$$H_x = \frac{3}{2} H_0 \sin \omega t, H_y = \frac{3}{2} H_0 \cos \omega t$$

teńliklerin tabamız.

I tomda ayılǵanlarǵa baylanıslı, bul eki qurawshı saat strelkasınıń qozǵalı baǵıtında turaqlı ω múyeshlik tezligi menen aylanatuǵın **H** vektorın anıqlaydı.

Aylanatuǵın magnit maydanı onda jaylasqan ótkizgishke bazı bir mexanikalıq kúsh penen tásir etedi. Sebebi ótkizgishte magnit maydanı tásir etetuǵın indukciyalıq toqlar payda boladı. Mısalı, eger aylanatuǵın magnit maydanına kósheri maydannıń baǵıtına perpendikulyar bolǵan kósherge tuyıq oramǵa iye ramkanı jaylastırsaq, onda ramka magnit maydanınıń kernewlik vektorınıń aylanıw baǵıtında aylana baslaydı. Bul qubılıs úsh fazalı ózgermeli toq penen azıqlanatuǵın elektromotorlardı soǵıwǵa múmkinshilik tuwdıradı. Birinshi ret energiyanı úsh fazalı toq penen jetkerip beriw menen aylanıwshı magnit maydanı bar elektromotordı rus injeneri M.O.Dolivo-Dobrovolskiy 1891-jılı ámelge asırdı. Házirgi waqıtları texnikada paydalanılatuǵın elektromotorlardıń kópshiligi aylanıwshı maydan principi tiykarında isleydi.

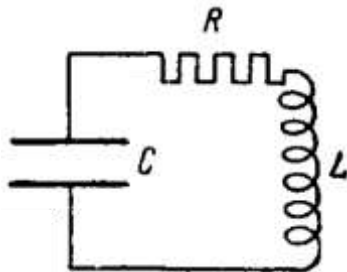
XXI BAP

ELEKTROMAGNITLIK TERBELISLER MENEN TOLQINLAR

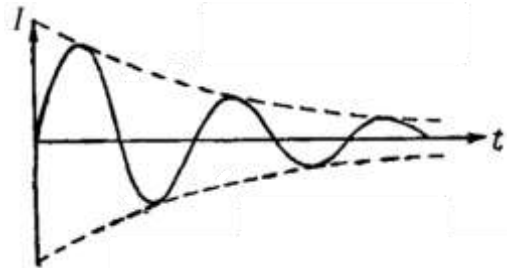
§ 239. Kondensatordıń terbelmeli razryadı. Astarları L ózlik indukciyası hám R qarsılıǵı menen tuyıqlanǵan C kondensatorın kóz aldımızǵa elesleteryk (329-súwret). Meyli bazı bir momentte kondensatordıń astarlarına V potenciallar ayırması túsirilgen hám bunnan keyin usı potenciallar ayırmasınıń deregi ajratılǵan bolsın. Ózlik indukciya bolmaǵan jaǵdayda kondensatordıń astarlarını tutastırılǵan sım arqalı toq ótken hám bul toq astarlardıń potencialları teńleskenshe dawam etken bolar edi. Ózlik indukciya bolǵan jaǵdayda process basqasha ótedi. Astarlardıń potencialları teńleskende ózlik indukciyanıń e.q.kúshi kishireyetuǵın toqtı qollap-quwatlaydı hám astarlardıń keri baǵıttaǵı qaytadan zaryadlanıwı orın aladı. Bunnan keyin keri baǵıttaǵı toq payda boladı, nátiyjede astarlardıń qaytadan zaryadlanıwı dáwirli túrde dawam etedi hám sıymalıq penen ózlik indukciyaǵa iye shıńırda terbelis júzege keledi. Toqtıń energiyasınıń bir bólegi R qarsılıǵındaǵı lenc-djoul jıllılıǵına aylanatuǵın bolǵanlıqtan, terbelis sónedi. Terbelislerdiń ulıwmalıq xarakterı 330-súwrette kórsetilgen. R qarsılıǵı qanshama kishi bolsa, sóniw de sonshama kishi boladı hám $R = 0$ sheginde terbelisler sónbeytuǵın terbelislerge aylanadı hám

$$L > \frac{CR^2}{4} \quad (1)$$

teńsizligi orınlanǵanda razryad terbelmeli xarakterge iye boladı. Eger ózlik indukciya koefficientiniń mánisi (1)-teńsizlik boyınsha anıqlanatuǵın mánisten kishi bolsa, onda ózlik indukciyanıń e.q.kúshi kondensatordıń astarların qaytadan zaryadlaw ushın jetkiliksiz boladı: razryad dáwirli bolmaydı.



329-súwret. C sıymalıqqa, R qarsılıqqa hám L induktivlikke iye terbelmeli kontur.



330-súwret. Sóniwshi terbelisler.

Kishi R qarsılıǵında terbelmeli razryadtıń dáwiri T mınaday formula boyınsha anıqlanadı (bul formula tómende keltirip shıǵarıladı):

$$T = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (2)$$

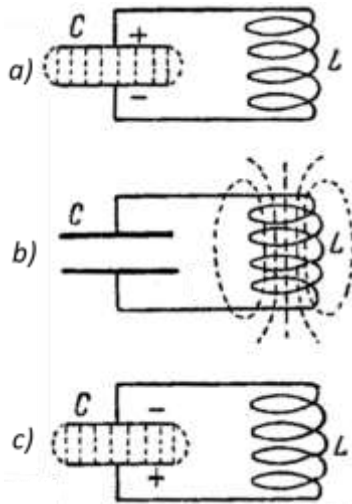
Solay etip, ózlik indukciya menen sıymalıq kishi bolsa dáwir de, yaǵnıy elektr terbelisleriniń jıyiligi úlken boladı. Ádette elektr terbelisleriniń dáwiri júdá kishi boladı. Eger biz eki salıstırmalı úlken sıymalıq penen ózlik indukciyanı alatuǵın bolsaq, mısalı, olar $C = 1 \text{ mkf}$, $L = 1 \text{ gn}$ shamalarına teń bolsa, onda ($1 \text{ mkf} = 10^{-6} \text{ f}$ teńliginiń orınlı ekenligin názerde tutıp), onda terbelis dáwiri ushın

$$T = 2\pi\sqrt{10^{-6} \cdot 1} \text{ sek} \approx 0,0063 \text{ sek}$$

shamasına iye bolamız.

Biz kórgen elektr terbelisleri mexanikalıq terbelislerge, mısalı mayatniktiń terbelislerine uqsas. Awıstırılǵan mayatnik teń salmaqlıq orń arqalı ótedi hám qarama-qarsı tárepke qaray awısadı hám súykelistiń bar bolıwınıń saldarınan ástelik penen sónetuǵın terbeliwin dawam etedi. Bul salıstırıwdan ózlik indukciyanıń inercianıń, al omalıq qarsılıqtıń mexanikalıq qarsılıqtıń

ornın iyeletuǵınlıǵın kórsetedi. Eger energiyalıq qatnaslarǵa ótetuǵın bolsaq, onda analogiyanıń onnan da beter tereńlesetuǵınlıǵın kóremiz. Mayatniktiń terbelisinde awısıtırılǵan mayatniktiń potenciallyq energiyası qozǵalıstıń kinetikalıq energiyasına ótedi, al bul kinetikalıq energiya bolsa óz gezeginde teń salmaqlıq ornı arqalı ótkennen keyin potenciallyq energiyaǵa ótedi hám bunday ótiwler dawam etedi. Kondensatordı zaryadlaǵanda sistemaǵa elektr (potenciallyq) energiyanıń zapası beriledi. 331-a súwrette kondensatordı tutastıratuǵın sızıqlar astarlardıń arasındaǵı elektr maydanın kórsetedi. Kondensatordıń razryadlanıwında solenoidta (ózlik indukciyada) magnit maydanın qozdaratuǵın elektr toǵı payda boladı. Payda bolǵan magnit maydanınıń energiyası mayatniktiń qozǵalıstıń kinetikalıq energiyasına uqsas. 331-b súwrette ózlik indukciyanıń oramlarınıń ishindegi magnit maydanı punktir sızıqlar menen kórsetilgen. Bunnan keyin kondensatordıń qaytadan zaryadlanıwı orın aladı (331-s) - toqtıń "kinetikalıq" energiyası kondensatordıń elektr maydanınıń potenciallyq energiyasına ótedi h.t.b.



331-súwret.

Kondensatordıń dáwirli razryadındaǵı elektr hám magnit maydanlarınıń izbe-iz payda bolıwı.

Kondensatordıń razryadınıń terbelmeli xarakterge iye bolatuǵınlıǵın tolıǵıraq qaraymız. Kondensatordıń astarlarınıń birine berilgen zaryadtı Q arqalı belgileybiz. Bunday jaǵdayda shıńırdaǵı toqtıń kúshiniń shaması usı zaryadtıń waqtı birligindegi ózgerisine teń:

$$I = \frac{dQ}{dt}. \quad (3)$$

Berilgen momenttegi kondensatordıń astarlarındaǵı potenciallyar ayırmasınıń shamasın V arqalı belgileybiz. Bunday jaǵdayda biz qarap atırǵan shıńırdaǵı potencialdıń tolıq túsiwi bolǵan $IR + V$ shaması shıńırǵa túsetuǵın e.q.kúshine teń. Biraq, shıńırda ózlik indukciyanıń e.q.kúshi $-L \frac{dI}{dt}$ háreket etedi. Bunnan

$$IR + V = -L \frac{dI}{dt} \quad (4)$$

teńligine iye bolamız.

Kondensatordıń astarlarındaǵı potenciallyar ayırmasın ádettegi usıl menen kondensatordıń sıyımlıǵı hám onıń astarlarındaǵı zaryad arqalı ańǵartıwǵa boladı: $V = \frac{Q}{C}$; álbette, Q zaryadı da, potenciallyar ayırması V da ózgermeli shamalar bolıp tabıladı. V ushın jazılǵan bul ańlatpanı (4)-formulaǵa qoyıp hám (3)-qatnastı paydalanıp, minanı alamız:

$$L \frac{d^2Q}{dt^2} + R \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{C} = 0. \quad (5)$$

Bul qatnas differenciallıq teńleme bolıp tabıladı. Onı sheshiw arqalı Q dıń waqtıtan ǵárezligin ala alamız. Bunday teńlemenıń sheshimi biz I tomda materiallıq noqattıń serpimli sóniwshi terbelislerin qaraǵanda berildi. Endi

$$\frac{R}{L} = 2\beta, \quad \frac{1}{CL} = \omega_0^2 \quad (6)$$

belgilewlerin kirgizip (5)-teńlemenini bilayınsha jazamız:

$$\frac{d^2 Q}{dt^2} + 2\beta \frac{dQ}{dt} + \omega_0^2 Q = 0. \quad (5a)$$

(5a) teńlemesiniń sheshimin jańa

$$Q = ze^{-\beta t}. \quad (7)$$

ózgeriwshisin kirgiziw arqalı izleybiz. Waqıt boyınsha differenciallaw arqalı mınaǵan iye bolamız:

$$\begin{aligned} \frac{dQ}{dt} &= \frac{dz}{dt} e^{-\beta t} - \beta e^{-\beta t}, \\ \frac{d^2 Q}{dt^2} &= \frac{d^2 z}{dt^2} e^{-\beta t} - 2\beta \frac{dz}{dt} e^{-\beta t} + \beta^2 z e^{-\beta t}. \end{aligned}$$

$Q, dQ/dt$ hám $d^2 Q/dt^2$ shamaların (5-a) teńlemege qoyıp hám ulıwmalıq bolǵan $e^{-\beta t}$ kóbeytiwshisine qısqartıp, mınaday teńlemenini alamız:

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + (\omega_0^2 - \beta^2)z = 0.$$

Bul teńlemeniniń $\omega_0^2 - \beta^2 > 0$ shártı orınlanatuǵın jaǵdaylarda

$$z = A \cos(\omega t - \varphi)$$

túrindegi sheshimge iye bolatuǵınlıǵın ańsat tekserip kóriwge boladı. Bul ańlatpada

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}; \quad (8)$$

A hám φ shamaları baslanǵısh shártler boyınsha anıqlanatuǵın turaqlı shamalar. Demek, (7)-teńlik boyınsha Q ushın mınaday sheshim orın aladı:

$$Q = A \cdot e^{-\beta t} \cdot \cos(\omega t - \varphi). \quad (9)$$

Bul sheshim sóniwshi terbelisti beredi. $A \cdot e^{-\beta t}$ shaması waqıt boyınsha eksponenciallıq nızam boyınsha kemeyetuǵın amplitudanı ańǵartadı; β shaması qanshama úlken bolsa amplituda tezirek kemeyedi. (6)-teńlik boyınsha $\beta = \frac{R}{2L}$ bolǵanlıqtan omalıq qarsılıq R qansha úlken, al ózlik indukciya qansha kishi bolsa terbelislerdiń sóniwi tezirek júzege keledi. (8)-ańlatpa boyınsha terbelislerdiń dáwiri T mınaǵan teń:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}.$$

Bul teńlikke ω_0 menen β lardıń (6)-ańlatpadaǵı mánislerin qoysaq, mınanı alamız:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}}. \quad (8a)$$

Eger shınjırdıń omalıq qarsılıǵı R júdá kishi, al ózlik indukciya koefficienti L kishi bolmasa, biz júdá ástelik penen sónetuǵın terbelislerge iye bolamız. Bunday jaǵdayda (8a) formulasınıń bólimindegi $\left(\frac{R}{2L}\right)^2$ shamasın $\frac{1}{LC}$ ǵa salıstırǵanda esapqa almawǵa boladı hám ástelik penen sónetuǵın terbelislerdiń dáwiri ushın

$$T = 2\pi\sqrt{LC} \quad (8b)$$

ańlatpasına iye bolamız. Bul usı paraǵraftıń basındaǵı (2)-formulaǵa sáykes keledi.

(8-a) hám (8-b) formulaların salıstırıp shınjırdaǵı qarsılıqtıń bolıwınıń terbelis dáwiri T nıń úlkeyetuǵınlıǵına alıp keletuǵınlıǵın kóremiz.

Eger shınjırdıń qarsılıǵı yamasa kondensatordıń sıyımlıǵı

$$\omega_0^2 - \beta^2 = \frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2 < 0$$

yamasa

$$L < \frac{CR^2}{4}$$

ańlatpaları orınlanatuǵında dárejede úlken bolsa, onda (9)-sheshimdey sheshim alınbaydı hám biz dáwirli bolmaǵan razryadtı alamız. Bunday jaǵdayda shıńjırda elektr terbelisleri payda bolmaydı; bunnan bılay bul jaǵdayǵa itibar bermeymiz.

Biz terbelmeli procesti kondensatordıń astarındaǵı hár bir momenttegi Q zaryadı menen táriyiplew jolı menen talladıq. (9)-formulaǵa sáykes, bul zaryadtıń muǵdarı terbeledi hám dáwirli túrde belgisin ózǵertip ástelik penen kemeyedi. Eń aqırında eń dáslep kondensatordıń astarlarına berilgen bir birine teń hám belgileri qarama-qarsı bolǵan $+Q$ hám $-Q$ zaryadları bir birin kompensaciyalaydı. Álbette, Q zaryadınan basqa, sistemanı kondensatordıń astarlarındaǵı potenciallyardıń ayırması V menen de yamasa shıńjır arqalı ótetuǵın I toǵı menen de táriyiplewge boladı.

$V = \frac{Q}{C}$ qatnası orın alatuǵın bolǵanlıqtan

$$V = \frac{A}{C} e^{-\beta t} \cos(\omega t - \varphi) \quad (10)$$

ańlatpasına iye bolamız. Solay etip, potenciallyardıń ayırması da T dáwiri menen sóniwshi terbeliske ushıraydı eken. Toqtıń kúshi ushın mánisti (3) boyınsha tabamız. Bunnan

$$I = \frac{dQ}{dt} = -A\beta e^{-\beta t} \cos(\omega t - \varphi) - A\omega e^{-\beta t} \sin(\omega t - \varphi). \quad (11)$$

ańlatpasına iye bolamız.

Sóniw bolmaǵan jaǵdayda $\beta = 0$ hám sonlıqtan

$$I = -A\omega \sin(\omega t - \varphi). \quad (11a)$$

Bunday jaǵdayda potenciallyar ayırması V :

$$V = \frac{A}{C} \cos(\omega t - \varphi). \quad (10a)$$

Solay etip, sóniw bolmaǵan jaǵdayda toqtıń kúshi hám potenciallyar ayırması fazası boyınsha bir birinen $\pi/2$ shamasına jılısqan eken.

§ 240. Májbúriy elektr terbelisleri. Bunnan burınǵı paragrafta biz qaraǵan kondensatordıń terbelmeli razryadı dáslep teń salmaqlıq halınan shıǵarılǵan hám bunnan keyin óziniń menshikli terbelis dáwiri menen terbeletuǵın mayatniktiń sóniwshi terbelisine usaydı. Biraq, mayatnik, qálegen basqa mexanikalıq serpimli sistema sıyaqlı sırtqı májbúrleytuǵın dáwirli kúshtiń tásirinde májbúriy túrde terbeliske de keledi. Bunday terbelislerde usınday jaǵdaylar ushın tán *rezonans* qubılısı orın aladı (I tom, 103-paragrafqa qarańız): májbúrlewshi kúshtiń jiyiliginiń bazı bir belgili bolǵan mánisinde májbúriy terbelislerdiń amplitudası ayırıqsha úlken boladı. Ázzi sóniw orın alǵanda rezonanslıq jiyilik dep atalatuǵın bul jiyilik is júzinde sistemanıń menshikli terbelisleriniń jiyiligine sáykes keledi.

Terbeletuǵın sistemaǵa sırtqı kúsh penen tásir etip, sistemanıń turaqlı amplituda menen úzliksiz terbeliwin támiyinlewge, yaǵnıy sónbeytuǵın terbelislerdi alıwǵa boladı. Oǵan mısál retinde mayatnikli saatlardıń ankerlik mexanizmi xızmet ete aladı, ol mayatnikti dáwirli túrde iyterip, mayatnikti sónbeytuǵın terbeliske alıp keliwge májbúrleydi. Bunday jaǵdayda súykelis kúshlerine qarsı jumıs sırtqı derektiń energiyasınıń esabınan úzliksiz túrde orınlanadı.

Tap soǵan sáykes, sıyımlıqtan, qarsılıqtan hám ózlik indukciyadan turatuǵın konturǵa sırttan dáwirli túrde ózgeretuǵın e.q.kúshti alıp kelsek, konturda májbúriy elektr terbelislerin qozdırıwǵa boladı. Meyli, C sıyımlıqqa, L ózlik indukciyaǵa hám R omliq qarsılıqqa iye bolǵan konturdı bazı bir orında úzsek hám payda bolǵan erkin a hám b ushlarına (332-suwret) sırtqı derekten $\mathcal{E}$ e.q.kúshi alıp kelinggen bolsın. Eger biz májbúrleytuǵın e.q.kúshin taza dáwirli dep boljasaq, yaǵnıy

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \sin \omega t \quad (1)$$

nızamı boyınsha ózgeretuǵın bolsa, onda biz 234-paragrafta qaralǵan jaǵdayǵa kelemiz. Endi nátiyjelerdi bir qansha basqasha bolǵan kóz-qarastan qaraymız. Biziń shıńjırımızda [234-

paragraftağı (5)-formula] májbúrlawshi e.q.kúshi $\mathcal{E}$ nín ózgeriw jiyiligindey jiyilik penen I toğı cirkulyaciyanadı:

$$I = I_0 \sin(\omega t - \varphi). \quad (2)$$

(2)-sheshim biz qarap atırǵan jaǵdaydaǵı toqtırn kúshi I qanaatlandıratuǵın differenciallıq teńlemeninń dara sheshimi bolıp tabıladı. Toliq sheshim jáne $I_0 e^{-\beta t} \sin \omega t$ túrindegi ańlatpaǵa iye boladı, biraq bul aǵza sóniwshi terbelis bolıp tabıladı hám ol tez arada toqtaydı. Bunday jaǵdayda toqtırn kúshiniń waqıttan ǵárezligi tolıǵı menen (2)-formula menen beriledi. Úzliksiz túrde tásir etetuǵın dáwirli májbúrlawshi (1)-kúshte (2)-ańlatpa boyınsha I toq kúshiniń terbelisleri waqıttırn ótiwi menen dawam ete beredi, yaǵnıy sistema ω jiyiligi menen sónbeytuǵın májbúriy túrde terbeledi. 234-paragraftağı (9)-formula boyınsha bul toqtırn amplitudası I_0 mınaǵan teń:

$$I_0 = \frac{\mathcal{E}_0}{\sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}} \quad (3)$$

Onın mánisi rezonanslıq jiyilikte maksimumǵa jetedi:

$$\omega_{rez} = \sqrt{\frac{1}{LC}}. \quad (4)$$

239-paragraftağı (8a) formula boyınsha konturdıń menshikli terbelisleriniń dáwiri

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$$

shamasına teń. Bunnan rezonanstırn menshikli terbelislerdiń jiyiligin ω_0 den úlken bolǵan ω_{rez} jiyiliginde júzege keletuǵınlıǵın kóremiz. SHeksiz kishi omliq qarsılıqta rezonanslıq jiyilik menshikli terbelislerdiń jiyiligine sáykes keledi.

Rezonanslıq jiyilikte toqtırn kúshiniń amplitudası I_0 mınaday mániske iye boladı: $I_{0max} = \mathcal{E}_0/R$; omliq qarsılıq qanshama kishi bolsa, onın shaması sonshama úlken boladı.

333-súwrette omliq karsılıq R diń hár qıylı mánislerine sáykes keletuǵın bir neshe rezonanslıq iymeklikler keltirilgen. R qarsılıǵınıń mánisi qansha kishi bolsa, iymekliktiń maksimumı ótkir boladı. Solay etip, kishi sóniwge iye bolǵan kontur ótkir rezonanstı beredi. Májbúrlawshi e.q.kúshi quramalı xarakterge iye bolǵan jaǵdayda usınday konturdı e.q.kúshtiń ayırım garmonikalıq qurawshılarına "sáykeslendiriwge" múmkinshilik beredi.

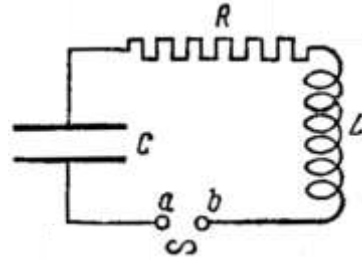
Haqıyqatında da, meyli májbúrlawshi e.q.kúshin mınaday sinusoidalardıń summası túrinde kórsetiwge boladı:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{01} \sin(\omega_1 t - \varphi_1) + \mathcal{E}_{02} \sin(\omega_2 t - \varphi_2) + \mathcal{E}_{03} \sin(\omega_3 t - \varphi_3) + \dots$$

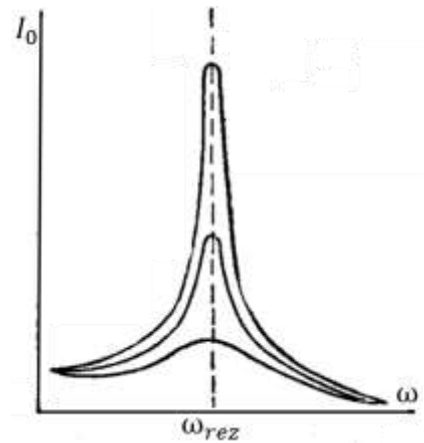
Kontur ushın sıyımlıq C menen ózlik indukciya L di

$$\frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_1$$

teńligi orınlanatuǵınday etip saylap alsaq, onda rezonans shárti $\mathcal{E}_{01} \sin(\omega_1 t - \varphi_1)$ qurawshısı ushın orınlanadı; usı qurawshınıń tásirinde qozǵan májbúriy terbelisler eń úlken amplitudaǵa iye boladı. $\omega_2, \omega_3, \dots$ jiyilikleri menen májbúriy terbelislerdiń amplitudaları kishi boladı, sebebi olar ushın rezonans shárti orınlanbaydı. Konturdıń sıyımlıǵı menen ózlik indukciyasın ózgertiw joli menen barlıq $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots$ jiyiliklerge "juwap" beriwge boladı. Solay etip, quramalı terbelislerdiń garmonikalıq tallawın ótkeriwge boladı.

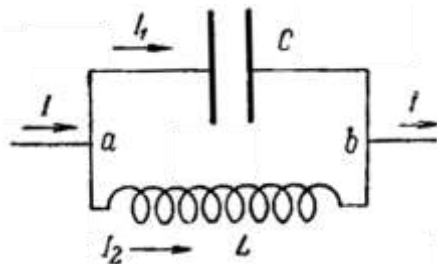


332-súwret. C sıymılgı, R qarsılıgı, L ózlik indukciyasınan turatúgın shınjırdağı májbúriy terbelislerdiń qoziwı.



333-súwret. I toq kúshiniń rezonanslıq iymeklikleri.

Sónbeytuğın elektr terbelislerin alıw ushın 332-súwrette keltirilgen sxemadan basqa 334-súwrette keltirilgen sxemanı da paydalanıwǵa boladı. Biz bul jaǵdayda da C sıymılgı menen L ózlik indukciyasınan turatúgın shınjırǵa iye bolamız. Ápiwayılıq ushın barlıq shınjırdaǵı omalıq qarsılıgı R di nolge teń dep boljaymız. Sırtqı e.q.kúshi $\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \sin \omega t$ konturdıń a hám b noqatlarına tutastırılǵan. Solay etip, bul jaǵdayda a hám b noqatlarınń arasında shınjır tarmaqlanadı: shınjır eki parallel tutastırılǵan uchastkalardan turadı. Uchastkalardıń biri C sıymılgısına, al ekinshisi L ózlik indukciyasına iye. Usı uchastkalardıń hár birindegi toqtıń kúshin 234-paragrafta keltirip shıǵarılǵan formulalardıń járdeminde sáykes $C = 0$ yamasa $L = 0$ teńligi orınlanadı dep esaplaw arqalı anıqlaymız.



334-súwret. Parallel tutastırılǵan C sıymılgı hám L ózlik indukciyasına iye shınjır.

234-paragraftaǵı (5)-formula boyınsha aCb tarmaǵında mınaday toq ótedi:

$$I_1 = I_{01} \sin(\omega t - \varphi_1). \quad (5)$$

234-paragraftaǵı (9)-formulaǵa $L = 0$ hám $R = 0$ teńliklerin qoyıp, bul toqtıń amplitudası I_{01} di alamız:

$$I_{01} = \mathcal{E}_0 C \omega. \quad (6)$$

234-paragraftaǵı (8)-formula boyınsha bul toqtıń baslanǵısh fazası φ_1 di

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = -\infty$$

teńliginiń járdeminde anıqlaymız. Bunnan

$$\varphi = (2k + \frac{3}{2})\pi$$

teńligine iye bolamız. Bul teńlikte $k = 1, 2, 3 \dots$ aLb tarmaǵı boyınsha

$$I_2 = I_{02} \sin(\omega t - \varphi_2). \quad (7)$$

toǵı ótedi. Onıń amplitudasın 234-paragraftaǵı (9)-formula boyınsha $C = \infty$ hám $R = 0$ teńlikleri orınlı dep alamız. Bunnan mınaday nátiye alınadı:

$$I_{02} = \frac{\mathcal{E}_0}{L\omega}. \quad (8)$$

φ_2 baslanǵısh fazası

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = +\infty$$

teńliginiń járdeminde anıqlanadı. Bunnan φ_2 ushın

$$\varphi_2 = (2k + \frac{1}{2})\pi$$

mánisine iye bolamız.

Demek, aCb hám aLb tarmaqlarındaǵı fazalar ayırması $\varphi_1 - \varphi_2 = \pi$ shamasına teń, yaǵnıy bul toqlardıń fazaları qarama-qarsı hám a hám b noqatlarına keletuǵın simlar arqalı amplitudası

$$I_0 = I_{01} - I_{02}$$

shamasına teń toq ótedi. I_{01} hám I_{02} shamalarınıń ornına olardıń (6)- hám (8)-ańlatpalar boyınsha mánislerin qoyıp, mınanı alamız:

$$I_0 = \varepsilon_0 \left(C\omega - \frac{1}{L\omega} \right). \quad (9)$$

Solay etip, alıp keletuǵın toqtıń mánisi konturdıń ayırım tarmaqlarındaǵı toqtıń shamasınan kishirek boladı. Mınaday teńlik orınlanganda

$$C\omega - \frac{1}{L\omega} = 0$$

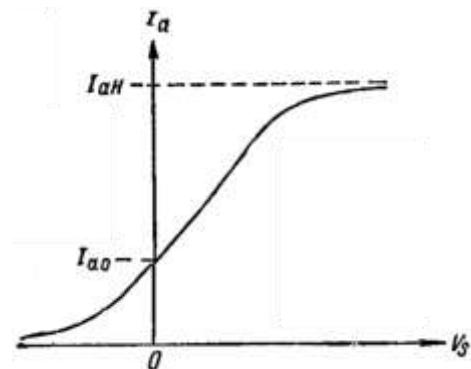
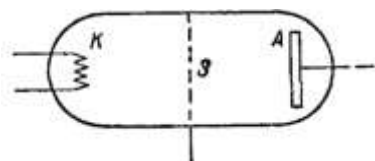
yamasa májbúriy e.q.kúsh

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

shamasına teń bolǵanda, yaǵnıy rezonans shárti orınlanganda toqtıń shaması nolge teń boladı. Bul toqtıń nolge teń bolıwı konturdıń qarsılıǵın nolge teń dep esaplawdıń saldarınan alınadı. Bunday jaǵdayda konturdaǵı terbelislerdi uslap turıw ushın sırttan hesh qanday energiyanı alıp keliw talap etilmeydi. Omıq qarsılıq R bar bolǵan jaǵdayda $\varphi_1 - \varphi_2$ fazalar ayırması π ge teń bolmaydı; usıǵan sáykes rezonans sharayatında da toqtıń amplitudası I_0 nolge teń bolmaydı. Konturǵa alıp kelinetuǵın energiya ondaǵı sónbeytuǵın terbelislerdi qollap-quwatlaw ushın jumсалadı. R qarsılıǵı qansha kishi bolsa, bul energiyanıń shaması da kishi boladı.

Ótkir rezonansta alıp keliwshi simlardaǵı toqtıń shaması konturdıń ózinde cirkulyaciyanatuǵın toqtan ázzirek boladı. Sonlıqtan biz qarap ótken qubılıstı *toqlardıń rezonansı* dep ataydı.

§ 241. Katod lampasınıń járdeminde sónbeytuǵın terbelislerdi qozdırıw. Konturdaǵı sónbeytuǵın terbelislerdi uslap turatuǵın ózgermeli e.q.kúshin dóretiw ushın házirgi waqıtları katodlıq lampalar keńnen qollanıladı. 172-paragrafta kórgenimizdey, katodlıq lampası eki elektrod kirgizilgen ishinen hawası sorıp alınǵan ıdıstan turadı. Sol eki elektrodtıń biri qızdırılatsuǵın katod K hám A anodı bolıp tabıladı. K katodı elektronlardı shıǵaradı, olar tezletetuǵın maydannıń tásirinde elektronlıq toqtı payda etip, anodqa qaray qozǵaladı. Bunday lampanı *eki elektrodlı lampası* yamasa diod dep ataydı. Sónbeytuǵın terbelislerdi generaciyalaw ushın ádette *úsh elektrodlı lampalar* yamasa triodlar paydalanıladı. Bunday lampası K katodtan, A anodtan hám olardıń arasına kirgizilgen S torınan turadı (335-súwret). Katodtan ushıp shıqqan elektronlar tordıń arasındaǵı tesikler arqalı ushıp ótip anodqa jete aladı.



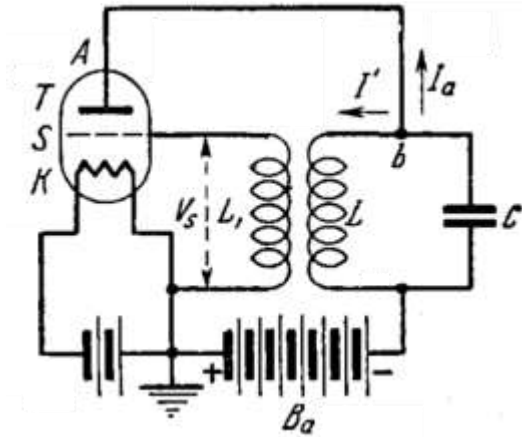
335-súwret. Úsh elektrodı lampa (triód).

336-súwret. Anod toǵı I_a nıń torlıq kernew V_s dan ǵárezligi.

Eger katod K menen anod A nıń ortasındaǵı berilgen potenciallar ayırmasında katodtan ushıp shıǵatuǵın elektronlardı irketuǵın potencialdı túsiretuǵın bolsaq, onda anodqa jetip baratuǵın toqtıń ("anodlıq toq") shaması kishireydi. Kerisinshe, eger elektronlardı tezletetuǵın potencial túsirilse, onda anodlıq toq kúsheydi. Solay etip, anodlıq toqtıń shaması tordıń potencialınan ǵárezli eken. 336-súwrette anodlıq toqtıń V_s "torlıq kernewden" ǵárezligi, yaǵnıy katod K menen S torınıń arasındaǵı potenciallar ayırmasınan ǵárezligi kórsetilgen. Bunday jaǵdayda anodlıq kernew V_a nı (K katodı menen A anodınıń arasındaǵı potenciallar ayırması) turaqlı dep boljaymız. Nollık torlıq kernewde berilgen anodlıq kernew V_a ǵa baylanıslı bazı bir I_{a0} anodlıq toǵı boladı. Usı anodlıq toqtı nolge shekem tómenletiw ushın belgili shamadaǵı irkiwshi torlıq kernewdi túsiriw kerek. Tezletiwshi torlıq kernewde anodlıq toq kúsheydi hám eń arqırında onıń shaması toyınıw toǵı I_{at} shamasına shekem kóteriledi. Orta bólimde anodlıq toqtıń xarakteristikası sıızqlı túrge iye boladı. Triodta torlıq kernewdiń kishi ózgerislerinde anodlıq toq kúshli ózgeredi. Bul jaǵday bılayınsha túsindiriledi: tordıń katodqa jaqın jaylasıwınıń saldarınan torlıq kernew katodtıń qasında jetkilikli dárejede úlken kernewlikti payda etedi. Anodta baslanatuǵın kernewlik sıızqlarınıń úlken bólimi torda tamam bolıp, katodqa shekem jetip kelmeydi. Sonlıqtan triodtaǵı anodlıq kernew anodlıq toqtıń shamasına az tásir etedi. Katodtan shıǵatuǵın elektronlardıń bir bólimi torǵa kelip tusedi hám usınday jollar menen torlıq toqtı payda etedi. Biraq, eger tordaǵı tesiklerdiń maydanı usı tor soǵılǵan sımalar jabatuǵın maydannan úlken bolǵan jaǵdayda torlıq toqtıń shaması anodlıq toqtıń shamasınan kishi boladı. Úsh elektrodlı lampa sónbeytuǵın terbelislerdi qozdırıw (generaciyalaw) ushın da, terbelislerdi kúsheytiw ushın da paydalanıladı.

Úsh elektrodlı lampanıń járdeminde sónbeytuǵın terbelislerdi qozdırıw sxeması 337-súwrette keltirilgen. Bul sxemanıń jumıs islewiniń principi mexanikalıq avtoterbeliwshi sistemalardıń, misalı saattıń mayatniginiń jumıs islewiniń principine usaydı. Saattıń mayatniginiń mexanikalıq avtoterbelisleri xrap mexanizminiń tásirinde uslap turıladı. Sırttan energiya alıp kelinbese konturdaǵı terbelisler energiyanıń áste-aqırın nurlanıwınıń jáne konturdaǵı omıq qarsılıqtıń bar bolıwınıń sebebinen energiyanıń lenc-djoul jıllılıǵına aylanıwınıń saldarınan sónedi. 337-súwrette energiya B_a anodlıq batareyadan úsh elektrodlı T lampanıń járdeminde LC konturına beriledi.

Lampanıń S torı L_1 katushkası menen tutastırılǵan. Katushka bolsa LS terbelmeli konturınıń L katushkası menen induktivli túrde baylanısqa. Bunday baylanıs *keri baylanıs* atamasına iye hám ol sónbeytuǵın terbelislerdiń payda bolıwın támiyinleydi. SHında da, terbelmeli konturdaǵı toqtıń kúshi I' tiń ózgerisi L_1 katushkasında e.q.kúshti payda etedi, al ol torlıq kernew V_s tiń ózgerisine alıp keledi. Torlıq kernewdiń ózgerisiniń saldarınan B_a batareyasınan T triodı arqalı ótetuǵın anodlıq toq LC konturındaǵı terbelislerdiń jiyiligindey jiyilik penen ózgeredi. Torlıq kernewdiń fazasın sáykes túrde saylap alǵanda anodlıq toqtıń bul ózgerisleri LC terbelmeli konturındaǵı terbelislerdi qollap-quwatlaydı. Usınday jol menen B_a barateyasınan alınǵan energiyanıń esabınan terbelisler sónbeytuǵın terbelislerge aylanadı. Triod terbelisler xarakteristikasınıń ortańǵı tuwrı sıızqlı uchastkada islegen jaǵdayda terbelmeli konturda qozǵan terbelisler sinusoidalıq xarakterge iye boladı.



337-súwret.

Keri baylanıs sxeması boyınsha sónbeytuğın terbelislerdi qozdırıw.

337-súwrette kórsetilgen sxema ushın terbelisler teńlemesin dúzemiz. C kondensatorı zaryadsızlanğanda shınjırda payda bolğan I toğı b noqatında ekige tarmaqlanadı: anod toğı I_a hám katushka arqalı ótetuğın I' toğı. Toqlardı kvazistacionar dep esaplap (232-paragrafqa qarańız), b noqatı ushın Kirxgoftın birinshi nızamı boyınsha mınanı alamız:

$$I = I' + I_a. \quad (1)$$

C kondensatordın astarlarındagı potenciallar ayırması V arqalı hám R arqalı L katushkasınıń omliq qarsılığın belgileybiz; tutastırıwshı simlardıń qarsılıqların esapqa almaymız. Kirxgoftın ekinshi nızamı boyınsha, $RI' + V$ shamasına teń bolğan LC konturına potencialdın túsiwleriniń qosındısı usı konturda háreket etetuğın e.q.kúshlerdiń qosındısına teń bolıwı kerek. LC konturında tek ózlik indukciyanıń — $L \frac{dI'}{dt}$ e.q.kúshi tásir etedi. Bunnan

$$RI' + V = -L \frac{dI'}{dt} \quad (2)$$

teńlemesine iye bolamız.

Kondensatordın astarlarındagı potenciallar ayırması V hár bir momentte astarlardıń birindegi Q zaryadı menen $V = \frac{Q}{C}$ qatnası boyınsha baylanısqa. Bul qatnasta C arqalı kondensatordın sıyımlıgı belgilengen. Usı jağdaydın tiykarında (2)-teńlemenı mına túrde jazıwğa boladı:

$$L \frac{dI'}{dt} + RI' + \frac{Q}{C} = 0.$$

Bul teńlemenıń shep tárepın t boyınsha differenciallap, mınanı alamız:

$$L \frac{d^2I'}{dt^2} + R \frac{dI'}{dt} + \frac{1}{C} \frac{dQ}{dt} = 0.$$

$\frac{dQ}{dt} = I$ teńliginiń orınlı ekenligin názerde tutıp hám (1)-teńlikten paydalanıp

$$L \frac{d^2I'}{dt^2} + R \frac{dI'}{dt} + \frac{1}{C} (I' + I_a) = 0 \quad (3)$$

teńliginiń orınlı ekenligin tabamız. Joqarıda aytıp ótilgenindey, I_a anod toğınuń kúshi V_S torlıq kernewden gárezli. Bul gárezlik 336-súwrette kórsetilgen iymeklik penen kórsetiledi. Grafiktiń tuwrı sıızılıq bóliminde bul gárezlik sıızılıq. I_{a0} shamasın esapqa almay, biz onı ápiwayı etip $I_a = kV_S$ túrinde jaza alamız. Bul teńlikte k - turaqlı shama. L hám L_1 katushkalarınń arasındağı óz-ara indukciya koefficientin L_{12} arqalı belgilep, mınanı alamız:

$$V_S = -L_{12} \frac{dI'}{dt}.$$

Bunnan I_a ushın

$$I_a = kV_S = -kL_{12} \frac{dI'}{dt}$$

añlatpası kelip shıgadı. Bul I_a shamasın (3)-teńlemege qoyıp, mınanı alamız:

$$L \frac{d^2I'}{dt^2} + \left(R - \frac{kL_{12}}{dt} \right) \frac{dI'}{dt} + \frac{1}{C} I' = 0. \quad (4)$$

dI'/dt shamasınıń aldındağı kóbeytiwshı kL_{12}/C shamasına kishireytilgen omliq qarsılıq R bolıp tabıladı. Eger L_{12} koefficientin ózgeriw arqalı bul shamandı

$$R - \frac{kL_{12}}{dt} = 0$$

teńligi orınlanatuǵınday etip saylap alsaq, onda (4)-teńleme mınaday túrge enedi:

$$L \frac{d^2 I'}{dt^2} + \frac{1}{C} I' = 0. \quad (5)$$

Bul teńlemenıń sheshiminiń

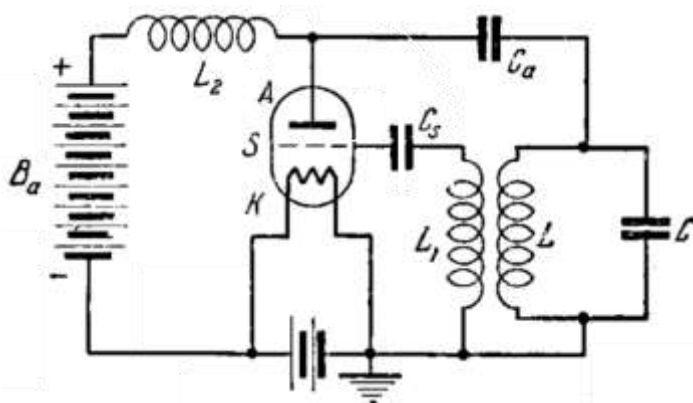
$$I' = A \cos \omega t$$

ańlatpasınıń bolatuǵınlıǵın ańsat tekserip kóriwge boladı. Bul teńlikte $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}$.

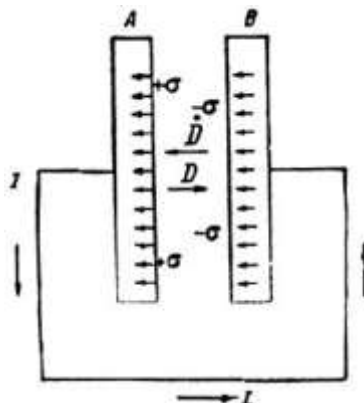
Solay etip, LC konturında A amplitudasına hám ω cikllıq jıyılıǵına iye bolǵan sónbeytuǵın terbelislerdiń payda bolatuǵınlıǵın alamız. Bunday sónbeytuǵın terbelislerdi triodtıń xarakteristikasınıń sıızıqlı bóliminde alıw múmkin. Sebebi, tek usınday jaǵdayda ǵana (3)-teńleme sónbeytuǵın terbelislerdiń (5)-teńlemesine ótedi.

Házirgi waqıtlardaǵı radiotexnikada lampalıq generatorlardıń hár qıylı tipleri paydalanıladı. Olar bir birinen tiykarınan keri baylanıstı dúziwdi júzege keltiriwdiń usılları menen ayrıladı. Bul baylanıstıń intuktivlik (337-súwretteǵıdey), sıyımlıqlıq yamasa avtotransformatorlıq bolıwı múmkin. Usınıń menen birge, izbe-iz anodlıq azıqlandırılatuǵın generatorlardıń bolıwı múmkin. Bunday jaǵdayda anod penen terbelmeli kontur anodlıq batareya menen izbe-iz tutasadı. Sonıń menen birge parallel azıqlandırılatuǵın generatorlardıń bolıwı da múmkin. Bunday jaǵdayda anod penen terbelmeli kontur anodlıq batareya menen parallel tutasatırıladı. Aqırında, sxemalar bir yamasa eki lampanıń qollanılıwı menen bir birinen ayrılıwı múmkin. 338-súwrette induktivli keri baylanısqha hám parallel anodlıq azıqlandırıwǵa iye sxema kórsetilgen. C_a kondensatorı anodlıq batareyanıń L katushkası arqalı tutasıwın boldırmaw ushın qosılǵan; ol sonıń menen bir waqıtta LC terbelmeli konturına joqarı jıyılıqlı toqtı ótkeredi. Al L_2 induktivliginiń tutqan ornı anodlıq batareya B_a ǵa joqarı jıyılıqlı terbelislerdi jiber mewden ibarat.

§ 242. Awısıw toǵı. Kondensator bar shınjır arqalı ózgermeli toq ótkende júzege keletuǵın processlerdi tolıǵıraq qaraymız. Joqarıda kórgenimizdey, turaqlı toq bolǵanda toq sıızıqları barlıq waqıtta tuyıq (156-paragraf). Ózgermeli toq bolǵanda is basqasha boladı. Kondensatordıń plastinkalarınıń arasındaǵı dielektrikte zaryadlar orın almastıra almaydı, usınıń saldarınan kondensatordıń plastinkasına jetkende toq sıızıqları bette úziledi. Kondensatordıń astarların tutastıratuǵın ótkizgish simlar arqalı ótetuǵın ótkizgishlik toǵı tuyıqlanbaǵan boladı.



338-súwret. Parallel anodlıq azıqlandırıw sxeması boyınsha sónbeytuǵın terbelislerdi qozdırıw.



339-súwret. Kondensatordıń astarlarınıń arasında awısıw toǵınıń payda bolıwı.

Meyli, qanday da bir momentte A kondensatorınıń shep táreptegi astarı (339-súwret) onıń betinde $+\sigma$ tıǵızlıǵı menen tarqalǵan oń zaryadqa, al oń táreptegi astar $-\sigma$ tıǵızlıǵına iye teris zaryadqa iye bolsın. Astarlardı sim arqalı tutastırıp razryadlaǵanda shep táreptegi astardan oń

táreptegi astarğa qaray toq ótedi. Bul i toǵınıń san mánisi zaryadtıń tıǵızlıǵınan waqıt boyınsha tuwındı alıp tabamız (155-paragrafqa qarańız):

$$i = \frac{d\sigma}{dt}. \quad (1)$$

Usınday tıǵızlıqqa iye toq A nıń shep táreptegi astarınan aǵadı.

Endi kondensatordıń astarlarınń arasındaǵı keńislikte qanday qubılıstıń júzege keletuǵınıńıń qaraymız. Eger bizler júdá joqarı jıyılıkka iye bolmaǵan ózgermeli toqlar menen sheklensek, onda astarlardıń arasındaǵı elektr maydanınıń ózgerisin anıqlay alamız. Haqıyqatında da, bul jaǵdayda kondensatordıń ishindegi maydannıń bir zamatlıq mánisin zaryadlardıń tıǵızlıǵınıń bir zamatlıq mánisi boyınsha esaplawǵa boladı. 144-paragraftan kondensatordıń astarlarınń arasındaǵı elektr indukciyası vektorı $\mathbf{D}$ san mánisi boyınsha mınaǵan teń:

$$D = 4\pi\sigma.$$

Bul teńliktiń oń hám shep tárepinen waqıt boyınsha tuwındı alsaq, onda

$$\frac{1}{4\pi} \frac{dD}{dt} = \frac{d\sigma}{dt}$$

teńligine yamasa elektr indukciyasınan waqıt boyınsha alınǵan tuwındını $\dot{D}$ arqalı belgilesek

$$\frac{1}{4\pi} \dot{D} = \frac{d\sigma}{dt} \quad (2)$$

teńligine iye bolamız.

Biz qarap atırǵan jaǵdayda $\mathbf{D}$ vektorı B astarınan A astarına qaray baǵıtlangan. Haqıyqatında da, kondensatordıń razryadlanıwında onıń astarlarınń arasındaǵı maydan hálisireydi, bunnan waqıt boyınsha alınǵan dD/dt tuwındısınıń mánisiniń teris bolatuǵınıń kelip shıǵadı, yaǵnıy $\mathbf{D}$ vektorı $\mathbf{D}$ vektorına qarama-qarsı baǵıtlangan. Elektr indukciyası $\mathbf{D}$ vektorı bolsa astarlardıń arasında shepten ońǵa qaray baǵıtlangan. Bunnan mınaday juwmaqqa kelemiz: A plastinkasınıń ishinde ótkizgishlik toǵınıń tıǵızlıǵınıń vektorı $\mathbf{i}$ shepke qaray baǵıtlangan, al astarlardıń arasındaǵı keńislikte bolsa tap sol baǵıtta $\mathbf{D}$ vektorınıń sızıqları júredi. (1)- hám (2)-teńlikler boyınsha $\mathbf{i}$ hám $\frac{1}{4\pi} \dot{\mathbf{D}}$ vektorlarınń san mánisleri bir birine teń. Solay etip, toqtıń tıǵızlıǵı vektorı $\mathbf{i}$ dıń sızıqları hám 4π ge bólingen $\dot{\mathbf{D}}$ vektorınıń sızıqları bir birin almastıradı.

Mınaday belgilewdi kirgizemiz:

$$\frac{1}{4\pi} \dot{\mathbf{D}} = \mathbf{i}_{aw}. \quad (3)$$

Bunday jaǵdayda mınaday jaǵday orınlı boladı: *ótkizgish plastinkanıń ishindegi ótkizgishlik toǵınıń tıǵızlıǵı $\mathbf{i}$ dıń sızıqları plastinkalardıń arasındaǵı $\mathbf{i}_{aw}$ vektorınıń sızıqlarına úzliksiz túrde ótedi. $\mathbf{i}_{aw}$ shamasın birinshi ret qaraw ushın kirgizgen Maksvell onı awısıw toǵınıń tıǵızlıǵı dep atadı. "Awısıw toǵı" ataması házirgi waqıtları áhmiyetin pútkilley joǵaltqan elektrostatikalıq kúshlerdiń payda bolıwı serpimli ortalıq bolǵan efirdiń mexanikalıq deformaciyaları menen baylanıslı kóz-qarası menen baylanıslı.*

Demek, eger ótkizgishlerdegi ótkizgishlik toǵınıń tıǵızlıǵı bolǵan $\mathbf{i}$ shamasın waqıtqa baylanıslı ózgeretuǵın elektr maydanı tárepinen anıqlanatuǵın awısıw toǵınıń tıǵızlıǵı $\mathbf{i}_{aw}$ ǵa sáykes keledi dep esaplasaq, onda toq sızıqlarınıń úzliksizlik formallıq jaqtan qaytadan tiklenedi. Biraq, is shınında ótkizgishlik toǵı menen awısıw toǵı arasındaǵı formallıq analogiya menen sheklenip qoymaydı. Elektromagnitlik qubılıslar haqqındaǵı tálimattıń bunnan bılay rawajlanıwı awısıw toǵınıń elektromagnit maydanınıń bazı bir haqıyqıy qásiyetlerin táriyipleytuǵınıń kórsetti. Maksvell tárepinen ayılǵan gipoteza *boyınsha ótkizgishlik toǵı keńislikte qanday magnit maydanın payda etetuǵın bolsa, awısıw toǵı da keńislikte tap sonday magnit maydanın payda etedi.* Házirgi waqıtları bul gipotezanıń durıs ekenligi onıń nátiyjesinde kelip shıǵatuǵın nátiyjelerdı tekserip kóriw boyınsha ótkerilgen kóp sanlı tájiriybelerde tastıyıqlandı.

Bunday jaǵdayda mınanı názerde tutıw kerek: awısıw toǵı ótkizgishlik toǵına tek magnit maydanın payda etiwı boyınsha ǵana ekvivalent. Barlıq basqa jaǵdaylarda awısıw toǵı ótkizgishlik

toǵına usamaydı: mısalı, awısıw toǵı ótkende lenc-djoul jıllılıǵı bólinip shıqpaydı.

Ótkizgishlik toǵı hám awısıw toǵı menen bir qatarda Maksvell ótkizgishlik toǵı menen awısıw toǵınıń geometriyalıq qosındısınan turatuǵın **u tolıq toq** túsiniǵın kirgizdi:

$$\mathbf{u} = \mathbf{i} + \mathbf{i}_{aw}. \quad (4)$$

Tolıq toqtıń barlıq waqıtta tuyıq bolatuǵınlıǵın kórsetiwge boladı. Biz qarap ótken mısalda terbelislerdiń jıyılıǵı júdá úlken emes dep boljandı. Bunday jaǵdayda tolıq toqtıń tuyıq ekenligi mınaday ápiwayı tallawlardan kelip shıǵadı: astarlardı tutastıratuǵın sımlarda tolıq toqtı ótkizgishlik toǵına teń dep esaplawǵa boladı; astarlardıń arasında tolıq toq awısıw toǵına teń; astarlardıń betiniń qasında (1)- hám (2)-teńlikler boyınsha awısıw toǵınıń tıǵızlıǵı hám ótkizgishlik toǵınıń tıǵızlıǵı birdey hám birdey baǵıtta bolǵanlıqtan, betlerdiń qasında tolıq toq úziliske túspeydi.

Qatań túrde aytqanda awısıw toǵı ótkizgishtiń ishinde de nolge teń emes. Onıń shaması bilayınsha bahalawǵa boladı:

$$\mathbf{i}_{aw} = \frac{\dot{\mathbf{D}}}{4\pi} = \frac{\varepsilon \dot{\mathbf{E}}}{4\pi}.$$

Dáwirli razryad ushın elektr kernewligi waqıttıń dáwirli funkciyası boladı: $E = E_0 \sin \omega t$, onıń waqt boyınsha tuwındısı mınaǵan teń: $\dot{E} = E_0 \cos \omega t$. Bunnan awısıw toǵı i_{aw} mınaǵan teń:

$$i_{aw} = \frac{1}{4\pi} \varepsilon \omega E_0 \cos \omega t.$$

Ótkizgishlik toǵınıń tıǵızlıǵı kernewlik E arqalı Om nızamı boyınsha ańǵartıladı:

$$i = \sigma E = \sigma E_0 \sin \omega t.$$

Bul teńlikte σ - ótkizgishtiń ótkizgishligi.

Awısıw toǵı menen ótkizgishlik toǵınıń tıǵızlıqlarınıń amplitudalarınıń qatnası mınaǵan teń:

$$\frac{i_{aw}}{i} = \frac{\omega \varepsilon}{4\pi \sigma}.$$

Metall ótkizgishlerde σ nıń shaması $10^{17} CGSE$ ge teń; janapay ólshewlerdiń tiykarında metallardıń dielektriklik turaqlısınıń mánisi 10 nan úlken emes. Bunnan $\omega \cong 10^{-7} \text{ sek}^{-1}$ ushın $\frac{\omega \varepsilon}{\sigma} = -10^{-9}$. Bunnan metall ótkizgishler ushın ótkizgishlik toǵınıń qasında awısıw toǵın esapqa alımaǵa boladı.

§ 243. Elektromagnit maydanı. Ótken paragrafta keltirilgen Maksvelldiń gipotezası boyınsha awısıw toǵı da ótkizgishlik toǵı sıyaqlı magnit maydanın payda etedi. Biraq, tıǵızlıǵı

$$\mathbf{i}_{aw} = \frac{1}{4\pi} \dot{\mathbf{D}}$$

shamasına teń awısıw toǵı elektr indukciyası vektorı $\mathbf{D}$ nıń tuwındısı nolge teń bolmaǵan jaǵdayda, yaǵnıy waqtqa baylanıslı ózgeretuǵın elektr maydanı bar bolǵan jaǵdayda ǵana payda boladı. Solay etip, biz mınaday nátiyjege kelemiz: qálegen waqt boyınsha ózgeretuǵın elektr maydanı magnit maydanınıń bar bolıwı menen baylanıslı.

Elektrostatikalıq maydan, yaǵnıy bir birine salıstırǵanda hám shaması jaǵınan ózgermeytuǵın elektr zaryadlarınń maydanı tek elektr zaryadlarına tásir etedi; hesh qanday magnit tásirine ushıramaydı. Biraq, eger zaryadlar bir birine salıstırǵanda qozǵalǵanda yamasa olardıń shamaları ózgeretuǵın bolsa, onda olar payda etken elektr maydanı da ózgeredi, bunday jaǵdayda elektr tásiрі menen bir qatarda magnitlik tásir de júzege keledi.

Dara jaǵdayda teń ólshewli úlkeyetuǵın (yamasa kemeyetuǵın) elektr maydanın kóz aldığa elesletiwge boladı. Bunday jaǵdayda awısıw toǵı turaqlı bolǵan hám ol turaqlı magnit maydanın payda etken bolar edi. Biraq, is júzinde ózgermeli elektr maydanı barlıq waqıtta waqt boyınsha alıńǵan tuwındıǵa iye boladı, yaǵnıy ózgermeli awısıw toǵın payda etedi. Bunnan payda bolǵan magnit maydanınıń waqt boyınsha ózgermeli ekenligi kelip shıǵadı. Solay etip, ulıwma aytqanda, ózgermeli elektr maydanı menen toltırılǵan keńislik bir waqıtta ózgermeli magnit maydanı menen

de tolğan.

Bunnan keyingi tallawlar ózgermeli magnit maydanınıń óz gezeginde elektr maydanınıń payda bolıwına alıp keletuǵınlıǵın kórsetedi.

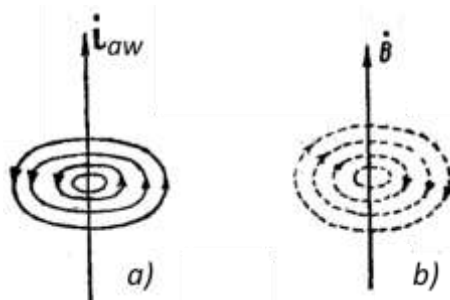
Meyli, waqıt boyınsha ózgermeli magnit maydanı indukciya vektori $\mathbf{B}$ hám onıń tuwındısı $d\mathbf{B}/dt$ menen táriyiplenetuǵın bolsın. Bul vektordıń waqıt boyınsha tuwındısı $\dot{\mathbf{B}}$ arqalı belgileybiz. Usı maydanda qozǵalmaytuǵın ótkiziwshi kontur jaylasqan dep boljayıq. Bunday jaǵdayda magnit indukciyası vektori $\mathbf{B}$ nıń ózgermeli bolıwına baylanıslı usı kontur menen sheklengen maydan arqalı ótetuǵın magnit indukciyasınıń aǵısı Φ ózgeriske ushıraydı hám konturda indukciyanıń $\mathcal{E}_i$ e.q.kúshi payda boladı. Faradey nızamı boyınsha bul e.q.kúshi $\mathcal{E}_i$ diń shaması aǵıstan waqıt boyınsha alınǵan tuwındı bolǵan $d\Phi/dt$ shamasına teń, yaǵnıy biz qarap atırǵan jaǵdayda (kontur qozǵalmaydı) indukciya vektorınan waqıt boyınsha alınǵan tuwındı $\dot{\mathbf{B}}$ menen anıqlanadı. Ótkizgishtegi e.q.kúshiniń payda bolıwı onda elektr kúshiniń payda bolǵanlıǵın ańǵartadı. Bul kúsh erkin zaryadlardı belgili baǵıtta qozǵalıwǵa májbúrleydi. Demek, biz mınaday juwmaqqa kelemiz: waqıtqa baylanıslı ózgeretuǵın magnit maydanınıń bolıwı ótkizgish jaylasqan oblastta elektr kúshiniń payda bolıwına alıp keledi. Bul nátiyjeni ulıwmalastırıp, Maksvell *keńisliktiń barlıq noqatlarında bul orınlarda ótkizgishtiń barı yamasa joǵınan ǵárezsiz waqıtqa baylanıslı ózgeretuǵın magnit maydanınıń elektr maydanın payda etedi degen jaǵdaydı ayttı*. Maksveldiń kóz-qarasları boyınsha, e.q.kúshi payda bolatuǵın ótkizgish elektr kúshleri ózin kórsetetuǵın obekt bolıp xızmet etedi.

Solay etip, biz mınaday juwmaqtı shıǵaramız: *waqıt boyınsha ózgeretuǵın qálegen magnit maydanı elektr maydanınıń bar bolıwı menen baylanıslı*.

Turaqlı magnit maydanı, yaǵnıy bir birine salıstırǵanda qozǵalmaytuǵın ótkizgishler arqalı ótetuǵın turaqlı toqlardıń maydanı yamasa bir birine salıstırǵanda qozǵalmaytuǵın magnitlerdiń maydanı tek toqlarǵa yamasa magnitlerge ǵana tásir etedi; qozǵalmaytuǵın elektr zaryadlarına olar hesh qanday tásir etpeydi. Biraq, eger magnit maydanı waqıt boyınsha ózgeretuǵın bolsa, onda magnit tásir menen bir qatarda elektrlik tásir de payda boladı.

340-súwret.

i_{aw} awısıw toǵınıń dógeresinde magnit kernewliginiń hám $\dot{\mathbf{B}}$ vektorınıń dógeresinde elektr kernewliginiń koncentrik dóńgelek sıziqlarınıń payda bolıwı.



Is júzinde bizler barlıq waqıtta tek magnit indukciyası vektori $\mathbf{B}$ ózgeretuǵın magnit maydanına ǵana iye bolmay, onnan waqıt boyınsha tuwındı $\dot{\mathbf{B}}$ de ózgeretuǵın magnit maydanına iye bolamız. Biraq, bunday jaǵdayda ózgermeli elektr maydanı da payda boladı. Bunnan, ulıwma aytqanda, ózgermeli magnit maydanı menen tolǵan keńisliktiń ózgermeli elektr maydanı menen de tolǵan ekenligi kelip shıǵadı.

Ózgermeli bolǵan maydanlardıń ekewi de - elektr hám magnit maydanları bir birinen baylanısqan hám *elektromagnit maydanın* payda etedi.

Elektromagnit maydanı quynlıq xarakterge iye. Eger qanday da bir $\mathbf{A}$ vektorınıń qasında oǵan sheksiz jaqın eki noqat bar bolsa hám usı eki noqattaǵı $\mathbf{A}$ vektori qarama-qarsı baǵıtqa iye bolatuǵın bolsa, onda sol $\mathbf{A}$ vektorınıń maydanın quynlıq dep aytadı. Mısalı, suıqlıqta yamasa gazde quyn payda bolǵanda quynnıń kósheriniń qasında kósherdiń eki qarama-qarsı tárepinde qozǵalısqan qarama-qarsı baǵıtlarda júzege keledi.

Dáslep magnit maydanınıń quynlıq xarakterin qaraymız. Awısıw toǵı tárepinen payda

etiletuǵın magnit maydanı ótkizgishlik toǵınıń magnit maydanın esaplaǵanday formulanın járdeminde esaplanadı (193-paragraf). Bunday jaǵdayda ótkizgishlik toǵınıń tıǵızlıǵı awısıw toǵınıń tıǵızlıǵı menen almasırladı. Awısıw toqlarınıń magnit maydanında magnit kernewliginiń sızıqları tap sonday bolǵan ótkizgishlik toqlarınıń magnit maydanınıń kernewliginiń sızıqlarınday boladı, yaǵnıy olar barlıq waqıtta tuyıq hám toq sızıqların óziniń ishine aladı. Meyli, bazı bir noqatta awısıw toǵınıń tıǵızlıǵı vektorı $\mathbf{i}_{aw}$ strelkası menen kórsetiletuǵın bolsın (340-súwret). $\mathbf{i}_{aw}$ vektorınıń qasındaǵı kernewliktiń magnit sızıqları koncentrik sheńberlerdi payda etedi, $\mathbf{i}_{aw}$ vektorına jaqınlasqan sayın olardıń radiusları kishi boladı. Eger shekte biz $\mathbf{i}_{aw}$ vektorına sheksiz jaqın jaylasqan noqatlarǵa ótsek, onda magnit kernewliginiń sızıqlarınıń qıysıqlıǵı sheksiz úlken boladı hám, sonlıqtan, magnit maydanınıń kernewligi qarama-qarsı baǵıtlangan bir birine sheksiz jaqın jaylasqan eki noqattı barlıq waqıtta tabıwǵa boladı.

Ózgermeli magnit maydanı tárepinen payda etiletuǵın elektr maydanı da quynlıq xarakterge iye boladı. Meyli, bazı bir noqattaǵı magnit indukciyası vektorınıń waqıt boyınsha ózgeriwi $\mathbf{\dot{B}}$ strelkası menen belgilengen bolsın (340-b súwret). Eger biz $\mathbf{\dot{B}}$ nı tegisligi usı vektorǵa perpendikulyar bolǵan ótkizgish kontur menen qorshasaq, onda bul konturda payda bolǵan e.q.kúshi Lenc qaǵıydası boyınsha, 340-súwrette kórsetilgendey, punktir sızıqlar boyınsha baǵıtlangan. Hár bir noqattı e.q.kúshi berilgen noqattan $\mathbf{\dot{B}}$ vektorınıń baǵıtına túsirilgen normalǵa perpendikulyar. Aytalǵanlar boyınsha, indukciyanıń e.q.kúshi elektr maydanınıń bar bolıwınıń saldarınan júzege keledi. Bul elektr maydanınıń kernewligi $\mathbf{E}$ hár bir noqatta e.q.kúshindey bolıp baǵıtlangan. Demek, $\mathbf{E}$ elektr kernewligi sızıqları $\mathbf{\dot{B}}$ vektorınıń átirapında koncentrik sheńberlerdi payda etedi. $\mathbf{\dot{B}}$ vektorına sheksiz jaqın bolǵan noqatlar ushın sheńberlerdiń kıysıqlıǵı sheksiz úlken hám, demek, elektr kernewlikleri bir birine qarama-qarsı bolǵan qońsılas noqatlardıń jupları bar boladı. Solay etip, ózgermeli magnit maydanı tárepinen payda etilgen elektr maydanı quynlıq xarakterge iye. Onıń kernewlik sızıqları barlıq waqıtta tuyıq. Usınday ózgesheligi menen ol qozǵalmaytuǵın elektr zaryadlarınıń kernewlik sızıqları tuyıq bolmaǵan elektrostatikalıq maydanınan úlken ayırmaǵa iye: ol sızıqlar bir zaryadlarda baslanadı hám ekinshi zaryadlarda tamam boladı. Solay etip, elektr maydanı potenciallıq (elektrostatikalıq maydan) bolıwı da, quynlıq bolıwı da (elektromagnit maydanı) múmkin. Magnit maydanı barlıq waqıtta quynlıq xarakterge iye.

129-paragrafta biz elektrostatikalıq maydanniń potenciallıq xarakteriniń matematikalıq ańlatpası sıpatında

$$\oint E_l dl = 0 \quad (1)$$

qatnasınıń xızmet etetuǵınlıǵın kórdik. Bul integral tuyıq kontur boyınsha tarqalǵan.

Magnit maydanınıń quynlıq xarakterini 198-paragraftaǵı

$$\oint H_l dl = 4\pi I \quad (2)$$

qatnası menen beriledi.

Bul qatnasqa basqa túrdi beriwege boladı. I shaması kontur tárepinen óziniń ishine alınatuǵın S beti arqalı ótetuǵın toqtı beredi. $\oint H_l dl$ integralı usı kontur boylap alınadı. Eger biz i_n arqalı S betiniń maydanına normal bolǵan toqtıń qurawshısın belgilesek, onda, álbette, I dı bılayınsha kórsetiwge boladı:

$$I = \int_S i_n dS.$$

Bul ańlatpada integral barlıq S maydanına tarqatılǵan. Bunnan (2)-ańlatpa mınaday túрге enedi:

$$\oint H_l dl = 4\pi \int_S i_n dS. \quad (2a)$$

Maksvelldiń gipotezası boyınsha ulıwma jaǵdayda (2a) qatnasınıń oń bóliminde toqtıń tolıq tıǵızlıǵınıń

turıwı kerek, al ol (tolıq tıǵızlıq) ótkizgishlik toǵınıń tıǵızlıǵı $\mathbf{i}$ menen awısıw toǵınıń tıǵızlıǵı $\frac{1}{4}\dot{\mathbf{D}}$ nıń qosındısınan turadı. Bunnan eń aqırında mınaday ańlatpanı alamız:

$$\oint H_l dl = \int_S (4\pi i_n + \dot{\mathbf{D}}_n) dS. \quad (3)$$

Eger $\oint H_l dl$ integral betti óziniń ishine alatuǵın kontur boyınsha alınatuǵın bolsa (bul bet boyınsha ótetuǵın tolıq toq nolge teń emes), onda (3)-qatnastırnıń oń tárepinde turǵan integral nolge teń emes hám, demek,

$$\oint H_l dl \neq 0.$$

Bul magnit maydanınıń quynlıq xarakterge iye ekenligin tastıyıqlaw menen teńdey kúshke iye (eger keńisliktiń bazı bir bóliminde tolıq toq nolge teń bolmasa, onda keńisliktiń bul bóliminde magnit maydanın potencial menen táriyiplewge boladı). Tap usınday qatnastırnı quynlıq elektr maydanı ushın da orınlı ekenligin kórsetemiz. SHında da, ózgermeli magnit maydanı oblastında tuyıq ótkizgish kontur jaylasqan dep boljayıq. Bunday jaǵdayda Faradeydiń indukciya nızamı boyınsha bul konturda indukciyanıń e.q.kúshi payda boladı:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Bul ańlatpada Φ kontur menen sheklengen S maydanı arqalı ótetuǵın magnit indukciyasınıń aǵısı. B_n arqalı magnit indukciyası vektorınıń S betine normal qurawshısın belgilep, mınaǵan iye bolamız:

$$\Phi = \int_S B_n dS.$$

Bunnan

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d}{dt} \int_S B_n dS = -\int_S \dot{\mathbf{B}}_n dS \quad (4)$$

ańlatpasına iye bolamız. Bul ańlatpada $\dot{\mathbf{B}}_n$ shaması B_n qurawshısınan waqıt boyınsha alınǵan tuwındını ańǵartadı, al integrallaw barlıq S maydanına tarqatıladı.

Joqarıda ayılǵanlar boyınsha, e.q.kúshitiń kernewliktiń cirkulyaciyası sıpatında kórsetiliwi múmkin, yaǵnıy $\mathcal{E}_i$ e.q.kúshi mınaǵan teń:

$$\mathcal{E}_i = \oint E_l dl.$$

Bul ańlatpadaǵı integral qarap atırılǵan barlıq konturǵa tarqatıladı.

Demek, (4)-ańlatpa mınaday túrge iye boladı eken:

$$\oint E_l dS = -\int_S \dot{\mathbf{B}}_n dS. \quad (5)$$

Bul paragraftıń tiykarǵı tekstinde bayanlanǵan Maksvell gipotezası boyınsha, biz qarap atırǵan ózgermeli magnit maydanında ótkizgish konturdıń bar bolıwı yamasa joq bolıwınan gárezsiz (5)-qatnas orın aladı; usınday kontur bolmaǵan jaǵdayda (5)-qatnastırnı shep tárepindegi integral oyda alınǵan qálegen tuyıq kontur boyınsha alınadı.

(5)-qatnas (3)-qatnasqa uqsas bolıp, ózgermeli magnit maydanınıń bar bolıwınıń nátiyjesinde payda bolǵan elektr maydanınıń quynlıq xarakterge iye ekenligin ańǵartadı. Magnit maydanı bolmaǵanda yamasa magnit maydanı turaqlı bolǵan jaǵdayda (yaǵnıy $\dot{\mathbf{B}}_n = 0$ teńligi orınlansa) (5)-ańlatpa (1)-ańlatpaǵa ótedi; bunday jaǵdayda $\mathbf{E}$ elektr maydanı qozǵalmaytuǵın hám shaması boyınsha ózgermeytuǵın elektr zaryadlarınń bar bolıwınıń nátiyjesinde payda boladı hám bul maydan potenciallıq bolıp tabıladı.

§ 244. Maksvell teńlemeleri. Elektromagnit maydanların dál esaplaw Maksvell tárepinen usınılǵan hám elektromagnit qubılıslardıń tábiyatı haqqındaǵı joqarıda keltirilgen ideyalarǵı esapqa alıwǵa tiykarlanǵan teńlemelerdiń járdeminde ámelge asırıladı. Maksvell teńlemeleri elektromagnit maydanın táriyipleytuǵın shamalardıń koordinatalar hám waqıt boyınsha tuwındıların baylanıstıratuǵın differenciallıq teńlemeler bolıp tabıladı. Biz Maksvell teńlemelerine

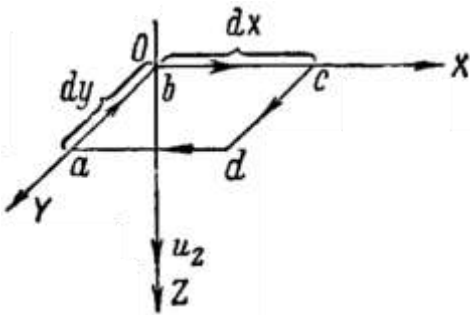
alıp keletuǵın ápiwayılastırılǵan esaplawlardı qaraymız.

Maksvell teńlemeleri eki sistemaǵa bólinedi. Birinshi sistema magnit kernewligi vektorınıń proekciyalarınıń tuwındıların awısıw hám ótkizgishlik toqlarınıń tıǵızlıqlarınıń proekciyaları menen baylanıstıradı. Maksvell teńlemeleriniń ekinshi sisteması elektr kernewligi vektorınıń proekciyalarınıń tuwındıların magnit indukciyası vektorınıń proekciyalarınıń waqıt boyınsha alıńǵan tuwındıları menen baylanıstıradı.

Dáslep Maksvelldiń teńlemeleriniń birinshi sistemasın alamız. Meyli, waqıttıń bazı bir momentinde keńisliktiń bazı bir kishi oblastındaǵı tolıq toqtıń tıǵızlıǵı $\mathbf{u}$ vektorınıń járdeminde súwretlenetuǵın bolsın. Bul tıǵızlıq ótkizgishlik toǵınıń tıǵızlıǵı $\mathbf{i}$ menen awısıw toǵınıń tıǵızlıǵı bolǵan $\frac{1}{4\pi} \dot{\mathbf{D}}$ shamasınıń qosındısınan turadı. Bunnan

$$\mathbf{u} = \mathbf{i} + \frac{1}{4\pi} \dot{\mathbf{D}} \quad (1)$$

teńligine iye bolamız.



341-súwret.
Maksvell teńlemeleriniń birinshi sistemasın
anıqlawǵa.

Maksvell gipotezası boyınsha eki toq ta, ótkizgishlik toǵı da, awısıw toǵı da magnit maydanınıń payda bolıwında birdey orındı iyeleydi. Usı toqlardıń payda etken magnit maydanın anıqlaw ushın dáslep $\mathbf{u}$ vektorınıń OZ kósherine túsirilgen proekciyasın qaraymız (341-súwret). Toq tárepinen payda etilgen magnit maydanınıń kernewligi barlıq waqıtta toqtıń baǵıtına perpendikulyar bolǵanlıqtan (192-paragrafqa qarańız), toqtıń tıǵızlıǵınıń u_z proekciyası magnit maydanınıń kernewliginiń H_x hám H_y proekciyaları menen ǵana baylanıslı.

OXY tegisliginde jatatuǵın tárepleri dx hám dy bolǵan tuwrı múyeshli $abcd$ kishi konturın alamız. $\mathbf{H}$ tıń usı konturdaǵı cirkulyaciyasın esaplaymız. ab uchastkasında mınaǵan iye bolamız:

$$A_{ab} = -H_y dy.$$

Bul teńlikte H_y shaması ab uchastkası jaylasqan orın ushın anıqlanǵan magnit maydanı $\mathbf{H}$ tıń proekciyası; minus belgisi orın almasıwdıń OY kósherine keri baǵıtta júzege keletuǵınlıǵın kórsetedi.

bc uchastkasında

$$A_{bc} = H_x dx$$

teńligine iye bolamız. Bul teńlikte H_x - bc uchastkası jaylasqan orın ushın H_x proekciyasınıń mánisi.

Bir tekli emes magnit maydanı bolǵan jaǵdayda cd uchastkası jaylasqan uchastkadaǵı H kernewligi ab uchastkasındaǵı kernewlikten ózgeshe boladı hám onı H' arqalı belgileyemiz; bunday jaǵdayda cd uchastkasında

$$A_{cd} = -H'_y dy$$

teńligine iye bolamız. Álbette, H_y proekciyasınıń ab hám cd kesindileriniń arasındadıǵı qashıqlıqtaǵı ósimin $\frac{\partial H_y}{\partial x} \cdot dx$ túrinde kórsetiwge boladı. Bunnan $H'_y = H_y + \frac{\partial H_y}{\partial x} dx$ hám, demek,

$$A_{cd} = \left(H_y + \frac{\partial H_y}{\partial x} dx \right) dy$$

teńligine iye bolamız. Tap sonday jollar menen da ushın

$$A_{da} = -\left(H_x + \frac{\partial H_x}{\partial y} dy\right) dx$$

teńligine iye bolamız. Tuyıq $abcd$ konturı boyınsha tolıq cirkulyaciya mına summaǵa teń:

$$A = -H_y dy H_x dx + \left(H_y + \frac{\partial H_y}{\partial x} dx\right) dx - \left(H_x + \frac{\partial H_x}{\partial y} dy\right) dx.$$

Qawsırmalardı ashıp hám uqsas aǵzalardı qısquartıp, mınanı alamız:

$$A = \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y}\right) dxdy. \quad (2)$$

Ekinshi tárepten cirkulyaciyanıń shaması san mánisi boyınsha $abcd$ maydanı arqalı OZ kósheriniń baǵıtında ótken toqtı 4π ge kóbeytkenge teń (198-paragrafqa qarańız), yaǵnıy

$$A = 4\pi I_z.$$

$abcd$ maydanınıń sheklerinde toqtıń tıǵızlıǵınıń proekciyası u_z ti turaqlı dep esaplap, mınanı alamız:

$$I_z = u_z dxdy.$$

Bunnan mınaday ańlatpa alınadı:

$$A = 4\pi u_z dxdy.$$

(1)-teńlik boyınsha biz u_z ti ótkizgishlik hám awısıw toqlarınıń tıǵızlıqlarınıń qosındısı $i_z + \frac{1}{4\pi} \dot{D}_z$ arqalı albastıra alamız. Bunnan A ushın mınaday teńliktiń orınlı ekenligin tabamız:

$$A = (4\pi i_z + \dot{D}_z) dxdy. \quad (3)$$

(2)- hám (3)-ańlatpalardı salıstırıp,

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = 4\pi i_z + \dot{D}_z$$

ańlatpasına iye bolamız. Tap usınday teńlemelerdi biz tolıq toqtıń tıǵızlıǵınıń basqa u_x hám u_y qurawshıları ushın da ala alamız. Bunnan *Maksvell teńlemeleriniń birinshi sistemasınıń* tómendegidey túrge iye bolatuǵınlıǵın kóremiz:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} &= 4\pi i_x + \dot{D}_x, \\ \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} &= 4\pi i_y + \dot{D}_y, \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} &= 4\pi i_z + \dot{D}_z. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Demek, Maksvell teńlemeleriniń birinshi sisteması ótkizgishlik toǵınıń tıǵızlıǵı $\mathbf{i}$ dı, elektr maydanınıń indukciyası $\mathbf{D}$ nıń waqıt boyınsha tuwındısı hám toqtıń tásirinde payda bolǵan magnit maydanı $\mathbf{H}$ tıń keńisliklik tuwındıların baylanıstıradı eken.

Eger kiretuǵın barlıq shamalar qanday da bir birlikler sistemasında, mısalı barlıǵı elektromagnitlik sistemada ólshenetuǵın bolsa, onda (4)-teńlemeler sisteması durıs boladı. Eger magnit maydanınıń kernewligi $\mathbf{H}$ tı $CGSM$ -birliklerinde, al $\mathbf{i}$ menen $\mathbf{D}$ nı $CGSE$ -birliklerinde ólshese, onda dáslep elektrostatikalıq birliklerden elektromagnitlik birliklerge ótiwge sáykes keletuǵın $1/c$ kóbeymesin kirgiziw kerek boladı. Bunday jaǵdayda Maksvell teńlemeleri mınaday túrge enedi:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} &= \frac{4\pi}{c} i_x + \frac{1}{c} \dot{D}_x, \\ \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} &= \frac{4\pi}{c} i_y + \frac{1}{c} \dot{D}_y, \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} &= \frac{4\pi}{c} i_z + \frac{1}{c} \dot{D}_z. \end{aligned} \right\} \quad (4a)$$

Maksvell teńlemeleriniń birinshi sistemasına elektr indukciyası vektorı $\mathbf{D}$ nı erkin elektr zaryadlarınıń tıǵızlıǵınıń tarqalıwı ρ menen baylanıstıratuǵın teńlemenı qosıw kerek. 144-paragrafta ayılǵanlarǵa baylanıslı, bunday teńleme

$$\frac{\partial D_x}{\partial x} + \frac{\partial D_y}{\partial y} + \frac{\partial D_z}{\partial z} = 4\pi\rho \quad (5)$$

túrine iye.

Elektr indukciyası vektorı $\mathbf{D}$ nıń elektr maydanınıń kernewligi vektorı menen $\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$ qatnası boyınsha baylanısqan ekenligin ańǵamız. Ortalıqtıń magnit sińirgishligi μ Maksvell teńlemeleriniń birinshi

sistemasına kirmeydi. Sebebi toqlar payda etken magnit maydanınıń kernewligi (maydan nolge teń bolmaǵan keńislikti tolıǵı menen toltırıp turatuǵın bir tekli magnetikler ushın) ortalıqtıń magnitlik sıńırǵıshlıǵınan ǵárezli emes (202-paragrafta ayılǵanlarǵa qarańız).

Vektorlıq esaptan Maksvelldiń (4)- yamasa (4a) teńlemeleriniń shep tárepinde turǵan ańlatpalar **H** vektorınıń "quyınıń" qurawshıları bolıp tabıladı; solay etip, Maksvell teńlemeleriniń birinshi sisteması vektorlıq túrde mınaday túrge iye boladı:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{i} + \frac{1}{c} \dot{\mathbf{D}}. \quad (4b)$$

Bul sistemaǵa vektorlıq túrdegi (5)-ańlatpa da kiredi:

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = 4\pi\rho. \quad (5a)$$

Maksvell teńlemeleriniń ekinshi sistemasın Maksvelldiń ózi tárepinen Faradeydiń indukciya nızamına berilgen ulıwmalastırıwdıń tiykarında alamız. 243-paragrafta keltirip ótilgenindey, Maksvelldiń ulıwmalastırıwı boyınsha elektr kúshleri ótkizgishten soǵılǵan konturdıń bar yamasa joq ekenliginen ǵárezsiz magnit indukciyası vektorı **B** ózgergende payda boladı. Tuyıq kontur boyınsha **E** vektorınıń cirkulyaciyası san mánisi boyınsha kontur tárepinen óz ishine alınatuǵın maydan arqalı magnit indukciyasınıń waqıt boyınsha ózgerisine teń [243-paragraftaǵı (5)-formula]. Maksvell teńlemeleriniń birinshi sistemasın anıqlaǵanda qaraǵanıımızday etip kishi tuwrı múyeshli kontur ushın usı cirkulyaciyanı esaplaymız.

Meyli waqıttıń bazı bir momentinde keńisliktiń bazı bir kishi oblastındaǵı magnit maydanınıń ózgeriwi **B** vektorı menen táriyiplenetuǵın bolsın. Usı ózgeriwshi magnit maydanı tárepinen payda etilgen elektr maydanın anıqlaw ushın dáslep **B** vektorınıń OZ kósherine túsirilgen proekciyasın qaraymız (342-súwret).

Indkuciyalanǵan e.q.kúshtiń shaması usı konturdıń maydanına perpendikulyar bolǵan magnit indukciyası vektorınıń qurawshısı tárepinen anıqlanatuǵın bolǵanlıqtan, $\dot{B}_z$ proekciyası elektr maydanınıń kernewliginiń E_x hám E_y proekciyalrı menen ǵana baylanıslı boladı.

OXY tegisliginde jatırǵan, tárepleri dx hám dy bolǵan tuwrı múyeshli $abcd$ konturın alamız. **E** niń usı kontur boyınsha cirkulyaciyasın esaplaymız:

$$A_{ab} = -E_y dy.$$

Bul teńlikte E_y - elektr maydanınıń kernewligi **E** niń ab uchastkası turǵan orın ushın anıqlanǵan mánisi; minus belgisi orın almasıwdıń OY kósherine keri baǵıtta júzege keletuǵınlıǵın ańǵartadı.

Tap soǵan uqsas bc uchastkası ushın mınanı tabamız

$$A_{bc} = E_x dx.$$

Maksvell teńlemeleriniń birinshi sistemasın anıqlaǵanda magnit kernewliginiń cirkulyaciyasın esaplaǵanda tallanımızday etip tallaw jolı menen cd hám da uchastkalrı ushın sáykes

$$A_{cd} = \left(E_y + \frac{\partial E_y}{\partial x} dx \right) dy, \quad A_{da} = - \left(E_x + \frac{\partial E_x}{\partial y} dy \right) dx$$

ańlatpaların alamız. Bunnan $abcda$ tuyıq konturı boyınsha tolıq cirkulyaciyanıń mınaǵan teń ekenligin kóremiz:

$$A = \left(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right) dx dy. \quad (6)$$

Ekinshi tárepten, cirkulyaciya $abcda$ konturı arqalı ótetuǵın magnit indukciyasınıń aǵısınan waqıt boyınsha alınǵan tuwındıǵa teń:

$$A = - \frac{\partial \Phi}{\partial t}.$$

Biraq, $abcda$ konturı arqalı ótetuǵın Φ aǵısı $B_z dx dy$ shamasına teń bolǵanlıqtan,

$$- \frac{\partial \Phi}{\partial t} = - \dot{B}_z dx dy. \quad (7)$$

teńligi orınlı boladı. (6)- hám (7)-ańlatpalardı salıstırıp arqalı mınaday teńlikti alamız:

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = - \dot{B}_z.$$

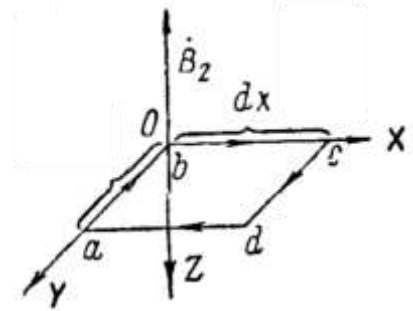
Tap usınday jollar menen indukciya vektorınıń basqa $\dot{B}_x$ hám $\dot{B}_y$ qurawshıları bolǵan teńlemelerdi alamız. Eń aqırında Maksvell teńlemeleriniń ekinshi sistemasına iye bolamız:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} &= -\dot{B}_x, \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} &= -\dot{B}_y, \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} &= -\dot{B}_z. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Solay etip, Maksveldiń teńlemeleriniń ekinshi sisteması magnit indukciyası vektorı **B** nıń qurawshılarının waqıt boyınsha alıńǵan tuwındılar menen magnit maydanınıń ózgeriwiniń saldarınan payda bolǵan elektr maydanınıń kernewligi **E** nıń qurawshılarının keńisliklik koordinatalar boyınsha alıńǵan tuwındılardı baylanıstıradı eken.

342-súwret.

Maksveldiń teńlemeleriniń ekinshi sistemasın alıwǵa.



(8)-teńlemeler sisteması usı sistemaǵa kiretuǵın barlıq shamalar CGSM-sistemasında ólshengen jaǵdayda durıs boladı. Eger elektr maydanınıń kernewligi E ni CGSE-birliklerinde, al magnit indukciyası B nı CGSM-birliklerinde ólshesek, onda oń tárepte $1/c$ kóbeytiwshisin kirgiziw kerek boladı:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} &= -\frac{1}{c} \dot{B}_x, \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} &= -\frac{1}{c} \dot{B}_y, \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} &= -\frac{1}{c} \dot{B}_z. \end{aligned} \right\} \quad (8a)$$

Maksveldiń teńlemeleriniń ekinshi sistemasına indukciya vektorınıń sıızqlarınıń barlıq waqıtta tuyıq ekenligine sáykes keletuǵın teńlemeni qosıw kerek. 200-paragrafta ayılǵanday, bul teńleme mınaday túrge iye boladı:

$$\frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

Vektorlıq túrde Maksvell teńlemeleriniń ekinshi sisteması (8a) hám (9)-qatnas mınaday túrge enedi:

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \dot{\mathbf{B}}, \quad (8b)$$

$$\text{div } \mathbf{B} = 0. \quad (9a)$$

Maksvell teńlemeleriniń birinshi hám ekinshi sistemalarınıń birgelikte sheshiliwi kerek. Teńlemelerdiń birinshi sisteması toqlardıń berilgen **i** tıǵızlıqları hám elektr zaryadlarınıń berilgen kólemlik tıǵızlıqları ρ boyınsha olar payda etken magnit maydanın anıqlawǵa múmkinshilik beredi; ekinshi sistema bolsa waqıt boyınsha ózgeretuǵın magnit maydanı tárepinen payda etiletuǵın quyn tárizli elektr maydanın anıqlawǵa múmkinshilik beredi. Bunday jaǵdayda **H** hám **B** vektorlarınıń arasındaǵı baylanıstır

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$

qatnasınıń járdeminde beriletuǵınlıǵın ańǵarıw kerek. Bul teńlikte μ - ortalıqtır magnit sińirgishligi. **E** hám **D** vektorlarınıń arasındaǵı baylanıs

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$$

qatnası boyınsha anıqlanadı. Bul teńlikte ε - dielektriklik turaqlı.

Ortalıq bir tekli bolmaǵan jaǵdayda 144-paragrafta **D** ushın, al 206-paragrafta **B** ushın ortalıqtır ayırım uchastkaları ushın alıńǵan shegaralıq shártlerdiń orınlanıwı kerek:

$$D_{1n} = D_{2n}, \quad \frac{D_{1t}}{\varepsilon_1} = \frac{D_{2t}}{\varepsilon_2}, \quad B_{1n} = B_{2n}, \quad \frac{B_{1t}}{\mu_1} = \frac{B_{2t}}{\mu_2}.$$

Bul ańlatpalarda n hám t indeksleri sáykes vektordıń normal hám tangensiallıq qurawshılarınıń alınatuǵınlıǵın kórsetedi.

Eń aqırında, eger ortalıq ótkizgishlikke iye bolatuǵın bolsa, onda toqtırn tıǵızlıǵı $\mathbf{i}$ Om nızamın qanaatlandıratuǵının atap ótemiz:

$$\mathbf{i} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{E}').$$

Bul teńlikte σ - ortalıqtırn ótkizgishligi, al $\mathbf{E}$ - táreplik derekler tárepinen payda etilgen maydannıń kernewligi.

§ 245 Maksvell-Lorenc teńlemeleri. Maksvell teoriyasında zattırn qásiyetleri úsh konstantanıń járdeminde táriyiplenedi: dielektriklik turaqlı ε , magnitlik sińirgishlik μ hám ótkizgishlik σ . Ótkizgishlikteń magnitlik analogı joq, sebebi hesh qanday magnit zaryadları joq. Elektr zaryadları bolsa olardıń tarqalıwınıń tıǵızlıǵı menen beriledi.

Elektromagnit maydanı usı zaryadlardıń bolıwınıń hám olardıń qozǵalıwınıń sebebinen payda boladı. Demek, Maksvell teoriyası zattırn atomlıq qurılısın qarawǵa kirmeydi hám onıń elektromagnit maydangá tásin ε, μ hám σ konstantalarınń járdeminde formallıq túrde qaraydı. Zattırn strukturasını esapqa alıw Lorenciń elektronlıq teoriyasında berilgen. Lorenc teoriyasınıń kóz-qarası boyınsha zat tárepinen iyelengen keńislik bos keńislikten usı keńislikte oń hám teris zaryadlardıń bar bolıwı menen ayrıladı. Elementar teris zaryadlar elektronlar, al elementar oń zaryadlar atomlardıń yadroları bolıp tabıladı. Elektronlar yadrolar menen birge neytral atomlardı yamasa ionlardı payda etedi. Atomlar menen ionlardıń molekulalardıń quramına kiriwi múmkin. Elektronlar atomlardıń ishinde tuyıq orbitalar boyınsha qozǵaladı, olar atomlar menen molekulalardıń ishinde awısıp, olardıń polarizaciyasın júzege keltiredi. Ótkizgishlerde elektronlardıń bir bólimi erkin halda boladı hám olar orın almasıp, ótkizgishlik toǵın payda etedi. Elektr hám magnit maydanları usı zaryadlar hám olardıń qozǵalıwı tárepinen payda etiledi.

Zaryadlardıń mikroskopiyaqlıq ólshemlerine baylanıslı maydanlar atomlıq ólshemler menen salıstırǵanday qashıqlıqlarda noqattan noqatqa ótkende ózgeredi. Mısalı, ayırım elektron yamasa ionnıń qasında elektr maydanı júdá úlken, al qorısıl eki elektronnıń arasında maydannıń nolge teń bolıwı múmkin. Solay etip, Lorenc teoriyasında qaralatuǵın elektr hám magnit maydanları mikroskopiyaqlıq xarakterge iye boladı. Bul maydanlardıń kernewliklerin Maksvell teoriyasında qatnasatuǵın makroskopiyaqlıq, ortashalastırılın shamalardan ayırıw ushın $\mathbf{e}$ hám $\mathbf{h}$ arqalı belgileymiz. Bul maydanlar ayırım zaryadlardıń arasındaǵı keńisliklerde payda boladı, yaǵnıy Lorenc teoriyası shın mánisinde boslıqtaǵı maydanlardı qaraydı. Sonlıqtan Lorenc teoriyasında Maksveldiń teńlemelerine kiretuǵın vektorlardıń eki jubı bolǵan $\mathbf{E}, \mathbf{B}, \mathbf{H}$ hám $\mathbf{D}$ vektorlarınıń ornına vektorlardıń tek bir jubı ǵana qaraladı: elektr maydanınıń kernewligi $\mathbf{e}$ hám magnit maydanınıń kernewligi $\mathbf{h}$.

Lorenciń elektronlıq teoriyasınıń kóz-qarası boyınsha qálegen elektr toǵı elementar zaryadlarınń qozǵalıslarınıń saldarınan payda bolǵan konvekciyaqlıq toq bolıp tabıladı. Bul toqtırn tıǵızlıǵı $\sum \rho \mathbf{v}$ shamasına teń, bul ańlatpada $\rho \mathbf{v}$ - bir elementar zaryad payda etken toq bolıp tabıladı, al summa barlıq elementar zaryadlarǵa tarqaladı (ρ bir zaryadtırn tıǵızlıǵı bolıp tabıladı, zaryadtan tista onıń mánisi nolge teń, al $\mathbf{v}$ - onıń tezliginiń vektorı).

Solay etip, zaryadlardıń arasındaǵı bos keńislik ushın Maksvell teńlemeleri mınaday túrge enedi:

$$\text{rot } \mathbf{h} = \frac{4\pi}{c} \sum \rho \mathbf{v} + \frac{1}{c} \dot{\mathbf{e}} \quad (1)$$

$$\text{div } \mathbf{e} = 4\pi \sum \rho, \quad (2)$$

$$\text{rot } \mathbf{e} = -\frac{1}{c} \dot{\mathbf{h}} \quad (3)$$

$$\text{div } \mathbf{h} = 0 \quad (4)$$

Usınday túrde jazılǵan teńlemelerdi *Maksvell-Lorenc teńlemeleri* dep ataydı. Bul teńlemelerge kiretuǵın $\mathbf{e}$ hám $\mathbf{h}$ shamaların tikkeley ólsheuge bolmaydı, sebebi biz atomlardıń arasındaǵı hám atomlardıń ishindegi kernewliklerdi ólsheymaymız. Sonlıqtan, ólshenetuǵın shamalarǵa ótiw ushın (1)-(4) teńlemelerge kiretuǵın shamalardıń ortasha mánislerin tabıw kerek. $\mathbf{e}$ hám $\mathbf{h}$ kernewliklerin, zaryadlardıń tıǵızlıǵı bolǵan $\sum \rho$ shamasın hám $\sum \rho \mathbf{v}$ toǵın ortashalawdı ayırım atomlardıń kólemlerine salıstırǵanda úlken bolǵan, biraq ortashalawdıń sheklerinde barlıq makroskopiyaqlıq shamalar sezilerliktey ózgerislerge ushıramaytuǵınday dárejede kishi keńislikte ótkeriw kerek; bunday ortashalawdı atomlardıń ishindegi qozǵalıslardıń dáwirine salıstırǵanda úlken waqıt aralıqları ushın islenedi (waqıttırn usınday aralıǵında makroskopiyaqlıq shamalardıń ózgerip úlgermewi ushın).

Usınday jollar menen ortashalangán shamalardı $\bar{\mathbf{e}}$, $\bar{\mathbf{h}}$ $\overline{\Sigma\rho}$ hám $\overline{\Sigma\rho\mathbf{v}}$ arqalı belgileymiz. Bunday jaǵdayda Maksvell-Lorenc teńlemeleri minaday túrge enedi:

$$\text{rot } \bar{\mathbf{h}} = \frac{4\pi}{c} \overline{\Sigma\rho\mathbf{v}} + \frac{1}{c} \dot{\bar{\mathbf{e}}} \quad (1a)$$

$$\text{div } \bar{\mathbf{e}} = 4\pi \overline{\Sigma\rho}, \quad (2a)$$

$$\text{rot } \bar{\mathbf{e}} = -\frac{1}{c} \dot{\bar{\mathbf{h}}} \quad (3a)$$

$$\text{div } \bar{\mathbf{h}} = 0 \quad (4a)$$

Bul teńlemeler Maksvell teńlemelerine sáykes keliwi kerek.

Eger

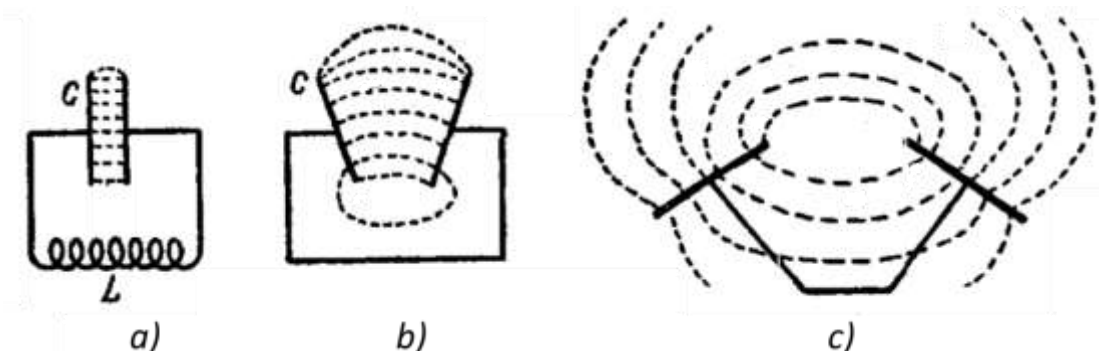
$$\mathbf{E} = \bar{\mathbf{e}}, \mathbf{B} = \bar{\mathbf{h}}$$

teńlikleri orınlı bolsa, onda (Za) hám (4a) teńlemeleriniń Maksvell teńlemeleriniń ekinshi sistemasına sáykes keletuǵınlıǵın ańsat kóriwge boladı [244-paragraftaǵı (8b) hám (9a) teńlemeler].

Bunnan 145- hám 208-paragraflarda ayılǵanlarǵa sáykes mınanı alamız: elektr maydanınıń makroskopiyalıq kernewligi $\mathbf{E}$ elektr maydanınıń mikroskopiyalıq kernewligi $\bar{\mathbf{e}}$ niń ortashalangán mánisi, al magnit indukciyası $\mathbf{B}$ bolsa magnit maydanınıń mikroskopiyalıq kernewligi $\bar{\mathbf{h}}$ tıń ortashalarǵan mánisi bolıp tabıladı. Bul burınraq atap ótilgen jaǵdayǵa sáykes keledi: dielektrik bar bolǵan jaǵdayda elektr maydanınıń kernewligi $\mathbf{E}$ dielektriklik ortalıqqa kirgizilgen "sırtqı" zaryadlar tárepinen de, ortalıqtıń óziniń polyarizaciyası tárepinen de ańqlanadı; magnetik bolǵan jaǵdayda magnit indukciyası $\mathbf{B}$ toq tárepinen de, ortalıqtıń "magnitlengenligi" tárepinen de ańqlanadı. Bunnan elektr maydanınıń kernewligi $\mathbf{E}$ menen magnit indukciyası $\mathbf{B}$ niń arasındadı analogiya jáne bir ret kórinedi.

Biraq, $\bar{\mathbf{e}}$ hám $\bar{\mathbf{h}}$ vektorların $\mathbf{E}$ hám $\mathbf{B}$ vektorları menen joqarıda keltirilgende salıstırıwda (1a) hám (2a) teńlemeleriniń Maksvelldiń teńlemeleriniń birinshi sistemasına sáykes kelmeytuǵınday bolıp kórinedi. Biraq tereńirek qarasaq, onda sáykes keliwdiń orın alatuǵınlıǵın kóriwge boladı. Onıń ushin, birinshiden, $\overline{\Sigma\rho\mathbf{v}}$ vektorınıń ótkizgishlik toǵınıń tıǵızlıǵı $\mathbf{i}$ diń payda bolıwına sáykes keletuǵın erkin zaryadlardıń qozǵalısn ǵana emes, al zaryadlardıń atomlardıń ishindegi qozǵalısn da, atomlar menen molekullardıń waqıttırń ózgeriwi menen polyarizaciyasınıń ózgerisin de óziniń ishine alatuǵınlıǵın esapqa alıw kerek. Ekinshiden, erkin zaryadlardıń makroskopiyalıq tıǵızlıǵı ρ elementar zaryadlardıń ortasha tıǵızlıǵı bolǵan $\overline{\Sigma\rho}$ shamasına sáykes kelmeydi. Sebebi oǵan dielektriktiń polyarizaciyasına alıp kelinetuǵın $\overline{\Sigma\rho}$ shamasınıń bólimi kirmeydi.

§ 246. Elektromagnit tolqınlar. Biz waqıt boyınsha ózgeretuǵın elektr hám magnit maydanlarınıń payda bolıwınıń quyn tárizli elektr hám quyn tárizli magnit maydanlarınıń payda bolıwına alıp keletuǵınlıǵın kórdik. Eger usınday elektromagnit maydanı keńisliktiń bazı bir sheklengen oblastında payda bolsa, onda tájiriybeler bul maydanniń keńisliktiń qalǵan bólimine shekli tezlik penen tarqalatuǵınlıǵın kórsetedi. Bul tezlik júdá úlken hám boslıqta jaqtılıqtıń tezligine sáykes keledi ($3 \cdot 10^{10}$ sm/sec). Payda etiletuǵın elektromagnit maydanı dáwirli xarakterge iye bolsa, onda bul maydanniń tarqalıwı tolqınlıq xarakterge iye boladı. Elektromagnitlik maydanniń tarqalıwınıń tolqınlıq xarakteri Maksvelldiń elektromagnit qubılıslardıń ulıwmalıq teoriyasınan kelip shıǵadı hám ol 1863-jılı berildi. Elektromagnit tolqınları birinshi ret Gerc tárepinen 1888-jılı eksperimentlerde úyrenildi.



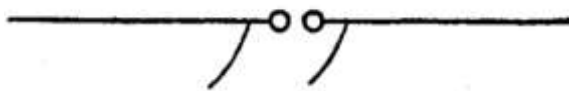
343-súwret. Ashılıwdıń hár qıylı dárejesine iye terbelmeli konturlar.

Dáslep ápiwayı teoriyalıq sxema mısasında elektromagnit tolqınlardıń payda bolıw processin qaraymız. Bunnan keyin olardı júzege keltiriwdiń texnikalıq usılları menen tanısamız. Biziń qolımızda qanday da bir usıldıń járdeminde elektr terbelisleri qozdırılatuǵın kontur bar dep boljayıq. Meyli, bul kontur C sıyımlıǵı jáne ózlik indukciya koefficienti L menen táriyiplenetuǵın bolsın. Eger bul konturdaǵı terbelislerdiń dáwiri menshikli terbelislerdiń dáwiri T ǵa teń bolsa, onda bul dáwirdiń shaması 239-paragraftaǵı (2)-formulanıń járdeminde anıqlanadı:

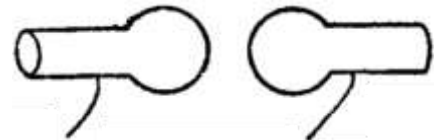
$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Bul terbelislerdiń nátiyjesinde konturdiń oblastında ózgermeli elektr hám magnit maydanları payda boladı. Mısalı, eger biz kondensatordıń astarlarınń arasındaǵı keńislikti qaraytuǵın bolsaq, onda bul keńislikte T dáwiri menen elektr maydanınıń kernewligi hám awısıw toǵınıń shaması ózgeredi, usınıń nátiyjesinde quyn tárizli magnit maydanı payda boladı. Elektromagnit tolqınıń tarqalıwınıń sezilerliktey bolıwı ushın yamasa sistemaniń sezilerliktey nurlanıwı ushın awısıw toǵı payda bolıwı hám $\vec{B}$ vektorı nolge teń bolmaǵan oblast múmkin bolǵanında qorshaǵan ortalıqtan az bólingen bolıwı kerek. Eger astarlarınń arasındaǵı qashıqlıq kishi bolǵan tegis kondensatordı hám oramları bir birine tıǵız jaylasqan solenoid túrindegi ózlik indukciyanı alsa (343a súwret), onda maydan is júzinde derlik tolıǵı menen astarlardıń arasında hám solenoidtiń ishinde boladı. Nurlanıwdıń úlkeyiwı ushın kondensatordıń astarlarınń arasındaǵı qashıqlıqtı úlkeytiw hám shıńjırdıń ózlik indukciyaǵa iye oblastın katushka túrinde emes, al ashıǵıraq kontur túrinde islew kerek boladı. Astarlardıń arasındaǵı qashıqlıqtı úlkeytip hám solenoidti sıızqlı ótkizgish penen almasıw, bizler 343-b hám 343-c súwretlerde kórsetilgen konturlardıń tiplerin alamız. Álbette, konturlardı usınday etip ózgertkende sıyımlıq penen ózlik indukciya dáslepki sxemaǵa salıstırǵanda ádewir kishi boladı hám usıǵan sáykes dáslepki sxemaǵa salıstırǵanda sistemaniń menshikli terbelisleriniń dáwiri de kishi boladı. Bunday konturlardaǵı terbelisler qanday da bir ózgermeli e.q.kúshinen kondensatordıń astarlarına energiyalı alıp keliwdiń esabınan júzege keledi. Astarlar zaryadlanatuǵın potenciallar ayırmasınıń shamasın úlkeytiw ushın astarlardı tutastırıtıwıń ótkizgishte *ushqınlıq aralıq* dep atalatuǵın ashıq orındı payda etiw kerek. Ushqınlıq aralıqtıń bolıwınıń sebebinen shıńjırdıń eki bólimindegi potenciallar ayırması ushqınlıq aralıqtan tesetuǵın shamasına jetkenshe shıńjır ajratılǵan halda turadı. Tesiw orın alǵanda eki bólimdi de bir ótkizgish konturǵa tutastırıtıwıń ushqınlıq aralıqta ushqın payda boladı, al bul konturda elektr terbelisleri júzege keledi. Kondensatordıń astarların pútkilley joq etiwge hám terbelmeli sistemani bir birinen ushqınlıq aralıq penen ayırılǵan eki metall sterjennen turatuǵın etip islewge boladı (344-súwret). Bunday terbelmeli sistemani *dipol* dep ataladı. Astarlardı joq etiw sıyımlıqtıń júdá kishiryeyiwine alıp keledi; sıyımlıqtı úlkeytiw ushın terbelmeli sistemani payda etetuǵın sterjenlerdi ushqınlıq aralıqtıń shegaralarınń qasında sferalıq juwanıwǵa iye etip soǵadı. Tap usınday terbelmeli konturdı Gerc óziniń tájiriybelerinde paydalandı. 345-súwrette Gerctiń vibratori dep atalatuǵın Gerctiń terbelmeli konturı kórsetilgen. Gerctiń vibratonındaǵı terbelisler onıń ekinshi oramına indukciyalıq katushkanı tutastırıwdıń saldarınan qozadı. Bunday jaǵdayda terbelmeli process mınaday xarakterge iye boladı: Potenciallar ayırmasınıń shaması ádewir úlken bolǵanda hám ushqınlıq aralıqta ushqın payda bolǵanda vibratorda sóniwshi terbelisler payda boladı. Terbelislerdiń dáwiri vibratordıń sıyımlıǵı hám ózlik indukciyası boyınsha anıqlanadı. Vibratordıń yarımınıń ekewin de kóp qaytara zaryadlaǵannan keyin terbelis sónedi, sebebi zaryadlaǵanda vibrator alatuǵın energiya nurlanıw hám lenc-djoul jıllılıǵına jumsaladı. Bunnan keyin induktor vibratordı qaytadan zaryadlaydı hám process qaytalanadı. Induktordan vibratordı zaryadlaw dáwiri induktordıń ajratqıshınıń jumıs islewiniń dáwiri boyınsha anıqlanadı; bul dáwir vibratordıń terbelisleriniń dáwirinen ádewir úlken. Dipoldıń ózinde terbelislerde joqarı jiyilikli toq ótedi (Gerctiń tájiriybelerinde jiyiliktiń shaması shama menen 10^8 gc ke teń bolǵan), bul toq dipoldıń ushlarında shaǵılısadı hám baǵıtın qarama-qarsı baǵıtqa ózgertedi: dipolda bir baǵıtta

tarqalatuđın tolqın menen shađılısqan tolqınıńın interferenciyası júzege keledi, nátiyjede onda turđın tolqınlar qalıplesedi. Bul dipoldiń hár qıylı noqatlarında toqtıń amplitudasınıń hár qıylı mánislerge iye bolatuđınlıǵın kórsetedi, bunday jađdayda dipoldiń ushlarında toqtıń kúshi túyinge, al ortasında shođırǵa iye boladı. Solay etip, terbeliwshi dipolda waqıttań bir momentinde toqtıń kúshi hár qıylı mánislerge iye boladı. Bul processtıń "kvazistacionar emes" ekenliginiń mısalı bolıp tabıladı. Maksveldiń terriyasına sáykes tolıq toq, yaǵnıy ótkizgishlik toǵı menen awısıw toǵınıń qosındısı, dipoldiń barlıq kesimlerinde birdey bolıwı kerek. Bunnan, ótkizgishlik toǵı nolge teń bolatuđın orınlarda awısıw toǵınıń maksimallıq mániske iye bolatuđınlıǵı kelip shıǵadı. Dáwirli processte elektr kernewliginiń amplitudasınıń mánisi eń úlken bolǵan orınlarda awısıw toǵınıń amplitudası da eń úlken mánisine teń boladı.



344-súwret. Ushqınlıq aralıq penen ajratılǵan eki sterjen túrindegi terbelmeli kontur.



345-súwret. Gerctiń vibratori.

Solay etip, ótkizgishlik toǵınıń amplitudası nolge teń orınlarda kernewliktiń amplitudasınıń mánisi maksimallıq boladı eken. Elektr kernewliginiń shođırǵaları dipoldiń ushlarında, al túyin ortasında jaylasadı.

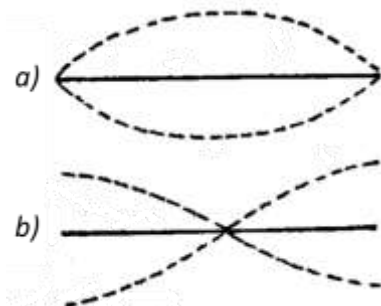
Dipoldiń boyındaǵı toqtıń kúshiniń amplitudası menen elektr kernewliginiń amplitudasınıń tarqalıwı 346-súwrette kórsetilgen.

Dipoldi qorshap turǵan keńislikte payda bolǵan elektromagnit maydanınıń xarakterin qaraymız.

Dipoldi sxema túrinde bir birinen l qashıqlıǵı dáwirli ózgeretuđın bir birine teń hám belgileri hár qıylı bolǵan $+q$ hám $-q$ zaryadı túrinde kóz aldırǵa elesletiwge boladı. Joqarıda kórgenimizdey (125-paragraf), ózgermeytuđın dipoldiń elektr maydanı bir zaryadta baslanatuğın hám ekinshi zaryadta tamam bolatuğın kernewlik sızıqları menen táriyiplenedi.

346-súwret.

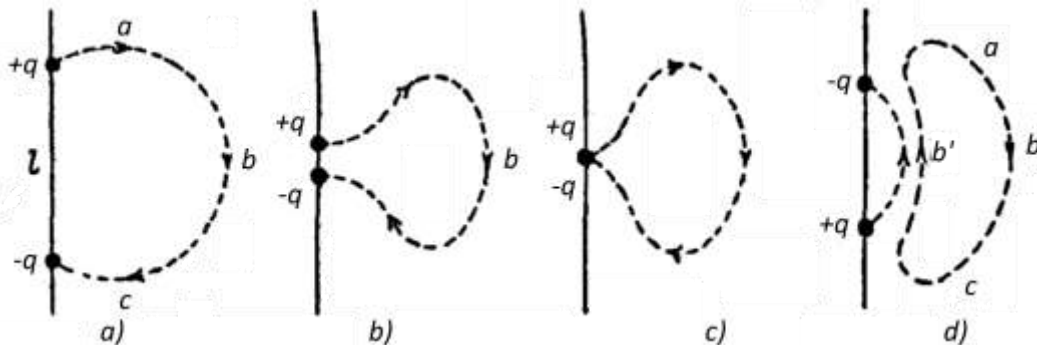
Toq kúshiniń amplitudasınıń (a) hám elektr kernewliginiń (b) dipoldiń boyında tarqalıwı.



Ulıwma aytqanda, eger dipoldi payda etetuđın zaryadlar qozǵalatuđın bolsa, awhal basqasha boladı. Bunday awhaldıń júzege keliwi maydanniń keńisliktegi shekli tezlik penen tarqalıwına baylanıslı. Demek, dipoldan qashıqlatılǵan qanday da bir noqattaǵı kernewlik E niń mánisi dipoldaǵı bólekshelerdiń tap usı momenttegi jaylasıwınan emes, al bunnan bir qansha burınǵı jaylasıwına sáykes keledi.

Bul jağdayda grafikalıq jollar menen túsindiremiz. Dipoldi payda etetuğın $+q$ hám $-q$ zaryadları bir birinen baǵı bir l qashıqlıqta jaylasqan haldan baslaymız (347a súwret) hám qanday da bir kernewlik sızıǵın, mısalı abc sızıǵın qaraymız. Zaryadlar bir birine jaqınlasqanda kernewlik sızıqları formasın ózgetedi, mısalı, b noqatındaǵı kernewlik E niń mánisi zaryadlardıń berilgen jaylasıwına sáykes kelmeydi, al waqıttıń bunnan burınıraқтаǵı momentine sáykes keledi. Sızıq

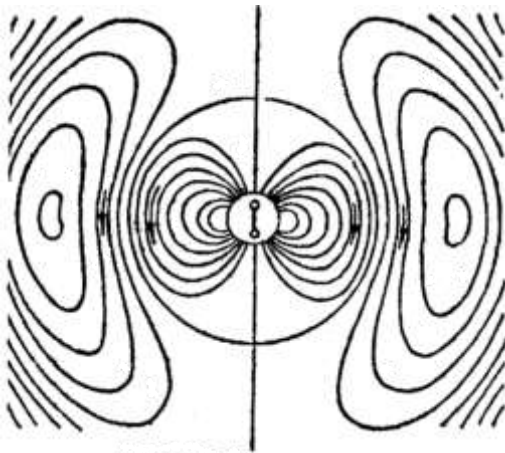
347b súwrette keltirilgendey túrge iye. Zaryadlardıń ekewi de jılısqanda kernewlik sıızqları ilmektiń formasına iye boladı (347-c súwret). Zaryadlardıń bunnan bılay qozǵalıwında kernewliktiń $abcb'$ tuyıq sıızığı payda boladı (347-d súwret). Solay etip, payda bolǵan elektr maydanı quynlıq xarakterge iye boladı.



347-súwret. Hár qıylı waqıt momentlerindeki dipoldiń qasındaǵı kernewlik sıızqları.

Maksvelldiń gipotezası boyınsha ózgermeli elektr maydanınıń tuyıq sıızqları ózgermeli magnit maydanınıń tuyıq sıızqlarınıń payda bolıwına alıp keledi. Al payda bolǵan magnit maydanınıń tuyıq sıızqları bolsa elektr kernewliginiń tuyıq sıızqların payda etedi h.t.b. Terbeletuǵın dipoldiń dógerinde elektromagnit maydanı payda boladı.

348-súwrette waqıttıń barız bir momentindeki Gerc dipoliniń átirapındaǵı elektr kernewliginiń tarqalıwı kórsetilgen.



348-súwret.

Dipoldiń qasındaǵı kernewlik sıızqları.

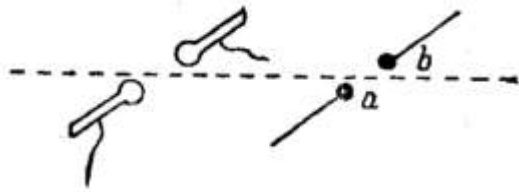
Dipoldiń qasında payda bolǵan tolqındaǵı elektr hám magnit maydanlarınıń baǵıtın hám salıstırmalı shamasın esaplawǵa da hám eksperimentte de anıqlawǵa da boladı.

Elektr maydanın elektr kernewligine reakciya bere alatuǵın "elektr rezonatorın" maydanniń hár qıylı noqatlarına qoyıw jolı menen izertlewge boladı. Bunday rezonator bolıp ab ushqınlıq aralıǵına iye tuwrı muyeshli sım xızmet ete aladı (349-súwret). Bul súwrette rezonatordıń shep tárepinde nurlandıratuǵın vibrator kórsetilgen. Eger bunday dipol elektr maydanınıń kernewlik sıızqlarına perpendikulyar bolmasa, onda onıń ushlarınń arasında potencıallar ayırması payda boladı. Usınıń nátiyjesinde ushqınlıq aralıqta ushqın payda boladı. Bul ushqın elektr maydanınıń bar ekenliginiń indikatori boladı. Qabıl etetuǵın dipoldiń ushqınlıq aralıǵınıń kishi bolıwı kerek, sebebi onıń ushlarındaǵı potencıallar ayırmasınıń shaması úlken emes.

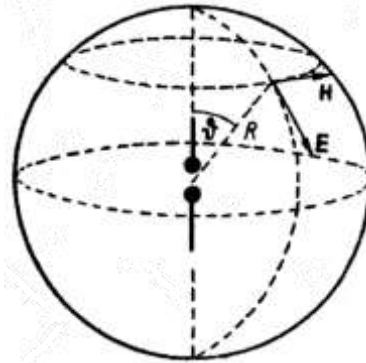
Magnit maydanın onıń indukciyalıq tásiiri boyınsha úyreniwge boladı. Onıń ushın maydanniń hár qıylı orınlarına kontur ornastırıladı hám ondaǵı toq ólshenedi. Indukciyalıq toqtıń shaması konturdiń turǵan ornınan hám onıń baǵıtınan ǵárezli boladı. Magnit indukciyasınıń vektori

konturdiń tegisligine normal baǵıtlanǵan bolsa, onda ózgermeli maydanniń indukciyalıq tásiiri úlken boladı. Sebebi, usınday awhalda kontur tárepinen sheklengen tegislik arqalı ótetuǵın magnit aǵısınıń shaması tezirek ózgeredi. Hár qıylı orınlardaǵı kernewlik vektorınıń salıstırmalı shaması kontur magnit maydanınıń kernewligine normal baǵıtta turǵan jaǵdaydaǵı indukciyalıq toqtıń shamasına proporcional.

Usınday tiptegi tájiriybeler dipoldi qorshap turǵan elektromagnit maydanınıń xarakterin anıqlawǵa múmkinshilik beredi. Dipoldiń tikkeley qasında maydanniń xarakterini quramalı. Biraq tolqın zonası dep atalatuǵın usı dipoldiń ólshemlerine salıstırǵanda úlken qashıqlıqlardaǵı oblastlarda maydan salıstırmalı ápiwayı túrge iye.



349-súwret. *ab* rezonatorı.

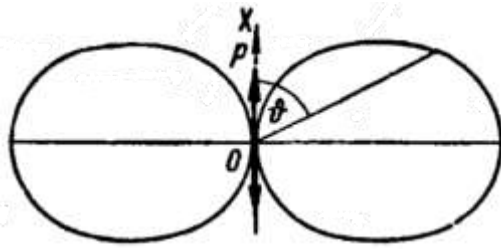


350-súwret. Dipoldiń tolqın zonasındaǵı **E** hám **H** vektorlarınıń baǵıtı.

Dipoldiń baǵıtı sıpatında sferalıq bettiń kósherin qabıl etemiz (350-súwret) hám usı kósherge baylanıslı paralleller menen meridianlardı ótkeremiz. Bunday jaǵdayda elektr maydanınıń kernewligi **E** qálegen noqatta meridianǵa urınba, al magnit maydanınıń kernewligi **H** parallelge urınba baǵıtta baǵıtlanǵan. Magnit hám elektr maydanlarınń kernewlikleriniń shaması ekvatorдан polyuslerge ótkende kishireyedi: dipoldiń kósheriniń dawamında jaylasqan noqatlar ushın eki kernewlik te nolge teń; ekvatorlıq oblastta jatatuǵın noqatlar ushın kernewlikler eń úlken mániske iye boladı. Usıǵan sáykes nurlandırılatuǵın energiyanıń aǵısınıń tıǵızlıǵı nurlanıwdıń baǵıtı menen dipoldiń kósheriniń arasındaǵı ϑ múyeshinen ǵárezli. Bul ǵárezlik 351-súwrette vektorlıq diagramma túrinde kórsetilgen. Dopolǵa shekemgi qashıqlıqtıń úlkeyiwi menen (yaǵnıy sferanıń radiusınıń úlkeyiwi menen) kernewlikler kishireyedi. Berilgen noqattaǵı *elektr maydanınıń kernewligi **E** niń baǵıtı onıń menen baylanıslı bolǵan magnit maydanınıń kernewligi **H** tıń baǵıtına perpendikulyar hám **E** menen **H** vektorlarınıń ekewi de sferanıń radiusına, yaǵnıy tolqınıń tarqalıw baǵıtına perpendikulyar.* Eger dipoldaǵı e.q.kúshi $\mathcal{E}$

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \sin \omega t$$

nızamı boyınsha ózgeretuǵın bolsa (bul teńlikte ω - terbelislerdiń cikllıq jiyiligi), onda maydanniń kernewligi **E** de hár bir noqatta sol ω jiyiligi menen dáwirli túrde, biraq fazası boyınsha keshikken halda ózgeredi. Eger biz qarap atırǵan noqat dipoldan qansha alısta jaylasqan bolsa faza boyınsha keyin qalıwdıń shaması da úlken boladı. Bul keyin qalıwdıń sebebi elektromagnit tolqınlardıń shekli v tezligi menen tarqalıwınıń sebebinen júzege keledi. Solay etip, dipoldiń átirapında sferalıq elektromagnit tolqın payda boladı.



351-súwret.

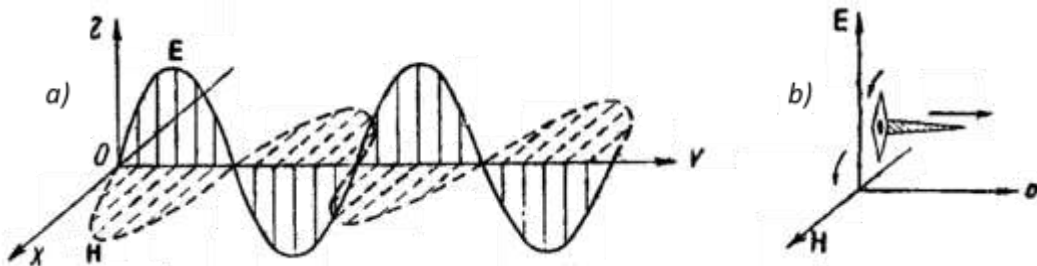
Nurlanıw intensivliginiń múyeshler boyınsha tarqalıwı.

Eger r arqalı dipolden berilgen noqatqa shekemgi qashıqlıqtı belgilesek, onda $\mathbf{E}$ vektorınıń terbelisleri mınaday ańlatpanıń járdeminde beriledi:

$$E = \frac{E_0 \sin \vartheta}{r} \sin \omega \left(t - \frac{r}{v} \right) = \frac{E_0 \sin \vartheta}{r} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r}{\lambda} \right).$$

Bul ańlatpada T - dáwir, λ - tolqın uzınlıǵı, al ϑ - polyar múyesh (350-súwret).

Tarqalıw baǵıtında elektromagnit tolqındı bir birine perpendikulyar tegislikte jatqan eki sinusoidanıń járdeminde kórsetiwge boladı. Olardıń biri elektr kernewligi vektorı $\mathbf{E}$ niń, al ekinshisi magnit kernewligi $\mathbf{H}$ tıń terbelislerin kórsetedi. Boslıqta eki vektordıń terbelisleriniń amplitudaları san mánisi boyınsha bir birine teń (eger $\mathbf{E}$ elektrostatikalıq, al $\mathbf{H}$ - elektromagnitlik sistemada ólshengen bolsa); eki vektor da birdey fazada terbeledi (352-a súwret). Tolqınıń tarqalıw baǵıtın burǵı qaǵıydası boyınsha anıqlaw múmkin: eger burǵınıń tutqasın $\mathbf{E}$ vektorınan $\mathbf{H}$ vektorına qaray burasaq, onda onıń ilgerilemeli qozǵalısynıń baǵıtı tolqınıń tarqalıw baǵıtın anıqlaydı (352-b súwret).



352-súwret. Elektromagnit tolqın.

Óziniń tájiriybelerinde Gerc uzınlıǵı shama menen 60 sm bolǵan elektromagnit tolqınların aldı. Ol tolqınlardıń metall aynalardaǵı shıǵılısıwın, parafinnen soǵılǵan prizmadaǵı sınırıwın, sonıń menen birge interferenciya qubılısın baqladı. Bul tájiriybelerdiń barlıǵı elektromagnit maydannıń shekli tezlikke iye tolqınlar túrinde tarqala alatuǵınlıǵın ayqın kórsetti.

§ 247. Elektromagnit tolqınlarınıń tarqalıw tezligi. Elektromagnit tolqınların tezliginiń úlken bolıwına baylanıslı onıń shamasın tájiriybede tikkeley anıqlaw qıyınshılıqtı payda etedi.

Gerc vibratordıń sıyımlıǵı menen ózlik indukciyası boyınsha elektromagnit tolqınıń uzınlıǵı λ nı, terbelislerdiń dáwiri T nı anıqladı hám usı shamalardı paydalanıp

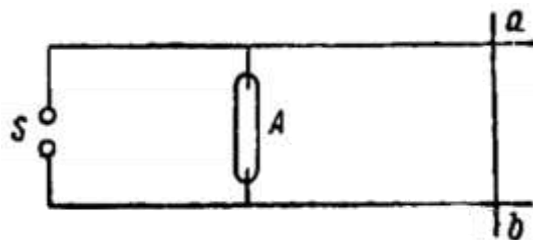
$$v = \frac{\lambda}{T} \quad (1)$$

qatnasınıń tiykarında tezlik v nı esapladı. Tolqın uzınlıǵın ólshew ushın Gerc bir birine qarama-qarsı tarqalatuǵın tolqınlardıń interferenciyasında payda bolatuǵın turǵın tolqınlardı paydalandı. Gerc juwırıwshı tolqınıń metall aynada shaǵılısıwın paydalanıp, bir birine qarama-qarsı tarqalatuǵın tolqınlardı ala aldı.

Turǵın tolqınıń intensivliginiń sezilerliktey bolıwı ushın tájiriybeni belgili bolǵan baǵıtta tarqalatuǵın elektromagnit tolqını menen ótkeriw kerek. Elektromagnit tolqınıń usınday "baǵıtlanǵanlıǵın" alıw 353-súwrette kórsetilgen sxemanıń járdeminde ańsat alıwǵa boladı. Dipoldıń ushqınlıq aralıǵı súwrette kórsetilgendey, ushlarında bir biri menen qosılatuǵın eki parallel sim bolıp tabıladı.

353-súwret.

Turǵın elektromagnit tolqınların alıw.



Elektromagnit maydanı tiykarınan sımardıń ortasında toplanǵan, al sımlar arqalı ótkizgishlik toǵı payda boladı. Sımńıń ab uchastkası ózine jetip kelgen tolqındı shaǵıstıratuǵın aynanıń xızmetin atqaradı. Nátiyjede sımlar menen sheklengen oblastta turǵın tolqınlar payda boladı hám bul tolqınnıń túyinleri menen shoǵırları tájiriybede anıqlanadı. Ótkizgishlerdiń arasına A razryadlıq trubkanı qozǵalıwshı kontaktlarda sımardıń boyı menen jılastırıw onıń úzik-úzik jaqtılıq shıǵarıwın baqlawǵa boladı. Eń kúshli jaqtılıq shıǵarıw elektr kernewliginiń shoǵırlarında orın aladı; elektr kernewliginiń túyinlerinde jaqtılıq shıǵarıw baqlanbaydı. Qorńılas túyinler yamasa shoǵırlardıń arasındaqı qashıqlıq tolqın uzınlıǵınıń yarımın beredi. Magnit kernewliginiń túyinleri menen shoǵırların galvanometrge tuyıqlanǵan ramkanı sımardıń boyı menen jılıtıp, joqarıda kórsetilgendey ózgermeli magnit maydanınıń indukciyalıq tásin baqlaw arqalı tabıwǵa boladı. Bul baqlawlar magnit kernewliginiń shoǵırlarınıń elektr kernewiniń túyinleri menen sáykes keletuǵınlıǵın kórsetedi. Shaǵılısıw orın alatuǵın ab ornında elektr kernewliginiń túyini hám magnit kernewliginiń shoǵırı orın aladı. Bunnan metall betten shaǵılısqanda elektr kernewliginiń terbelisiniń yarım tolqındı joǵaltatuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Bunday jaǵdayda magnit kernewligi vektorınıń terbelisleri shaǵılısıwında yarım tolqınnıń joǵalıwı orın almaydı.

Túyinlerdiń arasındaqı qashıqlıq boyınsha tolqın uzınlıǵı λ nı anıqlap hám terbelis dáwiri T nı bilip, (1)-formula boyınsha elektromagnit tolqınlardıń tarqalıw tezligi v nı anıqlawǵa boladı. Terbelis dáwiri T nı, joqarıda kórsetilgendey, 239-paragraftaǵı (2)-formula boyınsha esaplawǵa boladı. Biraq, terbelis dáwirin emperikalıq jollar menen de anıqlawǵa boladı. Onıń ushın aylanatuǵın aynanıń járdeminde terbelmeli konturdiń ushqın aralıǵındaqı ushqındı baqlaydı. Aynanı júdá tez aylandırǵanda hár bir terbelistiń dáwiriniń ishinde ushqınnıń shıǵıwı hám toqtawına sáykes ushqınnıń súwreti úzik-úzik túrinde alınadı. Usınday jollar menen elektromagnit tolqınlarınıń boslıqtaǵı tarqalıw tezligi ushın $c = 3 \cdot 10^{10}$ sm/sek shaması alındı. Turǵın tolqınlardıń tolqın uzınlıǵın házirgi waqıtları ótkerilgen dálirek ólshewler, sonıń menen birge jaqtılıqtıń tezligin ólshewler (jaqtılıq tolqın uzınlıǵı júdá kishi bolǵan elektromagnit tolqın bolıp tabıladı) mınaday mánisti beredi⁶⁰:

$$c = 2,998 \cdot 10^{10} \text{ sm/sek.}$$

Bul shama toq kúshiniń elektromagnitlik hám elektrostatikalıq birlikleriniń qatnası boyınsha anıqlanatuǵın elektromagnitlik turaqlı c nıń shamasına júdá jaqın. Bunday sáykeslik tosınan júzege kelgen emes: Maksvell teoriyası (qarańız: mayda shrift) boslıqta elektromagnit tolqınlarınıń elektrodinamikalıq turaqlı c ǵa teń tezlik penen tarqalatuǵınlıǵın kórsetedi.

Eger boyı arqalı elektromagnit tolqınları tarqalatuǵın sımardı dielektrikke túsirsek, onda turǵın tolqınlardıń túyinleri arasındaqı qashıqlıq kishireyedi; bul tolqınlardıń tarqalıw tezliginiń kishireyetuǵınlıǵın kórsetedi. Maksvell teoriyası boyınsha tolqınnıń tarqalıw tezligi v mınaǵan teń:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (2)$$

Bul teńlikte ϵ menen μ arqalı zattıń dielektriklik turaqlısı menen magnitlik sińirgishligi belgilengen.

⁶⁰ Jaqtılıqtıń vakuumdıǵı tezligi 299 792 458 00 sm/s (Awdarıwshılar).

Maksvell teńlemelerin tallap, belgili bolǵan sharayatlarda olardıń sheshimleriniń tolqınlıq xarakterge iye bolatuǵınlıǵın kórsetedi. Maksvell teńlemelerin sheshiwdiń usılların kórsetiwge múmkinshilik joq bolǵanlıqtan, biz tolqınlıq sheshimniń Maksvell teńlemelerin qanaatlardıratuǵınlıǵın kórsetemiz hám tolqınnıń xarakterini menen onıń tarqalıw tezligi haqqında juwmaqtı keltirip shıǵaramız.

Elektromagnit terbelis belgili $T = \frac{2\pi}{\omega}$ dáwirge iye boladı hám belgili baǵıtta, misalı OY kósheriniń baǵıtında tarqaladı dep boljaymız (352-súwret). Ápiwayılastırıw ushın tolqındı terbelislerdiń tarqalıw baǵıtına perpendikulyar tegis hám waqıttır bir momentinde $\mathbf{E}$ hám $\mathbf{H}$ vektorlarınıń ekewi de berilgen mániske iye boladı dep boljaymız. Bul boljaw $\mathbf{E}$ hám $\mathbf{H}$ vektorları ushın "tolqın teńlemesin" bilayınsha jazıwǵa múmkinshilik beredi:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \cos \omega \left(t - \frac{y}{v} \right), \mathbf{H} = \mathbf{H}_0 \cos \omega \left(t - \frac{y}{v} \right); \quad (3)$$

bul ańlatpalarda $\mathbf{E}_0$ hám $\mathbf{H}_0$ arqalı elektr hám magnit kernewlikleri vektorlarınıń sáykes amplitudaların ańǵartadı, v - elektromagnit tolqınıń tarqalıw tezligi. Tolqınnıń tezligi v tolqınnıń dáwiri hám tolqın uzınlıǵı menen baylanısha baylanısqan:

$$v = \frac{\lambda}{T}.$$

Bizler tolqındı tegis dep boljaǵannan keyin $\mathbf{E}$ hám $\mathbf{H}$ vektorlarınıń proekciyalarınıń x hám z koordinataları boyınsha alıńǵan dara tuwındıları nolge teń boladı, sebebi berilgen moment E hám H shamaları tek tolqınnıń tarqalıw baǵıtında, yaǵnıy tek OY kósheriniń baǵıtında ǵana ózgeredi. Solay etip, Maksvell teńlemelerinen x hám z koordinataları boyınsha alıńǵan tuwındılar shıǵıp qaladı. Bul jaǵday bizge mınaday túrdegi Maksvell teńlemeleriniń sistemasın beredi (244-paragraf):

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial H_z}{\partial y} &= \frac{\varepsilon}{c} \dot{E}_x, \\ 0 &= \frac{\varepsilon}{c} \dot{E}_y, \\ -\frac{\partial H_x}{\partial y} &= \frac{\varepsilon}{c} \dot{E}_x \end{aligned} \right\} \quad (4) \quad \left. \begin{aligned} \frac{\partial E_z}{\partial y} &= -\frac{\mu}{c} \dot{H}_x, \\ 0 &= \frac{\mu}{c} \dot{H}_y, \\ \frac{\partial E_x}{\partial y} &= \frac{\mu}{c} \dot{H}_z \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Maksvell teńlemeleriniń eki sistemasınıń ekinshi teńlemeleriniń orınlanıwı ushın $\mathbf{E}$ hám $\mathbf{H}$ vektorlarınıń OY kósherine túsirilgen proekciyalarınıń nolge teń bolıwı kerek.

(3)-ańlatpadan $\mathbf{E}$ yamasa $\mathbf{H}$ vektorlarınıń qanday da bir proekciyasınan waqıt boyınsha alıńǵan tuwındı barlıq waqıtta nolge teń bolsa, onda usı proekciyanıń óziniń nolge teń bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Bunnan mınaday teńliklerdiń orınlanatuǵınlıǵın kóremiz:

$$E_y = H_y = 0. \quad (6)$$

Bul bizge júdá áhmiyetli nátiyjeni beredi: *tegis elektromagnit tolqında $\mathbf{E}$ hám $\mathbf{H}$ vektorları terbelislerdiń tarqalıw baǵıtına perpendikulyar jaylasqan, elektromagnit tolqın kóldeneń.*

Anıqlıq ushın $\mathbf{E}$ vektorı óziniń baǵıtın ózertpey terbeledi dep boljaymız; meyli, bul baǵıt OZ baǵıtına sáykes kelsin. Vektor óziniń baǵıtın saqlaytuǵın usınday tolqındı *tegis polarizaciyalanǵan tolqın* dep ataymız. Bizdiń boljawımız $\mathbf{E}$ vektorınıń OX kósheriniń baǵıtındaǵı nolge teń dep juwmaq shıǵarıwǵa májbúrleydi, yaǵnıy $E_x = 0$. Bunnan

$$E_z = E \quad (7)$$

teńligine iye bolamız. Bunday sharayatta Maksveldiń ekinshi teńlemeler sistemasınıń úshinshi teńlemesi mınanı beredi:

$$\dot{H}_z = 0.$$

Demek

$$H_z = 0$$

teńligi orınlı boladı eken. Usınıń menen birge (4)-sistemanıń birinshi teńlemesi de orınlanadı. Solay etip, magnit kernewligi vektorı OX kósherine parallel terbeledi eken. Bunnan

$$H_x = H$$

teńligine iye bolamız. Bunnan biz elektr kernewligi vektorı (OZ kósheriniń baǵıtındaǵı) menen magnit kernewligi vektorınıń (OX kósheriniń baǵıtındaǵı) óz-ara perpendikulyar ekenligin kóremiz.

Birinshi sistema (4) tiń úshinshi teńlemesin hám ekinshi sistema (5) tiń birinshi teńlemesin paydalanamız. Endi olar mınaday túрге enedi:

$$-\frac{\partial H}{\partial y} = \frac{\varepsilon}{c} \dot{E}, \quad \frac{\partial E}{\partial y} = -\frac{\mu}{c} \dot{H}.$$

Bul teńlemelerden belgisizlerdiń birewin joq etiw ushın (mısalı H tı) birinshi teńlemeden waqıt boyınsha tuwındı alamız:

$$-\frac{\partial \dot{H}}{\partial y} = \frac{\varepsilon}{c} \ddot{E};$$

Bul teńlemedegi $\dot{H}$ tıń ornına onıń ekinshi teńlemedegi $\dot{m}$ ńisın qoyıp, mınanı alamız:

$$\frac{c}{\mu} \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} = \frac{\varepsilon}{c} \ddot{E} \text{ yamasa } \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} = \frac{\varepsilon \mu}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}. \quad (8)$$

Álbette, E ni joq etip biz H ushın (8)-teńlemege usağan teńlemeni alamız. (8)-teńleme tolqın teńlemesi bolıp tabıladı (I tomdağı 111-paragraftağı teńleme menen salıstırıńız). Bunday teńlemeni

$$E = E_0 \cos \omega \left(t - \frac{y}{v} \right)$$

túrindegi sheshimniń qanaatlandıratuǵına kóz jetkeremiz. Onıń ushın E den waqıt t hám koordinata boyınsha ekinshi tártipli tuwındıların alamız:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} &= -\omega^2 E_0 \cos \omega \left(t - \frac{y}{v} \right) = -\omega^2 E; \\ \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} &= -\frac{\omega^2}{v^2} E_0 \cos \omega \left(t - \frac{y}{v} \right) = -\frac{\omega^2}{v^2} E. \end{aligned}$$

Bul $\frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$ hám $\frac{\partial^2 E}{\partial y^2}$ shamaların (6)-teńlikke qoyıp

$$\frac{1}{v^2} = \frac{\varepsilon \mu}{c^2} \quad (9)$$

barlıq waqıtta qanaatlandırıw múmkin bolǵan qatnasına iye bolamız. Solay etip, (8)-teńlemenıń sheshimi jıylıǵı ω bolǵan hám v tezligi menen tarqalatuǵın tegis tolqın bolıp tabıladı eken. (9)-ańlatpa boyınsha v mınaǵan teń:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon \mu}}. \quad (10)$$

Boslıq ushın $\varepsilon = 1$ hám $\mu = 1$, bunnan boslıqtaǵı elektromagnit tolqınlarınń tarqalıw tezliginiń san m ńisi boyınsha c ǵa teń ekenligi kelip shıǵadı. Al, c bolsa toq kúshiniń elektromagnit (CGSM) birliginiń elektrostatikalıq birligine (CGSE) qatnasına teń.

§ 248. Umov-Poynting vektorı. Elektromagnit tolqınıń tarqalıwı usı elektromagnit tolqın táriyipleytuǵın energianıń alıp beriliwi menen júredi. Joqarıda elektr hám magnit maydanınıń energiasınıń keńislikte $\varepsilon E^2/8\pi$ hám $\mu H^2/8\pi$ tıǵızlıqları menen tarqalatuǵınlıǵın kórdik. *Elektromagnit maydanınıń tıǵızlıǵı* w shamasına teń qosındı energiya menen táriyiplenetuǵınlıǵın kórsetiwge boladı:

$$w = \frac{\varepsilon E^2 + \mu H^2}{8\pi}.$$

(Bul formula birliklerdiń elektrostatikalıq sistemasında da, elektromagnitlik sistemasında da durıs). Energiya maydanniń kernewlikleriniń funkciyası bolǵanlıqtan, ol keńislikte maydanniń tarqalıwınıń tezligi v menen tarqaladı. Elektromagnit energiasınıń aǵısınıń tıǵızlıǵı vektorın kirgiziw arqalı energianıń tarqalıwın táriyiplewge boladı. Ulıwmalıq túrde serpimli tolqınlarǵa qollanılatuǵın energianıń aǵısınıń tıǵızlıǵı vektorı birinshi ret Moskva universitetiniń professorı N.A.Umov tárepinen kirgizildi (I tomdağı 112-paragraftı qarańız), al elektromagnit maydanına arnalǵan dara jaǵday Poynting tárepinen paydalanıldı.

Eger Umov-Poynting vektorınıń san m ńisin S arqalı belgilesek, onda dt waqıtınıń ishinde tolqınıń tarqalıw baǵıtına perpendikulyar bettiń bir birligi arqalı ótetuǵın energianıń shaması

$$S dt = w \cdot v \cdot dt \quad (1)$$

formulasınıń járdeminde anıqlanadı. Bul formulada v - tolqınıń tarqalıw tezligi.

Eger $\mathbf{E}$ hám $\mathbf{H}$ vektorları bir birine perpendikulyar bolsa (boslıqtaǵı elektromagnit tolqınlarında usı vektorlar bir birine perpendikulyar), onda izotrop ortalıqlarda Umov-Poynting

vektoriniń mánisi

$$S = \frac{c}{4\pi} EH \quad (2)$$

teńliginiń járdeminde anıqlanadı. Bul teńlik birliklerdiń aralas sistemasında (gausslıq) orınlı.

SHaması hám bağıtı boyınsha Umov-Poynting vektorı **S** tiń shaması **E** hám **H** vektorlarınıń vektorlıq kóbeymesiniń járdeminde anıqlanadı:

$$\mathbf{S} = \frac{c}{4\pi} (\mathbf{E} \times \mathbf{H}). \quad (3)$$

(2)- hám (3)-teńlikler boyınsha anıqlanğan Umov-Poynting vektoriniń (1)-teńlemenı qanaatlandıratuǵınıń, yaǵnıy haqıyqatında energiyanıń aǵısınıń tıǵızlıǵınıń vektorı bolıp tabılatuǵınıń kórsetemiz. Joqarıdaǵıday, *OY* kósheriniń baǵıtında tarqalatuǵın tolqınıń elektr hám magnit vektorları sáykes *OZ* hám *OX* kósherleriniń baǵıtına parallel dep boljaymız (352-súwret). Bunday jaǵdayda $E = E_z$ hám $H = H_x$ hám **S** vektorı *OY* kósheriniń baǵıtında baǵıtlanğan, yaǵnıy tolqınıń tarqalıw baǵıtı menen baǵıtlas boladı.

247-paragraftaǵı (5)-sistemasınıń birinshi teńlemesinen sol paragraftaǵı (3)-formulanı itibarǵa alıp, mınaǵan iye bolamız:

$$\frac{\omega}{v} E = \frac{\mu\omega}{c} H;$$

bul teńlikke $v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$ teńligin qoyıp, mınanı alamız:

$$\sqrt{\varepsilon E} = \sqrt{\mu H}.$$

(*E* niń elektrostatalıq, al *H* tıń elektromagnitlik birliklerde jazılğan ekenligin ańǵarmaz). Demek elektromagnit energiyanıń tıǵızlıǵın bılaysınsha jaza aladı ekenbiz:

$$w = \frac{\varepsilon E^2 + \mu H^2}{8\pi} = \frac{\varepsilon E^2}{4\pi} = \frac{\mu H^2}{4\pi}. \quad (4)$$

Umov-Poynting vektoriniń san mánisiniń waqıt elementi *dt* ǵa kóbeymesin alamız:

$$Sdt = \frac{c}{4\pi} E \cdot H \cdot dt = \frac{c\sqrt{\varepsilon E^2}}{4\pi\sqrt{\mu}} dt = \frac{c\varepsilon E^2}{\sqrt{\varepsilon\mu} \cdot 4\pi} dt.$$

Eger, bul teńlikke (4) boyınsha *w* nı qoyıp hám $c/\sqrt{\varepsilon\mu}$ shamasın *v* arqalı ańǵartıp, (1)-teńlikke sáykes keletuǵın

$$Sdt = w \cdot v \cdot dt$$

teńligin alamız. Ulıwma jaǵdayda bazı bir kólemge *dt* waqıtı ishinde kiretuǵın (yamasa shıǵatuǵın) elektromagnit energiyanıń ólshemi $\int_S S_n dt ds$ shamasına teń boladı. Bul integral biz qarap atırǵan kólemdi shekleytuǵın *S* beti boyınsha alınadı. Solay etip, biz qarap ótken jaǵdaylardan *S* vektoriniń elektromagnit energiyanıń aǵısınıń tıǵızlıǵınıń vektorı ekenligin kóremiz.

§ 249. Radiotexnika. Elektromagnit tolqınları qozdırıwdıń hám registraciyalawdıń házirgi zaman usılları. Gerc tárepinen 345-súwrette kórsetilgen vibratordıń terbelisleriniń járdeminde elektromagnit tolqınları alıwdıń eń birinshi usılı tolqın uzınlıǵı shama menen 1 m bolǵan tolqınları alıwǵa múmkinshilik berdi. Gerctiń tájiriybeleri elektromagnit tolqınlarıń áhmiyetli bolǵan qásiyetlerin eksperimentlerde úyreniwge múmkinshilik berdi: shaǵılısw, sınıw h.t.b. Bul tájiriybeler jaqtılıqtıń elektromagnitlik tábiyatınıń tuwrıdan-tuwrı tastıyıqlanıwı bolıp tabıladı. Keyinirek kishirek tolqın uzınlıǵına iye tolqınları alıwǵa kóp sanlı tırısıwlar boldı. 1906-jılı P. N. Lebedev júdá kishi bolǵan miniatyuralıq vibratorlardı paydalanıp uzınlıǵı shama menen 3 mm bolǵan elektromagnit tolqınları aldı. Keyinirek (1924-jılı) M. A. Levitskaya uzınlıǵı 0.2 mm bolǵan tolqındı aldı. Moskva universitetiniń professorları V. K. Arkadev penen A. A. Glagoleva-Arkadevalar qısqa elektromagnit tolqınları maydıń ishinde júzip júrgen untalǵan metaldıń kishikene túyirtpekleriniń arasında payda bolatuǵın ushqınlarıń járdeminde alıwdıń originallıq usılın islep shıqtı. Olarǵa uzınlıǵı 0,1 mm bolǵan tolqınları alıwdıń sáti tústi. Bul tolqınlar eń uzın infrakızıl tolqınlarıń tolqın uzınlıǵınan ádewir kishi (III tomǵa qarańız). Usınıń menen bir waqıtta ádewir uzın bolǵan tolqınları alıwdıń usılları islep shıǵıldı.

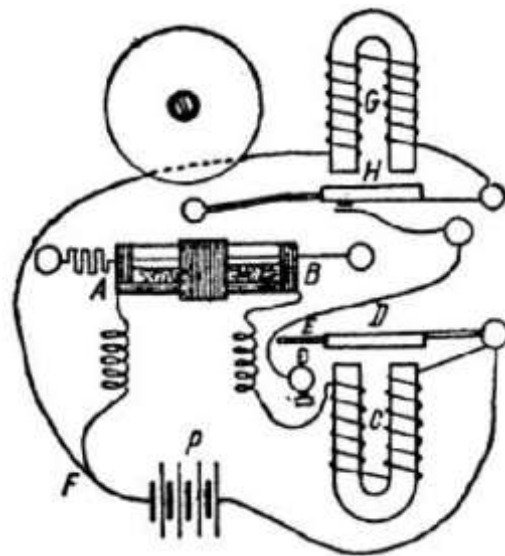
Elektromagnit tolqınlar menen ótkerilgen tájiriybeler belgili rus fizigi A. S. Popovtıń sımsız telegrafıyanı ashıwına alıp keldi. 1895-jılı A. S. Popov, metall poroshoktıń bir birine jabısıw qásiyetin paydalanıp hám usınday jollar menen joqarı jiyilikli elektr terbelisleriniń tásirinde óziniń elektr ótkizgishligin joqarılatatuǵının paydalanıp, elektromagnit tolqınlardıń birinshi sezgir qabıllaǵışın konstrukciyaladı.

354-súwrette A. S. Popovtıń qabıllaǵışınıń sxeması keltirilgen. Onıń tiykargı bólimi bolıp *AB* arqalı belgilengen *kogerer* dep atalatuǵın dúzilis xızmet etedi. Ol metaldıń untaǵı bar metall trubadan turadı. Kogerer galvanikalıq batareya *P* dan hám *CDE* relesinen turatuǵın shınjırǵa tutastırılǵan. Elektromagnit tolqınları ásbapqa jetip kelgende untaq metaldıń ótkizgishligi artadı hám shınjırda toq payda boladı hám usı toqtıń tásirinde *D* relesiniń yakorı elektromagnit tárepinen tartıladı hám *E* kontaktın tuyıqlaydı. Usınıń saldarınan usı *P* barateyasınan azıqlanatuǵın *HG* qońırawı tutasqan ekinshi shınjır da tuyıqlanǵan boladı.

Qońırawdıń balǵası qarama-qarsı baǵıttaǵı qozǵalıısında kogererdiń trubkasına urıladı, sol soqqınıń tásirinde metaldıń untaǵınıń qarsılıǵı qaytadan tiklenedi. Solay etip, elektromagnit tolqını kelip jetpegen jaǵdayda qabıllaǵış avtomat túrde háreket etiwın toqtatadı.

Bir jıl ótkennen keyin, 1896-jılı A. S. Popov Fizika-ximiyalıq jámiyettiń májilisinde dúnyadaǵı birinshi radiogrammanı alıp beriwdi demonstraciyaladı. Radiogramma májilis bolıp ótken Peterburg universitetiniń territoriyasına onnan 250 m qashıqlıqta jaylasqan Ximiyalıq instituttıń binasınan alıp berildi. A. S. Popov tárepinen sımsız telegrftıń ashılıwı texnikadaǵı ullı revolyuciyalıq ózgeriske alıp keldi.

354-súwret.
A.S.Popovtıń qabıllaǵışınıń sxeması.

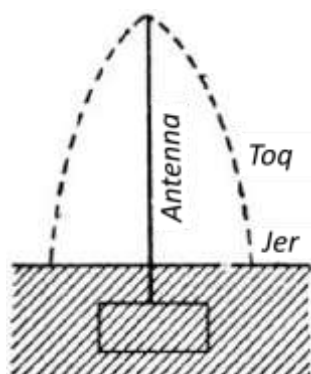


Radiotexnikanıń bunnan bılay rawajlanıwı tek sóniwshi terbelislerdi beretuǵın ushqınlı generatorlardı sónbeytuǵın terbelislerdi beretuǵın generatorlar menen almasırwǵa baǵıtlanǵan boldı. Sónbeytuǵın terbelislerdi paydalanıw signallardı alıp beriwden adamlardıń dawısların, muzıkanı, súwretlerdi alıp beriwge ótiwge múmkinshilik berdi. Sonlıqtan, XX ásirdiń jigirmalanshı jılları radiotexnika elektronlıq lampalardıń járdeminde generaciyaǵa ótti.

Generatordıń usınday túriniń sxeması 241-paragrafta táriyiplendi. Radioesittiriw maqsetlerinde kontur antenna menen induktivlik túrde baylanısadı. SHın mánisinde ápiwayı túrde antenna tómengi ushı Jer menen tutastırılǵan tuwrı vertikal baǵıttaǵı sim bolıp tabıladı. Simniń uzınlıǵı bılayınsha saylap alınadı: simda turǵın tolqınıń payda bolıwı hám toq kúshiniń shoǵırı onıń tómengi ushında, al toq kúshiniń túyini joqargı ushta bolıwı kerek. Bunday antenna Gerctiń vibratorınıń yarımımına usaydı hám onıń átirapında elektromagnit tolqınları túrindegi terbelislerdiń nurlanıwın támiyinleydi (355-súwret).

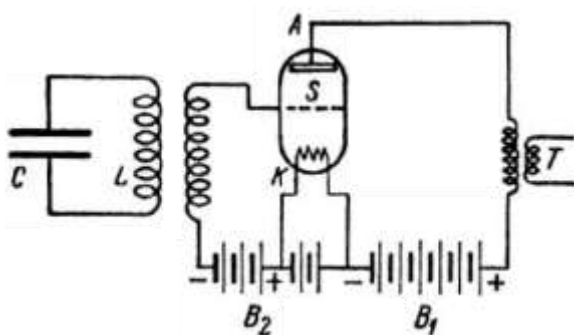
Elektromagnit tolqınlardıń bar ekenligin tabıw qabıl etetuǵın antenna menen kúsheytetuǵın

sistemanıń járdeminde ámelge asırıladı. Bunday sistemanıń terbelmeli konturı LC (356-súwret) antenna menen induktivlik arqalı baylanısqa (súwrette antenna kórsetilmegen). Konturda elektromagnit tolqınıń tásirinde májbúriy terbelisler qozadı. Rezonans shárti orınlanganda olardıń amplitudası úlken boladı, biraq payda bolğan toqlardı tikkeley ólshew ushın amplitudanıń mánisi dim kishi. Olardı ólshewdiń múmkin bolıwı ushın arnawlı *kúsheyttetuǵın sistemanıń* járdeminde olardı kúsheytedi. 356-súwrette kórsetilgen ápiwayı túrde bul sxema úsh elektrodlı lampadan turadı. Terbelmeli kontur S lampanıń torı menen induktivli túrde baylanısqa. LC konturında elektr terbelisleri payda bolǵanda "torlıq kernew" ózgeredi (241-paragrafqa qarańız), hám, demek, B_1 batareyasınan lampa arqalı ótetuǵın toq ta ózgeredi. Lampanıń jumıs islew shártin onı xarakteristikalıq tuwrı sızıqlı oblastında isleytuǵınday etip aladı (357-súwret). Eger bul tuwrı sızıqlı bólim jetkilikli dárejede tik bolsa, onda ΔV_S torlıq kernewdiń úlken emes ózgerisine ΔI_a anod toǵınıń ádewir úlken bolǵan ózgerisi sáykes keledi. Solay etip, rezonaciyalanatuǵın LC konturındaǵı ázzi terbelisler lampanıń shınjırındaǵı anod toǵınıń úlken terbelislerine alıp keledi. Biz qaraǵın kúsheyttetuǵın sxemada lampanıń shınjırındaǵı kúsheytiwshi B_1 batareyası xızmet etedi. Túsetuǵın elektromagnit tolqını tárepinen payda etilgen LC konturınıń terbelisleri tek lampaǵa tásir etedi B_1 batareyasınan ótetuǵın toqtıń kúshiniń ózgeriwin boldıradı. Anod toǵınıń terbelisleri T transformatorınıń járdeminde registraciyalaytuǵın apparatqa yamasa olardı bunnan bilay kúsheytiw ushın ekinshi lampanıń torına beriliwi múmkin.

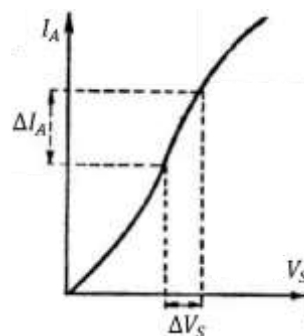


355-súwret.
Eń ápiwayı vertikal baǵıttaǵı antennanıń erkin terbelisleri.

Seslerdi alıp beriw ushın elektromagnit terbelisler *modullestiriledi*, yaǵnıy olardıń amplitudası ses terbelisleri menen birdey taktte ózgeredi. Bunday jaǵdayda joqarı jıyılıqlı elektromagnitlik terbelislerdiń grafiginıń ústinen júrgizilgen iymeklik ses jıyılıǵındaǵı terbelisler bolıp tabıladı (358-súwret). Amplitudanıń usınday ózgerisleri qabıllawshı stanciyada ses shıǵarǵıshlardıń járdeminde qaytadan sestı alıwǵa múmkinshilik beredi⁶¹.



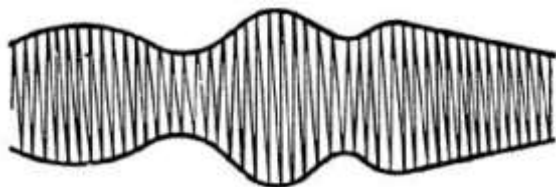
356-súwret. Elektromagnit terbelislerin kúsheytiwdiń sxeması.



357-súwret. Úsh elektrodlı lampanıń xarakteristikası.

⁶¹ Rus tilindegi "gromkogovoritel" sóziniń ornına "ses shıǵarǵısh" sózi qullanıldı. (Awdarıwshılar).

Modullestiriwdiń ápiwayı sxeması 359-súwrette kórsetilgen. Onda 338-súwretke sáykes keletuǵın generaciyalaytuǵın sxemanıń bir bólimi hám oń tárepte A antenması kórsetilgen. Generaciyalaytuǵın sxema antenna menen induktivli túrde baylanısqa. Súwrettiń joqarǵı bóliminde M mikrofondı ańǵartadı. Mikrofonnıń ishinde payda bolatuǵın kernewdiń terbelisleri, T transformatorında kúsheydi hám C_S torlıq kondensatordıń plastinkalarına beriledi. L_1 katushkasında payda bolatuǵın joqarı jiyilikli terbelisler C_S kondensatorı arqalı ańsat ótedi hám S lampasınıń torına beriledi. Usınıń menen birge, T transformatorınıń oramlarınıń úlken induktivlikke iye bolıwınıń sebebinen olar mikrofonnıń shıńırana tarmaqlanbaydı. Solay etip, generaciyalaytuǵın sistema oǵan mikrofon tutastırılmaǵan jaǵdaydaǵıday bolıp isley beredi. Mikrofondı payda bolatuǵın terbelisler ses jiyiliklerine, yaǵnıy lampalıq generator tárepinen qozdırılatuǵın jiyilikke salıstırǵanda ádewir tómén jiyilikke iye boladı. Sonlıqtan C_S kondensatorı T transformatorınan ótetuǵın toqqa generatordan ótetuǵın toqqa salıstırǵanda úlken qarsılıq kórsetedi. Nátiyjede, C_S kondensatorınıń plastinkalarında tek qosımsha potenciallar ayırması ǵana payda boladı. Al bul potenciallar ayırması torlıq V_S kernewin ózgertedi hám usınday jollar menen terbelislerdiń modulyaciyası júzege keledi.



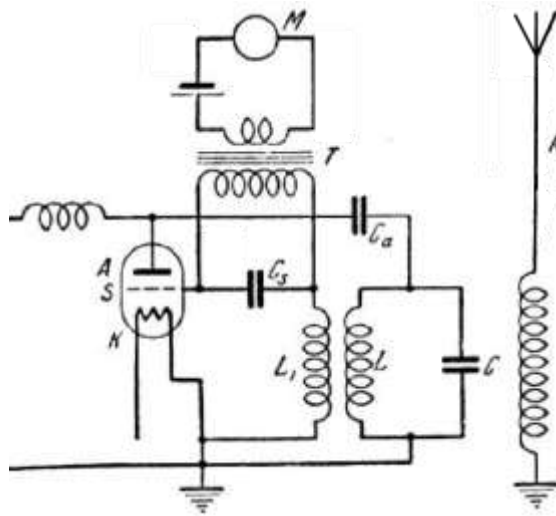
358-súwret.
Joqarı jiyilikli terbelislerdiń ústinen júrgizilgen iymeklik.

Alıp beriwshi hám qabıl etetuǵın radiostanciyalardıń ulıwmalıq sxeması 360-súwrette berilgen. Alıp beretuǵın stanciyada joqarı jiyilikli terbelislerdiń G generatorı belgili bolǵan ω jiyiligindegi sónbeytuǵın garmonikalıq terbelislerde beredi. Bul terbelisler MF mikrofonınan keletuǵın ses terbelislerine sáykes M modulyatordıń járdeminde modulyaciyalanadı. Bunnan keyin terbelisler kúsheytiwshi U_1 lampalıq sistemasınıń járdeminde kúsheytiledi hám induktivlik baylanıstırǵan járdeminde elektromagnit tolqınların nurlandıratuǵın A_1 antennasına beriledi. Qabıllawshı stanciyanıń A_2 antennasına jetip kelgen tolqın onda májbúrlawshı terbelislerdi qozdıradı. A_2 antenması RK rezonanslıq kontur menen induktivli túrde baylanısqa. Rezonanslıq konturda payda bolǵan májbúriy terbelisler U_2 lampalıq kúsheytiwshi sxema tárepinen kúsheytiledi. Kúsheytilgen terbelisler D tuwrılawshınıń (detektordıń) járdeminde tuwrılanadı; óziniń waqıtqa ǵárezligi boyınsha alıp beretuǵın stanciyadaǵı mikrofondı toqtı qaytadan tikleytuǵın tuwrılǵan I_0 toǵı (sxemada kórsetilmegen) tómengi jiyilikli kúsheytkishten keyin T ses shıǵarǵışına beriledi.

Radiotolqınlardıń tarqalıwı erkin keńislikte emes, al jaqsı ótkizgish bolıp tabılatuǵın Jerdiń beti boylap ámelge asadı. Sonlıqtan jiberetuǵın stanciyanıń antennasınıń átirapında 246-paragrafta qaralǵan tolqınlarday, sferalıq tolqın payda bolmaydı. Antenna tárepinen nurlandırılatuǵın tolqınlar Jerdiń betiniń baǵıtlawshı tásirine ushıraydı hám, sonıń saldarınan Jer sharın aylanıp ótedi. Jerdiń beti boyınsha tolqınlardıń tarqalıw máselesi akademik V. A. Fok tárepinen tolıq sheshildi. Qısqa elektromagnit tolqınlarınıń tarqalıwında tiykarınan ionlardan turatuǵın atmosferanıń biyik qatlamları úlken áhmiyetke iye (atmosferanıń joqarǵı qatlamlarındaǵı ionlar Quyashtıń ultrafiolet nurlarınıń tásirinde payda boladı). Atmosferanıń bul bólimi ionosfera dep ataladı. Qısqa elektromagnit tolqınlar ionosferada shıǵılısadı. Bul jaǵday olardıń Jer sharınıń beti boyınsha tarqalıwına kúshli tásir etedi.

Házirgi waqıtları, radiotelegraf, radiotelefonlar hám televidenie menen bir qatarda elektromagnit tolqınlarınınıń basqa da qollanıwları keń túrde islep shıǵılmaqta. Radiotexnikanıń rawajlanıwındaǵı ádewir áhmiyetli qádem qısqa elektromagnit tolqınlarǵa ótiw bolıp tabıladı (metrlik hám santimetrlik). Olar arnawlı formaǵa iye bolǵan antennalardıń járdeminde

bağıtlangan radiosignallardı alıwğa múmkinshilik beredi.



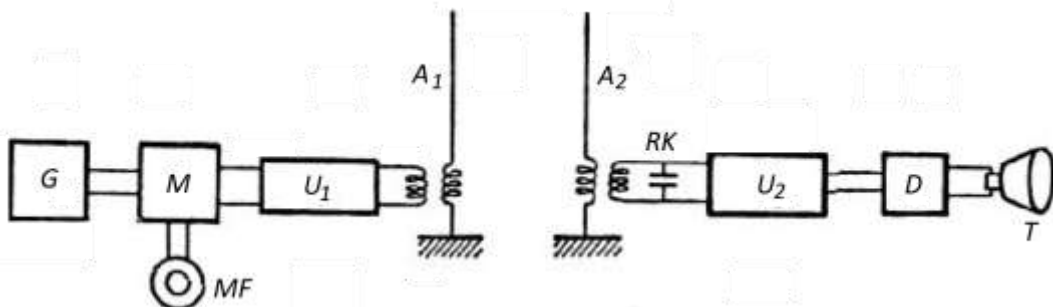
359-súwret.
Joqarı jiyilikli terbelislerdi modullestiriw
sxeması.

Elektromagnit tolqınlar óziniń jolında hár qıylı tosqınlıqlarǵa ushırap, bul tosqınlıqlarda tolqınlardıń bir bóliminiń irkiliwi, bir bóliminiń shaǵılıswı, jáne bir bóliminiń shashırawı múmkin. A.S.Popov 1897-jıldıń ózinde teńizdegi radiotelegraflaw boyınsha ótkerilgen tájiriybelerde korabldıń ekranlawshı tásiriniń bar ekenligin, korabldıń artında "radiosayanıń" payda bolatuǵınlıǵın taptı. Predmetlerdi úlken qashıqlaqlarda turıp tabıw hám olardıń ornın anıqlaw radiotolqınlardıń metall denelerden shaǵılıswı qubılısına tiykarlangan. *Radiolokaciya* dep atalatuǵın bul usıl SSSR da birinshi ret D.N.Rojanskiy hám YU.B.Kobzarev tárepinen islep shıǵıldı. Bul usıldıń mánisi mınaǵan alıp kelinedi: s generatordıń hám arnawlı sistemaniń járdeminde radiotolqınlardıń bağıtlangan dástesi alınadı; obektte shaǵılısqannan keyin (korabl, samolet) tolqınlar qabıllawshı dúziliske jetip keledi hám registraciyanadı. Jiberilgen signallardıń qabıl etiletuǵın signallarǵa kesent bermewi ushın signallardı úzik-úzik etip jeberedi. Hár bir signal sekundtıń millionlardan bir úlesindey waqıt dawam etedi, signallardıń arasındaǵı úzilis waqıtınıń shaması onnan onlaǵan, júzlegen ese úlken. SHıǵılısqan tolqınlardı registraciyalaw signallardıń arasındaǵı waqıtınıń ishinde ámelge asırıladı. Signaldı jiberiw hám qabıl etiw arasındaǵı waqıt boyınsha baqlanıp atırǵan obektke shekemgi qashıqlıq anıqlanadı. Usınday jollar menen obektlerdiń turǵan orınların anıqlaytuǵın dúzilisler *radarlar* atamasına iye boldı.

L.I.Mandelshtam hám N.D.Papaleksiler tárepinen shaǵılısqan nurlardıń fazalarınıń arasındaǵı awısıwdıń tiykarında qashıqlıqlardı júdá úlken dállikte anıqlaw usılı islep shıǵıldı.

Házirgi waqıtları radiotexnikalıq usıllardıń qollanıw oblastı júdá úlken tezlikler menen rawajlanbaqta.

Qısqa tolqınlarda tek Jerdiń jasalma joldasları menen ǵana emes, al bir neshe million kilometr qashıqlıqlardaǵı kosmoslıq raketalar menen de baylanıslar ornatılmaqta.



360-súwret. Alıp beretuǵın hám qabıl etetuǵın radiostanciyalardıń sxeması.

QOSIMSHA

ELEKTRLIK HÁM MAGNITLIK SHAMALARDIŇ
BIRLIKLER SISTEMALARI

Biz kurstıń hár qıylı bólimlerinde elektr hám magnit shamaların ólshew ushın hár qıylı birliklerdi paydalandıq.

Fizikada CGS-sisteması qabıl etilgen hám ol bilayınsha ornatıladı (I tomdağı 3-paragraf). Tiykargı birlikler sıpatında uzınlıqtıń birliǵı - santimetr, massanıń birliǵı - gramm hám waqıttıń birliǵı sekunda saylap alınadı; basqa barlıq fizikalıq shamalardıń birlikleri uzınlıq, massa hám waqıttıń arasındaǵı nızamlıqlardıń tiykarında tabıladı. Usınıń menen birge sáykes formulalarda proporcıonallıq koefficienti birge teń dep qabıl etiledi. Biraq, bul usıl bir mánisli emes. Bizler, mısalı, kúshitiń birliǵin eki usıldıń járdeminde tabıwǵa bolatuǵınlıǵın atap ótip edik (I tom, 32-paragraf): 1) Nyutonniń $f = mw$ nızamınıń tiykarında, bunday jaǵdayda proporcıonallıq koefficientin birge teń dep aladı; 2) pútkil dúnyalıq tartılıs nızamı $f = \frac{m_1 m_2}{r^2}$ nıń tiykarında, bul jaǵdayda da proporcıonallıq koefficientin birge teń dep alıw usınıladı. Birinshi jaǵdayda pútkil dúnyalıq tartılıs nızamın biz bilayınsha jazamız:

$$f = k \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

Bul jaǵdayda "gravitaciyalıq turaqlı" $k = 6,685 \cdot 10^{-8} \text{ sm}^3/\text{g} \cdot \text{sek}^2$. Ekinshi jaǵdayda Nyutonniń ekinshi nızamın bilayınsha jazıwımız kerek:

$$f = k' m w.$$

Bul jaǵdayda "dinamikalıq turaqlı" $k' = 1,496 \cdot 10^7 \text{ g} \cdot \text{sek}^2/\text{sm}^3$.

Solay etip, mexanikalıq shamalardı ólshewdiń eki CGS-sistemasın qurıw múmkin eken: 1) "dinamikalıq" hám 2) "gravitaciyalıq". Ádette tek dinamikalıq sistemanıń paydalanılatuǵınlıǵı belgili.

Tap sol sıyaqlı elektromagnit qubılısları haqqındaǵı tálimatta zaryadlardıń elektrostatikalıq óz-ara tásirlesiwiniń nızamlarına tiykarlanıp (CGSE-sistema) yamasa toqlardıń magnitlik óz-ara tásirlesiwine tiykarlanıp (CGSM-sistema) eki CGS-sistemasın quramız.

1. Absolyut elektrostatikalıq sistema (CGSE) Bul sistemada elektr zaryadınıń muǵdarı q boslıq ushın jazılǵan Kulon nızamınıń tiykarında anıqlanadı hám bul nızamdaǵı proporcıonallıq koefficientin birge teń dep boljaydı:

$$f = \frac{q_1 q_2}{r^2}. \quad (1)$$

(1)-formuladaǵı f kúshi dinalarda, qashıqlıq r santimetrlerde (tolıǵınaq 123-paragraftı qarańız). Dielektrikler ushın

$$f = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (2)$$

formulası orınlı. Bul formulada ε - dielektriklik turaqlı, onı *dereksiz san* dep ataydı [boslıq ushın (1)-teńlik boyınsha $\varepsilon = 1$, basqa ortalıqlar ushın $\varepsilon > 1$].

Elektr zaryadınıń muǵdarınıń CGSE-birliǵinen maydanniń kernewliginiń, potencıallar ayırmasınıń, qarsılıqtıń, basqa da shamalardıń CGSE-birlikleri tabıladı.

Bul sistemadaǵı magnit maydanınıń kernewliginiń birliǵin tabıw ushın mınaday qatnastı paydalanamız: sheksiz uzın tuwrı toqtıń r qashıqlıǵındaǵı magnit maydanınıń kernewligi H (193-paragraf):

$$H = \frac{2I}{r}$$

shamasına teń dep boljanadı (I arqalı toqtıń kúshi belgilengen).

I di CGSE-birliklerinde ólshep, magnit maydanınıń kernewliginiń CGSE-birliǵin tabamız.

Kernewligi H bolǵan magnit maydanındaǵı betiniń maydanı S_1 bolǵan hám I_1 toǵı ótip turǵan

tegis konturğa tásir etetuǵın kúshlerdiń momenti M , 191-paragrafta ayılıp ótilgendey, HI_1S_1 kóbeymesine proporcional:

$$M \sim HI_1S_1.$$

CGS-sistemada M nı dina $\times$ santimetrlerde, S_1 shamasın santimetrdiń kvadratında ólsheydi. H penen I_1 ushın biz CGSE-birliklerin saylap aldıq. Demek, biz tórt M , H , I_1 hám S_1 shamaları ushın ólshem birliklerin saylap aldıq. Bunnan M penen HI_1S_1 kóbeymesiniń arasındagı teńlikke ótkende biz proporcionallıq koefficientiniń mánisin 1 ge teń dep ala almaymız, al shaması $1/c^2$ qa teń dep bolǵan bazı bir koefficientti kirgiziwimiz shárt:

$$M = \frac{1}{c^2} HI_1S_1.$$

c koefficientiniń san mánisin tájiriybelerden anıqlawǵa boladı. Ólshewler $c = 2,998 \cdot 10^{10}$ sm/sek teńliginiń orınlanatuǵınlıǵın kórsetedi; ol *elektrodinamikalıq turaqlı* atamasına iye. Biziń kórip turǵanıımızday, c óziniń san mánisi boyınsha elektromagnit tolqınlarınń boslıqtaǵı tarqalıw tezligine sáykes keledi.

CGSE-sistemasında B magnit indukciyası ushın ólshem birlikti toq ótip turǵan konturğa tásir etetuǵın M momentin anıqlap,

$$M = BI_1S_1 \quad (5)$$

qatnasınıń járdeminde anıqlaydı. (4)- hám (5)-ańlatpalardı salıstırıp, boslıq ushın

$$B = \frac{1}{c^2} H \quad (6)$$

formulasına, al zatlar ushın

$$B = \mu H \quad (6a)$$

qatnaslarına iye bolamız. μ shaması $L^{-2}T^2$ ólshemine iye hám onıń san mánisi magnit sińirgishliktiń ádettegi mánislerinen c^2 ese kishi. (6)- hám (6a)-formulalardan CGSE-sistemasında **B** hám **H** vektorlarınıń hár qıylı ólshemlerge iye bolatuǵınlıǵı kórinip tur.

(6a) ańlatpanı boslıq ushın da saqlawǵa boladı. Onıń ushın mınaday ańlatpanı jazıw kerek:

$$B = \mu_0 H. \quad (6b)$$

(6)-teńleme menen salıstırıw bunday jaǵdayda $\mu_0 = \frac{1}{c^2}$ teńliginiń orınlanıwınıń kerek ekenligin kórsetedi. μ_0 shamasın geyde "boslıqtıń magnit sińirgishligi" dep te ataydı. Biraq bunday atama hesh qanday fizikalıq mániske iye emes. Biz joqarıda (201-paragraf) zattıń magnit sińirgishligi μ dıń onıń magnitleniw qábiletligi menen baylanıslı ekenligin kórdik, al magnitleniw bolsa, óz gezeginde, atomlar menen molekulalardıń magnit momentleri menen baylanıslı (turaqlı yamasa indukciyalanǵan). "Bos" sózin paydalanǵanıımızda materiyanıń atomlar menen molekulalaradan turmaytuǵın ayrıqsha túri bolǵan tek elektromagnit maydanı bar keńisliktiń bólimi ushın paydalandıq (152-paragrafta ayılǵanlar menen salıstırıńız). Elektromagnit maydanı belgili bolǵan fizikalıq qásiyetlerge iye boladı. Usı qásiyetlerdiń ishine elektromagnitlik uyıtqıwdı c tezligine teń tezlik jetkeriw qásiyeti de kiredi. Solay etip, elektrodinamikalıq turaqlı bolǵan c shaması atomlar menen molekulalardan turatuǵın zatlardıń qásiyetin emes, al elektromagnit maydanınıń belgili bolǵan obektiv qásiyeti ańǵartadı. Sonlıqtan $\mu_0 = \frac{1}{c^2}$ shaması zattıń magnit sińirgishligi μ menen hesh qanday uqsaslıqqa iye emes.

Magnitlik shamalardı ólshewdiń CGSE-birlikleri siyrek paydalanıladı.

2. Absolyut elektromagnit sistema (CGSM). Bul sistemada toqtıń kúshi I dıń ólshem birligi boslıqtaǵı toq ótip turǵan eki tuwrı hám sheksiz uzın parallel ótkizgishtiń arasındagı kúsh ushın jazılǵan ańlatpanıń tiykarında anıqlanadı (196-paragrafqa qarańız):

$$f = \frac{2I_1I_2}{r} l. \quad (7)$$

Bul ańlatpada f arqalı toqlardıń biriniń uzınlıǵı l ge teń bolǵan uchastkasına tásir etetuǵın kúsh, r arqalı toqlardıń arasındagı qashıqlıq belgilengen. Magnit maydanınıń kernewligi H tıń birligi (3)-qatnastıń tiykarında toqtıń kúshiniń CGSM-birliginiń tiykarında anıqlanadı. Magnit maydanınıń

kernewliginiń bul birligi *ersted* atamasına iye.

Magnit indukciyası B niń birligi

$$B = \mu H$$

qatnası boyınsha anıqlanadı. Bul qatnastaǵı ólshem birligine iye emes shama bolǵan magnitlik sińirgishlik μ toq ótip turǵan ótkizgishti berilgen zattıń ishine salǵanda toqlardıń arasındaǵı óz-ara tásir etisiwdiń neshe ese úlkeyetuǵınlıǵın kórsetedi. Magnit indukciyasınıń *CGSM*-birligi *gauss* dep ataladı. Gauss óziniń shaması hám birligi boyınsha *ersted*ke sáykes keledi.

$$\Phi = B_n S$$

qatnasınıń járdeminde anıqlanatuǵın magnit indukciyası Φ tiń *CGSM*-birligi *maksvell* dep ataladı.

CGSM-sistemada elektr zaryadınıń muǵdarı q dıń birligi $q = It$ qatnasınıń tiykarında toq kúshi I arqalı anıqlanadı. Solay etip, elektr zaryadınıń muǵdarınıń birligi zaryadlardıń elektrostatikalıq tásirlesiwinen gárezsiz saylap alınǵan bolıp shıǵadı. Sonlıqtan (1)-Kulon nızamına kiretuǵın barlıq f, q hám r shamalarınń birlikleri bar bolıp shıǵadı. Demek, Kulon nızamında belgili bolǵan san mánislerine hám ólshem birliklerge iye bolǵan koefficienttiń turıwı kerek. Bul koefficienttiń mánisin ańsat esaplawǵa boladı: *CGSM*-sistemasında zaryad q dıń birligi *CGSE*-sistemadaǵıǵa salıstırǵanda c ese úlken, al f kúshtiń hám r qashıqlıqtıń birlikleri birdey. Sonlıqtan, kúsh f tiń mánisiniń birdey bolıwı ushın *CGSE*-sistemanı paydalanǵanda Kulon nızamınıń oń tárepine c^2 shamasına teń kóbeytiwshini kirgiziw kerek:

$$f = c^2 \frac{q_1 q_2}{r^2}. \quad (8)$$

Dielektrikler ushın *CGSM*-sistemada Kulon nızamı

$$f = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (8a)$$

túrinde jazıladı.

Bunday jaǵdayda dielektriklik turaqlı bolǵan ε shaması $L^{-2}T^2$ ólshemine iye hám onıń san mánisi *CGSE*-sistemasındaǵıǵa ε ge salıstırǵanda c^2 ese kishi. (8a) ańlatpasın *CGSM*-sistemasında formallıq jaqtan saqlawǵa boladı hám boslıq ushın

$$f = \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

túrine iye. Bul formulanı (8)-ańlatpa menen salıstırıwdan bunday jaǵdayda $\varepsilon_0 = \frac{1}{c^2}$ teńliginiń orınlanıwınıń kerek ekenligi kórinedi. Geypara jaǵdaylarda ε_0 shamasın "boslıqtıń dielektriklik turaqlısı" dep te ataydı. Bul shama da *CGSE*-sistemasındaǵı $\mu_0 = \frac{1}{c^2}$ shaması ushın paydalanılatuǵın "boslıqtıń magnitlik sińirgishligi" ataması sıyaqlı fizikalıq mániske iye emes.

Elektr maydanınıń kernewligi *CGSM*-sistemada

$$E = \frac{f}{q} \quad (9)$$

teńliginiń járdeminde anıqlanadı. Bunnan kernewlik E niń ólshemleriniń $[E] = \frac{[f]}{[q]} = L^{1/2}M^{1/2}T^{-2}$ túrinde jazılatuǵınlıǵın kóremiz. *CGSM*-sistemadaǵı elektr kernewligi E niń birligi *CGSE*-sistemadaǵıǵa qaraǵanda c ese kishi.

Elektrostatikalıq indukciya D mınaday teńliktiń járdeminde anıqlanadı:

$$D = \varepsilon E. \quad (10)$$

CGSM-sistemada ε shamasınıń ólshem birligi bar bolǵanlıqtan, *CGSM*-sistemadaǵı elektrostatikalıq indukciya vektorı D niń ólshem birligi elektrostatikalıq kernewlik vektorınıń ólshem birliginen ózgeshe. Haqıyqatında da, $[D] = [\varepsilon] \cdot [E] = L^{-3/2} \cdot M^{1/2}$.

Boslıqta *CGSM*-sistemasındaǵı elektrostatikalıq indukciya D niń san mánisi maydanniń kernewligi E den c^2 ese kishi.

3. Absolyut gauss sisteması. Bul sistemada barlıq elektrlik shamalar ushın birlikler *CGSE*-birliklerge sáykes keledi, al magnitlik shamalar ushın birlikler *CGSM*-birliklerine sáykes

keledi. Bul sistemada dielektrikliq turaqlı ε hám magnitlik sińirgishlik μ ólshem birligine iye emes. Al boslıq ushın mınaday teńlikler orınlanadı:

$$\varepsilon = 1 \text{ hám } \mu = 1.$$

Birliklerdiń gausslıq sistemasın paydalanǵanda bir waqıtta elektrlik hám magnitlik shamalardı óziniń ishine alatuǵın barlıq formulalarǵa elektrodinamikalıq turaqlı c arqalı ańǵartılatuǵın sanlı koefficientler kiredi. Mısalı, Bio-Savar-Laplas nızamı mınaday túrge enedi:

$$H = \frac{1}{c} \cdot \frac{I \Delta l \sin \alpha}{r^2}.$$

Magnit maydanındaǵı toqtıń Δl elementine tásir etetuǵın kúsh ushın ańlatpa bılayınsha jazıladı:

$$\Delta f = \frac{1}{c} I B \sin \alpha \cdot \Delta l.$$

Faradeydiń indukciya nızamın bılayınsha jazamız:

$$E = -\frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt}.$$

Gausslıq sistemada Maksvell teńlemeleri 244-paragraftaǵı (4a) hám (8a) teńlemeleri túrinde beriledi.

XX keste *CGSE*, *CGSM*- hám gausslıq sistemalardaǵı tiykarǵı elektrlik hám magnitlik shamalardıń ólshemleri keltirilgen. XXI keste bolsa bul úsh sistemadaǵı birliklerdiń qatnasları berilgen.

XX keste

Birliklerdiń absolyut sistemalarındaǵı tiykarǵı elektrlik hám magnitlik shamalardıń ólshemleri

SHama	Sistemalar		
	<i>CGSE</i>	<i>CGSM</i>	Gauslıq
Dielektrikliq turaqlı ε	Ólshemi joq	$L^{-2} T^2$	Ólshemi joq
Elektr zaryadı q	$L^{3/2} M^{1/2} T^{-1}$	$L^{1/2} M^{1/2}$	$L^{3/2} M^{1/2} T^{-1}$
Elektr maydanınıń kernewligi E	$L^{-1/2} M^{1/2} T^{-1}$	$L^{1/2} M^{1/2} T^{-2}$	$L^{-1/2} M^{1/2} T^{-1}$
Elektr maydanınıń indukciyası D	$L^{-1/2} M^{1/2} T^{-1}$	$L^{-3/2} M^{1/2}$	$L^{-1/2} M^{1/2} T^{-1}$
Potencial V	$L^{1/2} M^{1/2} T^{-1}$	$L^{3/2} M^{1/2} T^{-2}$	$L^{1/2} M^{1/2} T^{-1}$
Toqtıń kúshi I	$L^{3/2} M^{1/2} T^{-2}$	$T^{1/2} M^{1/2} T^{-1}$	$L^{3/2} M^{1/2} T^{-2}$
Qarsılıq R	$L^{-1} T$	LT^{-1}	$L^{-1} T$
Sıyımlıq C	L	$L^{-1} T^2$	L
Magnitlik sińirgishlik μ	$L^{-2} T^2$	Ólshemi joq	Ólshemi joq
Magnit maydanınıń kernewligi H	$L^{1/2} M^{1/2} T^{-2}$	$L^{-1/2} M^{1/2} T^{-1}$	$L^{-1/2} M^{1/2} T^{-1}$
Magnit maydanınıń indukciyası B	$L^{-3/2} M^{1/2}$	$L^{-1/2} M^{1/2} T^{-1}$	$L^{-1/2} M^{1/2} T^{-1}$
Magnit indukciyasınıń aǵısı Φ	$L^{1/2} M^{1/2}$	$L^{3/2} M^{1/2} T^{-1}$	$L^{3/2} M^{1/2} T^{-1}$
Ózlik indukciya koefficienti L	$L^{-1} T^2$	L	L

4. Xalıq aralıq birlikler sisteması. Ólshemler menen salmaqlar boyınsha Xalıq aralıq konferenciya 1960-jılı qabıl etilgen birlikler sisteması mınaday tiykarǵı tórt birlikke tiykarlanǵan: metr, kilogramm, sekund, amper (I tomǵa qarańız). Bul sistemada kúshtiń birliǵı sıpatında 1 nyuton = 10^5 din, jumıstıń birliǵı sıpatında 1 djoul = 10^7 erg hám quwattıń birliǵı

sıpatında $1 \text{ vatt} = 10^7 \text{ erg/sek}$ qabil etilgen. Toq kúshiniń birligi bolǵan amper bir birine parallel bolǵan sheksiz ushın ótkizgishler arqalı toqlardıń óz-ara tásirlesiw kúshi boyınsha anıqlanadı (196-paragrafqa qarańız): amper boslıqta bir birinen 1 m qashılıqta jaylasqan eki parallel sımınıń hár bir metriniń bir birine $1 \cdot 10^7$ nyuton kúsh penen tásir etisiwin boldıratuǵın toqtıń kúshine teń. Usı anıqlama boyınsha $1 a = 0,1$ toqtıń *CGSM* -birligi. Qalǵan elektrlik birlikler mınaday qatnaslardıń tiykarında keltirip shıǵarıladı:

$$\begin{aligned} 1 \text{ amper} \times 1 \text{ sek} &= 1 \text{ kulon}, \\ 1 \text{ amper} \times 1 \text{ volt} &= 1 \text{ vatt}, \\ 1 \text{ amper} \times \text{om} &= 1 \text{ volt}, \\ 1 \text{ farada} \times 1 \text{ volt} &= 1 \text{ kulon}. \end{aligned}$$

XXI keste

Absolyut sistemalardaǵı birliklerdiń qatnasları

$$c = 2,998 \cdot 10^{10} \cong 3 \cdot 10^{10}.$$

SHama	1 <i>CGSE</i> -birlik teń <i>CGSM</i> -birlikke	Gauss birligi teń:	
		<i>CGSM</i> - birligine	<i>CGSE</i> -birligine
Dielektriklik turaqlı ϵ	$1/c^2$	$1/c^2$	1
Elektr zaryadı q	$1/c$	$1/c$	1
Elektr maydanınıń kernewligi E	c	c	1
Elektr maydanınıń indukciyası D	$1/c$	$1/c$	1
Potencial V	c	c	1
Toqtıń kúshi I	$1/c$	$1/c$	1
Qarsılıq R	c^2	c^2	1
Sıyımlıq C	$1/c^2$	$1/c^2$	1
Magnit sińirgishlik μ	c^2	1	$1/c^2$
Magnit maydanınıń kernewligi H	$1/c$	1	c
Magnit maydanınıń indukciyası B	c	1	$1/c$
Magnit indukciyasınıń aǵısı Φ	c	1	$1/c$
Ózlik indukciya koefficienti L	c^2	1	$1/c^2$

Magnitlik birlikler indukciya nızamınıń tiykarında keltirip shıǵarıladı, atap aytqanda: magnit aǵısı Φ tiń birligi sıpatında qarsılıǵı 1 om ǵa teń bolǵan tuyıq kontur arqalı nolge shekem kemeygende payda bolǵan e.q.kúshiniń tásirinde 1 k shamasına teń elektr zaryadı aǵıp ótetuǵın aǵıs qabil etilgen. Aǵıstıń bul birligi *veber* dep ataladı. $1 \text{ vb} = 10^8 \text{ mks}$ teńliginiń orınlanatuǵınlıǵın ańsat esaplap shıǵarıwǵa boladı.

Magnit indukciyası V nıń birligi

$$B_n = \frac{\Phi}{S}$$

qatnasınıń tiykarında anıqlanadı. Bunnan magnit indukciyasınıń birligi retinde 1 *vb* shamasına teń bir tekli magnit aǵısı 1 m^2 shamasındaǵı maydandı kelip ótkende payda bolatuǵın indukciyanıń qabil etiletuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Magnit indukciyasınıń bil birligin *tesla* dep ataydı. Magnit

indukciyasınıń usı birliǵı menen gausstıń aralıǵında mınaday qatnas bar:

$$1 \text{ tesla} = 1 \text{ vb/m}^2 = 10^4 \text{ gs}.$$

Xalıq aralıq birlikler sistemasında formulalardı "racionallıq" jazıw dep atalatuǵın sistema qollanıladı. Ol 244-paragraftaǵı (4b) hám (5a), (8b) hám (9a) Maksvell teńlemeleriniń

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{i} + \dot{\mathbf{D}},$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\dot{\mathbf{B}},$$

$$\text{div } \mathbf{D} = \rho,$$

$$\text{div } \mathbf{B} = 0$$

túrine eniwine tiykarlangan. $\mathbf{D}$ hám $\mathbf{E}$ jáne $\mathbf{B}$ hám $\mathbf{H}$ vektorlarınıń arasındaǵı baylanıs sáykes formulalar menen beriledi:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}, \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}.$$

Bunday jaǵdayda Kulon hám Bio-Savar-Laplas nızamları bılayınsha jazıladı:

$$f = \frac{q_1 q_2}{4\pi \varepsilon r^2}, \quad (11)$$

$$\Delta H = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{I \Delta l \sin \alpha}{r^2}. \quad (12)$$

Boslıq ushın (11) Kulon nızamın bılayınsha kóshirip jazıwǵa boladı:

$$f = \frac{q_1 q_2}{4\pi \varepsilon_0 r^2}.$$

Bul formalada ε_0 - "boslıqtıń dielektriklik turaqlısı". Xalıq aralıq sistemada "boslıqtıń dielektriklik turaqlısı" nıń ólshemge iye hám san mánisiniń

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi c^2 \cdot 10^{-7}}$$

shamasına teń ekenligin ańsat kóriwge boladı. Bul formulada c - m/sec larda ańǵartılǵan elektromagnit tolqınlardıń boslıqtaǵı tezligine, yaǵnıy $c = 2,998 \cdot 10^8 m/sec$ shamasına teń.

(12)-ańlatpa formasında jazılǵan Bio-Savar-Laplas nızamınan tuwrı hám uzın ótkizgishten r qashılıǵındaǵı magnit maydanınıń kernewligi H tıń mınaǵan teń ekenligi kelip shıǵadı:

$$H = \frac{I}{2\pi r}.$$

Bul teńliktiń tiykarında 196-paragrafta kórsetilgen bir amper toq ótip turǵan uzın tuwrı ótkizgishen $r = \frac{1}{2\pi} m$ qashılıqtaǵı magnit maydanınıń kernewliginiń ólshem birliǵı bolǵan "bir metrdegi amper" kelip shıǵadı.

B hám H ushın birliklerdi salıstırıwdan praktikalıq sistemada "boslıqtıń magnit sińirgishligi" niń $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (ólshem birlikke iye emes san) shamasına teń ekenligi kelip shıǵadı.

Birliklerdiń halıq aralıq sisteması sońǵı waqıtları SSSR ra qabıl etilgen "praktikalıq sistema" ǵa sáykes keledi. Bul sistema *MKSA*-sistema dep belgilendi. Tiykargı elektrlik hám magnitlik shamalardıń halıq aralıq sistemadaǵı ólshem birlikleri XXII kestedede keltirilgen. Xalıq aralıq sistemadaǵı shamalardıń ólshemleri *CGSM*-sistemadaǵı ólshemlerge sáykes keledi hám xalıq aralıq sistemanıń barlıq elektrlik hám magnitlik birlikleri *CGSM*-sistemanıń birliklerinen pútin san ese ayrıladı.

Birliklerdiń MKSA-sisteması

SHama	Ataması	Ólshemi	1 MKSA-birlik = CGSM-birlikke
Dielektriklik turaqlı ϵ	-	$L^{-2}T^2$	$4\pi \cdot 10^{-7} \cong 1,26 \cdot 10^{-6}$
Elektr zaryadı q	Kulon	$L^{1/2}M^{1/2}$	10^{-1}
Elektr maydanınıń kernewligi E	bir metrdegi volt	$L^{1/2}M^{1/2}T^{-2}$	10^6
Elektr maydanınıń indukciyası D	bir kvadrat metrdegi kulon	$L^{-3/2}M^{1/2}$	$4\pi \cdot 10^{-1} \cong 1,26$
Potencial V	volt	$L^{3/2}M^{1/2}T^{-2}$	10^8
Toqtırń kúshi I	amper	$L^{1/2}M^{1/2}T^{-1}$	10^{-1}
Qarsılıq R	om	LT^{-1}	10^9
Sıyımlıq C	farada	$L^{-1}T^2$	10^{-9}
Magnit sińirgishligi μ	-	ólshemi joq	$\frac{10^{-7}}{4\pi} \cong 7,96 \cdot 10^5$
Magnit maydanınıń kernewligi H	bir metrdegi amper	$L^{-1/2}M^{1/2}T^{-1}$	$4\pi \cdot 10^{-3} \cong 1,26 \cdot 10^{-2}$
Magnit maydanınıń indukciyası B	tesla	$L^{-1/2}M^{1/2}T^{-1}$	10^4
Magnit indukciyasınıń aǵısı Φ	veber	$L^{3/2}M^{1/2}T^{-1}$	10^8
Ózlik indukciya koefficienti L	genri	L	10^9