

**O'ZBEKSTAN RESPUBLIKASI' JOQARI' HA'M ORTA
ARNAWLI' BILIM MINISTRILIGI**

**BERDAQ ATI'NDAG'I' QARAQALPAQ MA'MLEKETLIK
UNIVERSITETI**

Magistratura bo'limi

Uli'wma fizika kafedrası'

**KONDENSACIYALANG'AN ORTALI'QLAR
FIZIKASI'**

pa'ni boyi'nsha oqi'w-metodikali'q kompleks

Magistratura bo'liminin' 2-kursi' ushi'n arnalg'an

No'kis 2013

ЎЗБЕКИСТОН РЕСПУБЛИКАСИ
ОЛИЙ ВА ЎРТА МАХСУС ТАЪЛИМ ВАЗИРЛИГИ

Рўйхатга олинди
№ _____
201_ йил “__” _____

Ўзбекистон Республикаси
Олий ва ўрта махсус таълим
вазирининг 201_ йил “__”
_____даги “__”-сонли буйруғи
билан тасдиқланган

«КОНДЕНСАЦИЯЛАНГАН МУҲИТЛАР ФИЗИКАСИ»
фанининг

ЎҚУВ ДАСТУРИ

Билим соҳаси: 100000 - Гуманитар соҳа
Талим соҳаси: 140000 - Табiiй фанлар
Мутахассислик: 5А 140204 – Конденсацияланган муҳитлар физикаси ва
материалшунослик (турлари бўйича)

Тошкент – 201_

Фаннинг ўқув дастури Олий ва ўрта махсус, касб-хунар талими ўқув-методик бирлашмалари фаолиятини Мувофиқлаштирувчи Кенгашнинг 201_ йил “__” _____даги “__” - сон мажлис баёни билан мақулланган.

Фаннинг ўқув дастури Мирзо Улуғбек номидаги Ўзбекистон Миллий университетида ишлаб чиқилди.

Тузувчилар:

Власов С.И. – физика-математика фанлари доктори, профессор.
Назирова Д.Э. – физика-математика фанлари номзоди, доцент.

Тақризчилар:

Зикриллаев Н.Ф. – физика-математика фанлари доктори, профессор (ТДТУ).
Каримов А.В. – физика-математика фанлари доктори, профессор (ЎЗР ФА ФТИ).

Фаннинг ўқув дастури Мирзо Улуғбек номидаги Ўзбекистон Миллий университетининг ўқув-методик кенгашида тавсия қилинган (201_ йил “__” _____даги “__” - сонли баённома).

Кириш

“Конденсацияланган муҳитлар физикаси” - кўплаб эркинлик даражасига эга, ўзаро кучли боғланган зарралардан ташкил топган ва мураккаб боғланган муҳитлар физикасини ўрганувчи фандир. Ушбу фаннинг тадқиқот объектларига структураси ва тузилиши бўйича (кристалл ва аморф қаттиқ яримўтказгичлар, органик полимерлар ва компаундлар), шунингдек агрегат ҳолати бўйича (қаттиқ жисмлар ва суюқликлар) кенг қатордаги моддалар киради.

Ўқув фанининг мақсади ва вазифалари

“Конденсацияланган муҳитлар физикаси ва материалшунослик (турлари бўйича)” магистратура мутахассислигининг намунавий ўқув режасига “Конденсацияланган муҳитлар физикаси” фани билан бир қаторда, “Диэлектриклар физикаси”, “Полимерлар физикаси” (органик ва ноорганик полимерлар), “Суюқ кристаллар физикаси”, “Қотишмалар физикаси” каби фанлар киритилган бўлиб, қуйидаги “Конденсацияланган муҳитлар физикаси” фанининг асосий мақсади, конденсацияланган муҳитларнинг зонавий асослари, конденсацияланган муҳитларни – яримўтказгичларни тавсифлаш учун физикада фойдаланадиган асосий тушунчалар, назарий тасаввурлар ва моделлар билан магистрантларни таништиришдир. Ушбу ўқув фанида асосий этибор қаттиқ жисмлар – яримўтказгичларда кечадиган физик жараёнлар ва ҳодисаларни ўрганишга қаратилган бўлиб, ушбу ҳол “Конденсацияланган муҳитлар физикаси ва материалшунослик (турлари бўйича)” мутахассислиги бўйича навбатда ўрганиладиган навбатдаги қатор фанлар билан боғлиқдир. Ушбу фаннинг вазифаси талабаларда келажакда мустақил илмий тадқиқот ва амалий ишлаб чиқариш жараёнларида конденсацияланган муҳитлар – яримўтказгич материалларни физик-кимёвий хоссалари бўйича ажрата билиш, иш вазифаси бўйича талабларга мос келувчи яримўтказгич асбобларнинг хосса ва параметрларини назарий ҳисоблай билиш ва ярата олиш уқув ва малакаларини ҳосил қилишдан иборатдир.

Фан бўйича талабаларнинг билимига, малака ва кўникмасига қўйиладиган талаблар

1. Магистрант ушбу курсни яхши ўзлаштириши учун электр курси, квант механикаси ва статистик физиканинг бўлимлари, шунингдек олий математиканинг зарурий бўлимлари бўйича етарли билим ва кўникмаларга эга бўлиши керак. Курснинг катта қисмини аудиториядан ташқари ишлар ташкил этади. Бундан ташқари ушбу дастур ўз ичига ҳамраб олган лаборатория машғулотларини ўтказиш учун талаба замонавий ўлчов аппаратуралари билан таниш бўлиши ва электрик ўлчовлар ўтказиш олиш кўникмасига эга бўлиши талаб этилади.

2. Магистрантлар учун лаборатория ишларини ярата билиш, ишни сошлаш, ишни амалий бажариш тартибини аниқлай олиш, ишни бажариш ва натижаларни таҳлил қилиш, эксперимент хатоликларини, ҳисоблаш ва тажриба сифатини ҳулосалашни билишлари керак. Тажрибаларда ишлатиладиган ўлчов асбобларидан тўғри ва аниқ фойдаланиши зарур.

3. Семинар машғулотлари бўйича: ўқитувчи томонидан тавсия қилинган адабиётлар билан мустақил ишлаши, семинар мавзусига тегишли маруза жараёнида физик қонуниятлар бўйича кенгроқ ва чуқурроқ мулоҳаза қилиши, фанга оид мавзуларни амалиётдаги ўрни тўғрисида малумотларга эга бўлиши, семинар мавзулари бўйича юқори савияда ва мантиқан кетма-кетликда марузалар қилиши, семинар мавзулари бўйича талаб даражасида рефератлар ёзиши, ўзаро савол-жавоб ва мулоқатларда юқори кўрсаткичларга эга бўлиши зарур.

Фаннинг ўқув режадаги бошқа фанлар билан ўзаро боғлиқлиги ва услубий жиҳатдан узвий кетма-кетлиги

Магистрантлар ушбу курсни яхши ўзлаштириши учун “Электр”, “Кимё”, “Квант механикаси”, “Электродинамика”, “Термодинамика”, “Қаттиқ жисм физикаси”, “Статистик физика” фанларининг бўлимлари, шунингдек “Олий математика”нинг зарурий бўлимлари бўйича етарлича билим ва кўникмаларга эга бўлиши керак.

Фанни ўқитишда замонавий ахборот ва педагогик технологиялар

Ўқув дастурида акс эттирилган мавзулар маруза, семинар ҳамда лаборатория машғулоти шаклида олиб борилиб, фаннинг долзарб масалалари бўйича талабалар томонидан мустақил ўзлаштириш ҳам этиборга олинган.

Ушбу фанни ўқитишда конденсацияланган муҳитлар - яримўтказгичлардаги физик ҳодисалар ва қонунларнинг намойиши, ўқув кинофильмлари, тажриба натижаларини компьютерлаштирилган махсус дастурлар ёрдамида мультимедиялардан фойдаланиш, Интернет тармоғидан, кўргазмали материаллардан, шунингдек, илғор педагогик технологиялардан фойдаланиш мумкин.

Асосий қисм

Конденсацияланган муҳитлар физикаси фанининг предмети, вазифаси ва манбалари

“Конденсацияланган муҳитлар физикаси” фани. Фаннинг вазифаси. Фаннинг “Конденсацияланган муҳитлар физикаси ва материалшунослик (турлари бўйича)” мутахассислигининг бошқа бўлимлари билан боғлиқлиги. Фанни ўрганишдаги муаммолар, услубий кўрсатмалар. Фанни ўрганишда электрон дарсликлар ва мультимедиялардан фойдаланиш. Интернет тизимидан фойдаланиш ва улардан олинган малумотларни ўрганиш хусусиятлари. Предметлараро боғланиш. “Конденсацияланган муҳитлар физикаси” фанининг “Конденсацияланган муҳитлар физикаси ва материалшунослик (турлари бўйича)” мутахассислигининг бошқа бўлимлари ва бошқа табиий фанларни ўрганишдаги роли. Баҳолаш мезонлари.

Конденсацияланган муҳитлар физикаси

Кириш. Фаннинг мақсади ва вазифалари. Конденсацияланган муҳитларнинг зонавий назарияси асослари. Кристалл панжаралар. Кристалл панжаралар турлари. Кристалларда нуқсонлар. Кристаллар учун Шредингер тенгламаси. Бир электронли ва адабиатик яқинлашиш. Рухсат этилган зонадаги ҳолатлар сони. Бриллюэн зонаси тушунчаси. Заряд ташувчиларнинг самаравий массаси. Яримўтказгичларнинг энергетик зоналари структураси. Квант ҳолатлари. Ферми-Дирак тақсимот функцияси. Киришмавий ва хусусий ўтказувчанлик тушунчаси. Ферми сатҳи ҳолати ва унинг температуравий боғлиқлиги. Конденсацияланган муҳитларнинг электрик ўтказувчанлиги. Конденсацияланган муҳитларда кинетик ҳодисалар. Гальваномагнитик, термоэлектрик ва термомагнитик самаралар. Холл самараси. Заряд ташувчиларнинг туннелланиши. Франц-Келдиш самараси. Номувозанат ва мувозанатли заряд ташувчилар. Генерация-рекомбинация ҳодисалари. Заряд ташувчиларнинг яшаш вақти ҳақида тушунча. Диффузиявий ва дрейф тоқлари. Тоқнинг узлуксизлик тенгламаси. Эйнштейн муносабати. Ноасосий заряд ташувчилар ҳаракати. Конденсацияланган муҳитларда сиртий ҳодисалар.

Лаборатория машғулотларини ташкил этиш бўйича кўрсатма

Махсус фанлардан лаборатория машғулотларининг уствор мақсади назарий билимларни амалий масалаларга тадбиқ қилишга қаратилган.

Лаборатория ишларининг тавсия этиладиган мавзулари:

1. Яримўтказгич материалнинг ўтказувчанлик турини аниқлаш.
2. Яримўтказгич материалнинг солиштирма қаршилигини тўрт зондли усул ёрдамида аниқлаш.
3. Яримўтказгич материалнинг солиштирма қаршилигини Ван-Дер- Пау усули ёрдамида аниқлаш.
4. Заряд ташувчилар концентрациясини ва уларнинг ҳаракатчанлигини Холл эффекти ёрдамида аниқлаш.
5. Яримўтказгич материалнинг иссиқлик ўтказувчанлик коэффициентини аниқлаш.

Семинар машғулотларни ташкил этиш бўйича кўрсатмалар

Семинар машғулотлари фанга тегишли бўлимлар бўйича марузалар қилиш ва рефератлар ёзиш орқали амалга оширилади.

Семинар машғулотларнинг тахминий тавсия этиладиган мавзулари:

1. Кристалларда кимёвий алоқалар турлари.
2. Кристалл панжаралар таснифи.
3. Яримўтказгичларда нуқсонлар турлари.
4. Аморф яримўтказгичлар.
5. Яримўтказгичларда заряд ташувчиларнинг сочилиш механизмлари.
6. Яримўтказгич сиртида юз берувчи физик жараёнлар.
7. Киришмали яримўтказгичлар ва уларнинг зонавий структураси.
8. Яримўтказгичларни легирлаш усуллари.
9. Яримўтказгичларга ишлов бериш усуллари.
10. Яримўтказгичларда гальваноманит, термоэлектрик ва термомагнит ҳодисалар.
11. Яримўтказгичларни ўстириш усуллари.

Курс иши бўйича услубий кўрсатмалар

“Конденсацияланган муҳитлар физикаси” фани бўйича курс ишини тайёрлашда куйидаги вазифаларни ҳал этиш назарда тутилади:

- фаннинг долзарб назарий масалалари бўйича билимларни чуқурлаштириш, талаба томонидан мавзуга оид олинган назарий билимларни ижодий қўллаш кўникмасини ҳосил қилиш;
- танланган мавзу бўйича ҳар хил манбаларни (диссертация, монография, даврий нашрлардаги илмий мақолалар) ўрганиш қобилиятини такомиллаштириш ва уларнинг натижалари асосида танқидий ёндошган тарзда мустақил ҳолда материални ифода этиш, ишончли хулоса ва таклифлар киритиш;
- ёзма кўринишдаги ишларни тўғри расмийлаштириш кўникмаларини ривожлантириш ва бошқалар.

Мустақил ишни ташкил этишнинг шакли ва мазмуни

Мустақил иш ўқитувчининг талабаларга аввалдан бериб қўйиладиган фаннинг мавзулари асосида ташкил этилади. Талаба мустақил ишни тайёрлашда муайян

фаннинг хусусиятларини ҳисобга олган ҳолда қуйидаги шакллардан фойдаланиш тавсия этилади:

- Лаборатория ишларига тайёргарлик кўриш ва олинган натижаларни қайта ишлаш;
- Семинарга тайёргарлик кўриш;
- дарслик ва ўқув қўлланмалар бўйича фан боблари ва мавзуларини ўрганиш;
- махсус адабиётлар бўйича фан бўлимлари ёки мавзулари устида ишлаш;
- фан мавзулари бўйича реферат ёзиш;
- фан мавзулари бўйича маруза қилиш;
- танланган мавзу бўйича ўзаро савол-жавоблар ўтказиш.

Тавсия этилаётган мустақил ишларнинг мавзулари:

1. Кристалларда кимёвий алоқалар турлари.
2. Кристалл панжаралар таснифи.
3. Яримўтказгичларда нуқсонлар турлари.
4. Аморф яримўтказгичлар.
5. Яримўтказгичларда заряд ташувчиларнинг сочилиш механизмлари.
6. Яримўтказгич сиртида юз берувчи физик жараёнлар.
7. Киришмали яримўтказгичлар ва уларнинг зонавий структураси.
8. Ҳозирги замон микро- ва наноэлектроникасида яримўтказгичларнинг ўрни.

Дастурнинг информацион-услубий таминоти

Ўқув дастуридаги мавзуларни ўтишда талимнинг замонавий методларидан кенг фойдаланиш, ўқув жараёнини янги педагогик технологиялар асосида ташкил этишнинг самарали натижаларидан келиб чиқиб, тегишли мавзулар бўйича фойдаланиш имконияти бўлган техник воситалар ёрдамида намоёни тажрибалари, фанга оид қонуниятларни акс эттирувчи ўқув-анимацион фильмлари, кўргазмали материаллар ва янги педагогик технологиялар, фандаги янгиликлар ҳамда интернет материалларидан фойдаланиш.

Фойдаланиладиган асосий дарсликлар ва ўқув қўлланмалар рўйхати

Асосий дарсликлар ва ўқув қўлланмалар:

1. Зайнобидинов С., Тешабоев А.Т. Яримўтказгичлар физикаси. Т. «Ўқитувчи». 1999.
2. Тешабоев А., Зайнобиддинов С., Эрматов Ш. Қаттиқ жисм физикаси. Т. «Молия». 2001.
3. Назиров Э.Н., Тешабоев А.Т., Назиров Д.Э. Яримўтказгич терминлари. ЎзМУ. 2003.
4. Nazirov E.N., Nazirov D.E., Teshaboyev A.T. Yarimo'tkazgichlar fizikasi lug'ati. Т. «Universitet». 2008.
5. Ҳабибуллаев П.Қ., Назиров Э.Н., Отажонов Ш.О., Назиров Д.Э. Физика изоҳли луғати. Т. «Ўзбекистон миллий энциклопедияси». 2002.
6. Юнусов М.С., Власов С.И., Назиров Д.Э., Толипов Д.О. Электрон асбоблар. Т. ЎзМУ. 2003.
7. Маматкаримов О.О., Власов С.И., Назиров Д.Э. «Яримўтказгич материаллар ва асбоблар физикаси практикуми». Т. ЎзМУ. 2007.
8. Тешабоев А., Зайнобиддинов С., Мусаев Э.А. Яримўтказгичлар ва яримўтказгичли асбоблар технологияси. Т. «Ўзбекистон». 2005.
9. Шалимова К.В. Физика полупроводников. М. Энергия. 1985.

10. Фистуль В.И. Введение в физику полупроводников. М. Высшая школа. 1984.
11. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников В.Л. Физика полупроводников. М. Наука. 1990.

Қўшимча адабиётлар:

1. Ансельм А.М. Введение в теорию полупроводников. М. Наука. 1978.
2. Смит Р. Полупроводники. М. Мир. 1982.
3. Киреев П.С. Физика полупроводников. М. Высшая школа. 1970.
4. Павлов А.П. Методы определения основных параметров полупроводниковых материалов. М. Энергия. 1975.
5. Федотов Я.А. Основы физики полупроводниковых приборов. М. Радио. 1970.
6. Ковтонюк Н.Ф., Концевой Ю.А. Измерение параметров полупроводниковых материалов. М. Мир. 1970.
7. Матаре Г. Электроника дефектов в полупроводниках. М. Мир. 1974.
8. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М. Наука. 1978.
9. Шаскольская М.П. Кристаллография. М. Высшая школа. 1984.
8. http://electro-t.info/ref/pr6jkovo1_provodimosti.html
10. <http://irc.spbu.ru/Library/Method/index.html>
11. <http://www.college.ru/physics/index.php>
12. Сайт международного союза кристаллографов <http://www.iucr.org/>

1-semestr. Lekciyalari q sabaqlar ko'lemi 40 saat, laboratoriyali q sabaqlar 20 saat, seminarlar 20 saat, o'z betinshe jumi's 40 saat. Ja'mi 120 saat.

Kurs jumi'si' tapsi'ri'ladi'.

Pa'nnin' sabaqlarg'a mo'lsherlengen oqi'w programmasi' Qaraqalpaq ma'mleketlik universitetinin' ilimiy-metodikali'q ken'esinin' 2012-jil 29-iyun ku'ngi ma'jilisinde qarap shi'g'i'ldi' ha'm maqullandi'. Protokoldi'n' qatar sani' 6.

Pa'nnin' sabaqlarg'a mo'lsherlengen oqi'w programmasi' uli'wma fizika kafedrasini'n' ilimiy-metodikali'q seminari'ni'n' 2012-jil 20-iyun ku'ngi ma'jilisinde qarap shi'g'i'ldi' ha'm maqullandi'. Protokoldi'n' qatar sani' 11.

Du'ziwshi professor B.Abdikamalov

Sabaqlarg'a mo'lsherlengen oqi'w bag'darlamasi'

№	Temalar atamaları'	Lek- ciya- lar	Labo- rat.	Semi- nar- lar	O'z betin- she
1	“Kondensaciyalang'an ortali'qlar fizikasi” pa'ni. Pa'ndi u'yreniw processini aldi'nda turg'an wazi'ypalar. Pa'nnin' “Kondensaciyalang'an ortali'qlar fizikasi' ha'm materialtani'w (tu'rleri boyi'nsha)” qanigeliginin' basqa da bo'limleri menen baylani'si'. Pa'ndi u'yreniw bari'si'nda tuwi'li'wi' mu'mkin bolg'an mashqalalar, metodikali'q ko'rsetpeler.	2			2
2	Pa'ndi u'yreniwde elektronli'q oqi'w qollanbalari' menen multimediyalardan	2			2

	paydalani'w. Internet sistemasi'nan paydalani'w ha'm olardan ali'ng'an mag'li'wmatlardi' u'yreniw din' o'zgesheliklari. Predmetler arali'q baylani's. "Kondensaciyalang'an ortalig'lar fizikasi'" pa'ninin' fanining "Kondensaciyalang'an ortalig'lar fizikasi' ha'm materialtani'w (tu'rleri boyi'nsha)" qa'nigeliginin' basqa bo'limlari ha'm basqa ta'biyiy pa'nlerdi u'yreniwdegi tutqan orni'. Bilimni bahalaw kriteriyalari.				
3	Kirisiw. Kondensaciyalang'an ortalig'lardin' ha'zirgi zaman teoriyalari'ni'n' tiykarlari'. Kondensaciyalang'an hal tu'sinigi. Kristall ha'm kristalli'q pa'njereler.	2			2
4	Kristallar simmetriyasi'. Noqatli'q ha'm translyaciyali'q simmetriya elementlari. Simmetriyalig'q operaciyalar. Simmetriya gruppalari'. Kristalli'q pa'njerenin' tu'rleri.	2		2	2
5	Kristallardag'i' defektler. Noqatli'q defektler. Bir o'lsheмли defektler (dislokaciyalar).	2		2	2
6	Eki o'lsheмли (jaylasti'ri'w defektleri) ha'm u'sh o'lsheмли defektler. Defektlerdi eksperimentalli'q uyreniw usi'llari'. Rentgenografiya (topografiya) ha'm elektronli'q mikroskopiya.	2			2
7	Kondensaciyalang'an ortalig'lardag'i' atomlar arasi'ndag'i' ta'sirlesiwler ha'm baylani'slardin' tiykarig'i' tiplari. Atomlardin' ximiyali'q aktivliginin' energiyali'q xarakteristikalarig' (ionizaciya potentsiali', ximiyali'q uqsasli'q energiyasi', elektrlik jaqtan terisililik) ha'm olardi' bahalaw usi'llari'. Atomlar arasi'ndag'i' ku'shlerdin' uli'wmali'q xarakteristikasi'. Atomlar menen molekulalardag'i' ximiyali'q baylani'slardin' elementar teoriyasi'. Ionli'q, kovalent ha'm molekulali'q kristallar, metallar. Vodorodli'q baylani'sqa iye qatti' deneler. Qatti' denelerdegi baylani'slar tiplerinin' klassifikaciyasi'. Madelung turaqli'si'.	2		2	2
8	Kristallar ushi'n Shredinger ten'lemesi. Bir elektronli'q ja'ne adiabatalig'q jaqi'nlasig'w Qatti' denelerdin' elektrlik qa'siyetleri boyi'nsha uli'wmali'q xarakteristikasi'. Drude ha'm Zommerfeld boyi'nsha elektronli'q gaz modelleri. Fermi beti.	2		2	2
9	Elektr o'tkizgishlik, termo elektr qozg'awshi' ku'shi, elektronli'q gazdin' ji'lli'li'q o'tkizgishligi. Videman – Franc ni'zami'. Elektronli'q gazdin' basi'mi', termoelektronli'q emissiya. Elektronli'q gazdin' magnitlik qabi'llag'i'shlig'i'.	2	4		2

10	Derlik erkin elektronlar modeli. Da'wirli potencial maydandag'i' elektron ushi'n tolqn ten'lemesi. Blox funkciyalari'. Metallardag'i', yari'm o'tkizgishlerdegi zonalardag'i' qa'ddilerdin' sani'.	2	4	2	2
11	Kristalli'q emes qatti' denelerdin' energiya spektri. Zonali'q modeldin' qollani'li'wshi'li'g'i'. Lokalizაციyalı'q hallardi'n' payda boli'wi'.	2	4		2
11	Kristalli'q emes qatti' denelerdin' tiykarg'i' elektrlik qa'siyetleri. Ruqsat etilgen zonalardag'i' hallar sani'.	2		2	2
12	Brillyuen zonasi' tu'sinigi. Brillyuen zonasi'ni'n' kasi'ndagi' juwi'q sheshimler. Zaryad tasi'wshi'lardi'n' effektivlik massasi'. Yari'm o'tkizgishlerdin' energiya zonalari'ni'n' strukturasi'.	2		2	2
13	Kvantli'q hallar. Fermi-Dirak bo'listiriwi. Qosi'mtali'q ha'm menshikli o'tkizgishlik. Fermi beti ha'm oni'n' temperaturag'a baylani'sli'li'g'i'. Elektronlar, tesiksheler ha'm ashi'q orbitalar. Yari'm o'tkizgishlerdegi tiykarg'i' ha'm qosi'msha toq tasi'wshi'lar (donorli'q ha'm akceptorli'q)	2			2
14	Kondensაციyalang'an ortalı'qlardi'n' elekt o'tkizgishligi. Kondensაციyalang'an ortalı'qlardag'i' kinetikali'q qubi'li'slar. Galvanomagnitlik, termoelektrlik ha'm termomagnitik effektlar. Xoll effekti.	2	4	2	2
15	Qatti' denelerdegı tunnellik effekt. Zaryad tasi'wshi'lardi'n' tunnelleniwi. Franc-Keldish effekti. Generaciya-rekombinaciya qubi'li'slari'. Zaryad tasi'wshi'lardi'n' jasaw waqi'ti' haqqi'ndag'i' tu'sinik.	2			2
16	Diffuziyali'q ha'm dreyflik toqlar. Toq ushi'n u'zliksizlik ten'lemesi. Eynshteyn qatnaslari'. Tiykarg'i' emes zaryad tasi'wshi'lardi'n' qozg'ali'si'.	2		2	2
17	Kondensაციyalı'q ortalı'qlardag'i' betlik qubi'li'slar. Bettin' elektronni'n' baylani's energiyasi'na ta'siri.	2			2
18	Shi'g'i'w jumi'si'. Potenciallardı'n' kontaktli'q ayi'rmasi'. Elektronli'q betlik qa'ddiler.	2		2	2
19	Yari'm o'tkizgishlerdin' zonali'q strukturasi'. Arti'qmash elektr zaryadlari' menen baylani'sli' bolg'an qubi'li'slar.	2			2
20	Germaniy menen kermniydegı energiya zonalari'. Yari'm o'tkizgishlerdegi ciklotronli'q rezonans. Elektron-tesiklik o'tiwler.	2	4		2
	Ja'mi 120 saat.	40	20	20	40

Pa'ndi u'yreniwde usi'ni'latug'i'n a'debiyatlar dizimi

1. Зайнобидинов С., Тешабоев А.Т. Яримўтказгичлар физикаси. Т. «Ўқитувчи». 1999.
2. Тешабоев А., Зайнобиддинов С., Эрматов Ш. Қаттиқ жисм физикаси. Т. «Молия». 2001.
3. Назиров Э.Н., Тешабоев А.Т., Назиров Д.Э. Яримўтказгич терминлари. ЎЗМУ. 2003.
4. Nazirov E.N., Nazirov D.E., Teshaboyev A.T. Yarimo'tkazgichlar fizikasi lug'ati. Т. «Universitet». 2008.
5. Ҳабибуллаев П.Қ., Назиров Э.Н., Отажонов Ш.О., Назиров Д.Э. Физика изоҳли луғати. Т. «Ўзбекистон миллий энциклопедияси». 2002.
6. Юнусов М.С., Власов С.И., Назиров Д.Э., Толипов Д.О. Электрон асбоблар. Т. ЎЗМУ. 2003.
7. Маматкаримов О.О., Власов С.И., Назиров Д.Э. «Яримўтказгич материаллар ва асбоблар физикаси практикуми». Т. ЎЗМУ. 2007.
8. Тешабоев А., Зайнобиддинов С., Мусаев Э.А. Яримўтказгичлар ва яримўтказгичли асбоблар технологияси. Т. «Ўзбекистон». 2005.
9. Шалимова К.В. Физика полупроводников. М. Энергия. 1985.
10. Фистуль В.И. Введение в физику полупроводников. М. Высшая школа. 1984.
11. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников В.Л. Физика полупроводников. М. Наука. 1990.
12. http://electro-t.info/ref/pr6jkovo1_provodimosti.html
13. <http://irc.spbu.ru/Library/Method/index.html>
14. <http://www.college.ru/physics/index.php>
15. <http://window.edu.ru>.
16. <http://www.ziyonet.uz>.
17. <http://window.edu.ru>.
18. <http://www.ziyonet.uz>.
19. http://physic.kemsu.ru/pub/library/learn_pos/prof_pos/PosobieFKS/Plan.html

"Kondensaciyalang'an ortali'qlar fizikasi" boyi'nsha laboratoriyali'q jumi'slar ha'm bul jumi'slardi' ori'nlaw ushi'n mo'lsheirlengen waqi't

№	Laboratoriyali'q jumi'slardi'n' mazmuni'	Saat sani'
1	Elektr o'tkizgishlik koefficientlerin ani'qlaw, termoelektr qozg'awshi' ku'shi, elektronli'q gazdin' ji'lli'li'q o'tkizgishligi. Termoelektronli'q emissiya qubi'li'si'.	4
2	Derlik erkin elektronlar modeli. Da'wirli potencial maydandag'i' elektron ushi'n tolqn ten'lemesi. Blox funkciyalari'. Metallardag'i', yari'm o'tkizgishlerdegi zonalardag'i' qa'ddilerdin' sani' (kompyuterlik laboratoriyali'q praktikum).	4
3	Kristalli'q emes qatti' denelerdin' energiya spektri. Zonali'q modeldin' qollani'li'wshi'li'g'i'. Lokalizatsiyali'q hallardi'n' payda boli'wi' (kompyuterlik laboratoriyali'q praktikum).	4
4	Qatti' denelerdegil Galvanomagnitlik, termoelektrlik ha'm termomagnitlik effektlar. Xoll effekti.	4

5	Germaniy menen kermniydegi energiya zonalari'n eksperimentte ani'qlaw. Elektronlar menen tesiklerdin' koncentraciyalari'n ha'm olardi'n' ji'lji'g'i'shli'q koefficientlerin ani'qlaw.	4
	Ja'mi	20 saat.

"Kondensaciyalang'an ortalı'qlar fizikasi'" boyi'nsha o'z betinshe jumi'slardı'n' temalari' ha'm jumi'slardı' ori'nlaw ushi'n mo'lsherlengen waqi't

№	O'z betinshe ori'nlanatug'i'n jumi'slardı'n' temalari'	Waqi't
1	“Kondensaciyalang'an ortalı'qlar fizikasi'” pa'ni. Pa'ndi u'yreniw processı aldi'nda turg'an wazi'ypalar. Kondensaciyalang'an ortalı'qlardı'n' ha'zirgi zaman teoriyalari'ni'n' tiykarlari'. Kondensaciyalang'an xal tu'sinigi. Kristall ha'm kristalli'q pa'njereler. Kristallardag'i' atomlar menen molekular arası'ndag'i' ximiyali'q baylani'slardı'n' tu'rleri.	4
2	Kristalli'q pa'njerenin' ta'riyipleniwi. Kristallar ha'm kristalli'q pa'njere. Kristallardı'n' simmetriyasi'. Noqatli'q ha'm translyaciyali'q simmetriya elementleri. Simmetriyalı'q operaciyalar. Simmetriya gruppaları'. Kristalli'q pa'njerenin' tu'rleri.	6
3	Yari'm o'tkizgish kristallardag'i' strukturalı'q defektler. Noqatli'q defektler. Bir o'lshemli defektler (dislokaciylar). Eki o'lshemli (jaylasti'ri'w defektleri) ha'm u'sh o'lshemli defektler. Atomlardı'n' ximiyali'q aktivliginin' energiyali'q xarakteristikaları' (ionizaciya potencialı', ximiyali'q uqsasli'q energiyasi', elektrlik jaqtan terislilik) ha'm olardi' bahalaw usi'llari'. Atomlar arası'ndag'i' ku'shlerdin' uli'wmali'q xarakteristikasi'. Ionli'q, kovalent ha'm molekularli'q kristallar, metallar. Yari'm o'tkizgish kristallardag'i' ximiyali'q baylani'slar. Qatti' denelerdegi baylani'slar tiplerinin' klassifikaciya'sı'.	4
4	Kristallardag'i' defektler. Defektler klassifikaciya'sı'. Nol o'lshemli (noqatli'q), bir o'lshemli (si'zi'qi', dislokaciylar), eki o'lshemli (jaylasti'ri'w defektleri) ja'ne u'sh o'lshemli defektler.	4
5	Amorf yari'm o'tkizgishler.	4
6	Yari'm o'tkizgishlerdegi zaryad tasi'wshi'lardı'n' shashi'raw mexanizmleri. Bolcmanni'n' kinetikali'q ten'lemesi. Ten' salmaqli'q hal. Relaksaciya waqi'ti'. shashi'rawdı'n' effektivlik kesimi. Shashi'raw orayları'ni'n' tipleri.	6
7	Yari'm o'tkizgishlerdin' betlik qatlami'nda ju'zege keletug'i'n fizikali'q processler. Betlik qa'ddilerdin' ta'biyati'. Ken'isliklik zaryadti'n' katlami'ni'n' teoriyasi'. Maydan effekti. Betlik rekombinaciya.	4
8	Qosi'mtali' yari'm o'tkizgishler ha'm olardi'n' zonali'q strukturası'. Qosi'mtali' yari'm o'tkizgishlerdegi elektr o'tkizgishliktin' mexanizmmi haqqi'ndag'i' modellik ko'z-qaras. Azg'ang'an ha'm azg'i'nbag'an yari'm o'tkizgishler.	4
9	Ha'zirgi zaman mikro- ha'm nanoelektronikasi'ndag'i' yari'm o'tkizgishlerdin' tutqan orni'.	4
	Ja'mi	40

"Kondensatsiyalangan ortaliqlar fizikasi" bo'yida seminar sabaqlari

No	Temalar atamallari	Waqit
1	Kristallardagi ximiyaliq baylani'slardin' tu'rleri. Atomlardin' ximiyaliq aktivliginin' energiyaliq xarakteristikallari (ionizatsiya potentsiali, ximiyaliq uqsasliq energiyasi, elektrlik jaqtan terislilik) ha'm olardi' bahalaw usi'llari. Atomlar arasi'ndagi' ku'shlerdin' uli'wmaliq xarakteristikasi. Ionliq, kovalent ha'm molekullaliq kristallar, yari'm o'tkizgishler, metallar. Qatti' denelerdegil baylani'slar tiplerinin' klassifikatsiyasi.	2
2	Kristalli'q pa'njerelerdi ta'riyilew. Kristallar simmetriyasi. Noqatli'q ha'm translyatsiyali'q simmetriya elementleri. Simmetriyalil'q operatsiyalar. Simmetriya gruppallari. Kristalli'q pa'njerenin' tu'rleri.	2
3	Kristallardagi' (yari'm o'tkizgish kristallardagi') strukturalil'q defektler. Noqatli'q defektler. Bir o'lshemli defektler (dislokatsiyalar). Eki o'lshemli (jaylasti'ri'w defektleri) ha'm u'sh o'lshemli defektler. Defektlerdi eksperimentallil'q uyreniw usi'llari. Rentgenografiya (topografiya) ha'm elektronli'q mikroskopiya.	2
4	Amorfli'q yari'm o'tkizgishler. Olardi'n' strukturali'ni'n' ha'm fizikalil'q qasbiyetlerinin' o'zgeshelikleri, a'melde qollani'li'wi.	2
5	Yari'm o'tkizgishlerdegil zaryad tasi'wshil'ardi'n' shashi'raw mexanizmleri.	2
6	Yari'm o'tkizgishlerdin' betinde ju'zege keletug'i'n fizikalil'q processler.	2
7	Menshikli ha'm qosi'mtali' yari'm o'tkizgishler ha'm olardi'n' zonali'q strukturalari.	
8	Yari'm o'tkizgishlerdi legirlew usi'llari. Kompensatsiyalangan yari'm o'tkizgishler ha'm olardan islengen yari'm o'tkizgishli a'sbaplar.	2
9	Yari'm o'tkizgishlerdi qayta islew usi'llari. Zonali'q balqi'ti'w.	2
10	Yari'm o'tkizgishlerdi o'siriwdin' usi'llari. Brijdmen-Stokbarger usi'li' ha'm oni'n' o'zgeshelikleri.	2
	Ja'mi	20

Studentlerdin' bilimin qadag'alaw ballari

Sabaqlar tu'rleri	Saat ko'lemi (lek+a'mel +lab)	O'z betinshe	Ag'i'mda- g'i' bahalaw	Shegara- li'q bahalaw	Juwmaq- lawshi' bahalaw	Uli'wma ball
Lekciya	20	6	6	7	15	45
A'meliy	12	6	7	8	5	
Seminar	12	6	7	7	5	
Laboratoriya	12	6	7	8	5	

Reyting qadag'alaw tu'rlerinde aji'rati'lg'an qadag'alaw tu'rleri ballari'n aniqlaw usi'llari

Qadag'alaw tu'ri	Qadag'alaw usi'li'	Sani'	Waqti'	Maksimal ball
------------------	--------------------	-------	--------	------------------

Ag'i'mdag'i' qadag'alaw	Auditoriyada ha'm o'z betinshe ma'seleler sheshiw	3	Keste tiykari'nda	13-14
Ja'mi				40
Shegarali'q qadag'alaw	Kontrol jumi'si'	2	Keste tiykari'nda	15
	Test sorawlari'			
Ja'mi				30
Juwmaqlawshi' qadag'alaw	Juwmaqlawshi' jazba jumi'si'	1	Keste tiykari'nda	30
Ja'mi		7		100

"Kondensaciyalang'an ortalig'lar fizikasi'" pa'ni boyi'nsha kursli'q jumi'slardi' ori'nlaw ushi'n METODIKALI'Q KO'RSETPELER

Metodikali'q ko'rsetpeler 1-kursta "5A140204 – kondensaciyalang'an ortalig'lar fizikasi' ha'm materialtani'w" qanigeligi boyi'nsha oqi'ytug'i'n magistrantlar kondensaciyalang'an ortalig'lar fizikasi' boyi'nsha kursli'q jumi'slardi'n' mazmuni', jumi'slardi' ra'simiylestiriw ha'm jaqlaw boyi'nsha qoyi'latug'i'n talaplardi' o'z ishine aladi'.

Kursli'q jumi'sti'n' maqseti

Kursli'q jumi's magistrantti'n' o'z betinshe ori'nlaytug'i'n jumi'si' boli'p, bul jumi's individuallig' tapsi'rma boyi'nsha ori'nlanadi'. Jumi's arnawli' ilimiy a'debiyat penen tani'si'wdi', esaplawlar ju'rgiziwdi, belgili bir tapsi'rmalardi' ori'nlawdi' na'zerde tutadi' ha'm "Kondensaciyali'q ortalig'lar fizikasi'" pa'ni boyi'nsha ali'ng'an bilimlerde paydalani'w qabiletligin ko'rsetiw maqsetinde islenedi. Magistraturada oqi'wshi' ali'ng'an na'tijelerdi ani'q ha'm ki'sqa tu'rde bayanlay ali'wi' kerek.

Kursli'q jumi's boyi'nsha tapsi'rma

Kursli'q jumi'sti' ori'nlaw ushi'n tapsi'rma individuallig' ta'rtipte beriledi.

Kursli'q jumi's ushi'n beriletug'i'n baslang'i'sh mag'li'wmatlar o'z ishine esaplaw jumi'slari'n ori'nlaw ushi'n a'hmiyetli sanli' mag'li'wmatlardan turadi'. Bul mag'li'wmatlar qatari'na tiykarlaw kerek bolatug'i'n jumi'sti' ori'nlaw bari'si'nda ali'ng'an mag'li'wmatlar kirmeydi.

Jumi'sti' ori'nlaw bari'si'nda islenip shig'li'wi' kerek bolg'an ma'seleler jumi'sti'n' baslang'i'sh mag'li'wmatlardi' tallawdan na'tiyje ali'naman degenishe islengen jumi'slardi' o'z ishine qamti'ydi'

Kursli'q jumi'sti' ori'nlaw ushi'n du'zilgen kalendarli'q joba usi' jumi'sti' ori'nlaw ushi'n arnalg'an da'wirdin' barli'q tiykarg'i' bo'limlerin o'z ishine aladi'. Jumi's grafiginde ha'r bir etapli' ori'nlawdi'n' ayqi'n mu'ddetleri ko'rsetilgen boladi'. Grafikti du'zgende kursli'q jumi'sti' shama menen 10 ha'ptenin' ishinde ori'nlawdi' na'zerde tuti'w kerek. Soni'n' menen birge usi' mu'ddetke ko'zde tuti'lmag'an ma'selelerdin' sheshiliwi ushi'n ja'ne 1-2 ha'pte mu'ddettin' qosi'li'wi' mu'mkin.

Kursli'q jumi'sti' ori'nlaw

Kursli'q jumi's basshi' menen ti'g'i'z baylani'sti' ori'nlanadi'. Biraq jumi'sti' ori'nlawdi'n' bari'si'nda sheshimlerde qabi'l etiwege, barli'q mag'li'wmatlardi'n' duri'sli'g'i'na magistrant – berilgen jumi'sti'n' avtor' juwap beredi.

Kursli'q jumi'sti' ori'nlaw aldi'nda usi' metodikali'q ko'rsetpeler menen tani'si'w za'ru'r. Grafikte ko'rsetilgen mu'ddetlerde magistrant jumi'sti'n' bari'si' haqqi'nda basshi'g'a esap berip turadi'.

Kursli'q jumi'sti' ori'nlawg'a kiriskende magistrant a'debiy mag'li'wmatlardi' teren' u'yrenedi ha'm tallaydi', qoyi'lg'an ma'seleni sheshiwidin' mu'mkin bolg'an variantlari'n izleydi, olardi'n' birewin saylap aladi' ha'm tiykarlaydi'. Bul jumi's ushi'n waqi't byudjetinin' shama menen 20 procenti jumsaladi'. Bunnan keyin tapsi'rmag'a muwapi'q za'ru'rli bolg'an esaplawlar ori'nlanadi'. Bul jumi's ushi'n waqi't byudjetinin' 65-70 % mug'dari' jumsaladi'. Qalg'an shama menen 10-15 % waqi't byudjeti grafikali'q materialdi', esaplaw-tu'sinik tekstin' jaziwg'a qaldi'ri'ladi'.

Tapsi'rmada belgilengen mu'ddetlerde magistrant basshi'ni'n' aldi'nda esap beredi.

Kursli'q jumi'sti' jaqlaw

Kursli'q jumi'sti' jaqlaw sessiya baslanaman degenshe basshi' ta'repinen belgilengen mu'ddetlerde a'melge asi'ri'ladi'. Kursli'q jumi'sti' jaqlaw bayanat tu'rinde o'tkeriledi. Bayanat qi'sqa ha'm ani'q boli'wi' kerek. Bayanati'nda magistrant:

- jumi'sti'n' temasi'n ayti'wi';
- ayqi'n ma'selenin' qoyi'li'wi'n ani'q tu'rde ko'rsete ali'wi';
- jumi'sti' ori'nlaw bari'si'nda ayqi'n tu'rde nelerdin' islengenligin ayti'p beriwi;
- juwmaqlardi' qi'sqa ha'm ayqi'n keltirip shi'g'ari'wi' kerek.

Esaplaw-tu'sindiriw xati'

Kursli'q jumi'sti'n' esaplaw-tu'sindiriw xati' o'z ishine to'mendegiderdi ali'wi' sha'rt:

- titul qag'azi',
- kursli'q jumi'sqa berilgen tapsi'rma, tiykarg'i' bo'lim ha'm juwmaqlar,
- paydalani'lg'an jumi'slardi'n' dizimi,
- qosi'mshalar.

Kursli'q jumi'sti'n' tiykarg'i' bo'liminde sa'wlelenetug'i'n ayqi'n ma'selelerdin' dizimi basshi' ta'repinen ani'qlanadi'. Tiykarg'i' bo'limnin' materiallari' jetkilikli da'rejede ani'q bayanlang'an boli'wi' kerek. bul na'tiyjelerdin' duri'sli'g'i'n tekserip ko'riw ushi'n za'ru'rli.

Jumi's boyi'nsha juwmaqlar ori'nlang'an jumi'sti'n' na'tiyjelerinen, olarg'a berilgen bahalardan ha'm olardi'n' ha'reketkegi talaplarg'a juwap beriw da'rejesin ko'rsetiwden turadi'.

Qosi'mshalar tu'rinde ja'rdemshi materiallardi'n' beriliwi mu'mkin. Avtordi'n' pikiri boyi'nsha bul materiallar ma'seleni sheshiwidin' usi'llari'n jaqsi'raq tu'siniw ushi'n kerek boladi'. Biraq qosi'msha materiallar tiykarg'i' teksttegi materiallardi' qaytalamawi' yamasa biykarlamawi' kerek. Bunday qosi'mshalar qatari'na kursli'q jumi'sta paydalani'lg'an ten'lemelerdin', bul ten'lemelerdi sanli' yamasa analitikali'q sheshiwidin' programmalari' ha'm tag'i' basqalar kiriwi mu'mkin

Esaplaw-tu'sindiriw xati'ni'n' qosi'mshalar menen birliktegi uli'wmali'q ko'lemi 10-15 bet.

Esaplaw-tu'sindiriw xati' A4 (210×297 mm) formati'ndag'i' standart aq qag'azdi'n' bir ta'repinde ra'simiylestiriledi. Tekst printerde 1 yamasa 1,5 intervaldan jaziwiladi'. Tekstin'

formati' a'dettegidey (joqari' ha'm to'mendegi qaldi'ri'lg'an maydanlar 2 sm den, shep ta'repte 3 sm, al on' ta'repte 1,5 sm). "Times New Roman" yamasa "Cambria" shrifti' (12 pt) usi'ni'ladi'. Soni'n' menen birge basshi'ni'n' sheshimi menen kursli'q jumi'sti' qoldan jazi'w da mu'mkin. Bunday jag'dayda jazi'wlar menen grafikali'q jumi'slar qag'azg'a ani'q tu'rde tu'siriliwi sha'rt.

Kursli'q jumi'sta so'zlerdi qi'sqarti'p jazi'w ruqsat etilmeydi.

Fizikali'q shamalar a'dette shamalardi'n' xali'q arali'q sistemasi'na sa'ykes keliwi kerek (SI).

Formulalar ani'q tu'rde qol menen yamasa MathType si'yaqli' kompyuterlik programmalaridi'n' ja'rdeminde jazi'ladi'. Grafiklerdi soqqanda grafiklerdi sog'i'w ushi'n qoyi'latug'i'n sa'ykes talaplardi'n' toli'q ori'nlani'wi' na'zerde tuti'ladi'.

Toli'q jazi'p boli'ng'an kursli'q jumi's tu'plenedi.

A'debiy dereklerden ali'ng'an formulalar menen ten'lemelerdin' deregi ilimiy maqalalar jazg'anda qoyi'latug'i'n talaplarga toli'q sa'ykes keledi. Ma'selen a'debiy derekke ssi'lka kvadrat qawsi'rmag'a ali'ni'p jazi'ladi'. Mi'sali: "[4]", "[5-9]" yamasa "[1, 4, 18]".

Formulag'a beriletug'i'n ssi'lklar a'dettegi qawsi'rmag'a ali'nadi'. Mi'sali' "(3.1)-formulada, (2)-an'latpada" ha'm basqalar.

Kursli'q jumi'sti' tekseriw, jaqlaw ha'm bahalaw kriteriyalari'

Kurs jumi'si' na kafedrag'a belgilengen mu'ddette tapsi'ri'ladi' ha'm qabi'llag'an mu'g'a'llimnin' recenziyasi' menen jaqlawg'a jiberiledi.

Jaqlaw kurs jumi'si'n ori'nlawdi'n juwmaqlawshi' etapi' boli'p esaplanadi'. Oni'n' maqseti – izertlengen problema boyi'nsha studenttin' biliminin' teren'ligin ha'm jumi'sti'n' ori'nlani'wi'ni'n' o'z betinsheligin ani'qlaw. Student jumi'sti' jaqsi' tu'singen, keltirilgen mag'li'wmatlardi'n' dereklerin ashi'p biliwi, berilgen problemag'a tiyisli teoriyalig' xarakterdegi yamasa praktikali'q xarakterdegi sorawlarg'a juwap bere ali'wi' lazi'm.

Kurs jumi'si' tekserilgennen keyin da'slepki bahasi' jumi's bari'si'nda (ol jaqlawdan keyin o'zgeriwide mu'mkin) menen **jaqlawg'a jiberiliwge usi'ni's** etiledi.

Eger kurs jumi'si'n jaqlap ati'rg'an student jaqsi', teren' bilimi bar ekenligin ko'rsete alsa – baha joqari'lati'ladi', o'ytkeni tek g'ana jaqlaw emes al jumi'sti'n' mazmuni'da bahalanadi'. Jaqlaw waqti'nda studenttin' materialdi' bilmewi bahani' qanaatlandi'rarsi'zli'qqa shekem to'menletiwge tiykar boladi', o'ytkeni kurs jumi'si' student ta'repinen o'zbetinshe ori'nlanbag'anli'gi' ko'rinip qaladi'.

Studenttin' bilimin sapa komissiyasi' bahalaydi'. Kurs jumi'si' tekserilgennen keyin recenziyani'n' bir ekzemplari' menen menen studentke qaytari'p beriledi. Studentke jaqlawg'a tayarlanig'w'a, tiykarg'i' material duri's dep esaplanig'p berilgen eskertiwlerdin' barli'gi'n esapqa ali'w usi'ni's etiledi. Ayri'qsha ori'nlang'an kurs jumi'slari' ilimiy basshi'si'ni'n' rekomendaciyasi' ha'm komissiyani'n' sheshimi menen jaqlawsiz bahalanig'wi' mu'mkin. Kurs jumi'slari'n jaqlaw ushi'n grafik tasti'yi'qlanadi', komisiyani'n' ha'rbir ma'jilisinde 10 nan arti'q jumi'sti' qaraw maqsetke muwapi'q emes. Jaqlawg'a tayarlang'anda student 10 minuttan artpag'an awi'zsha bayan tayarlaydi'.

Jaqlaw waqti'nda shi'g'i'p so'ylew ani'q ha'm qi'sqa, kurs jumi'si'ni'n' tiykarg'i' bag'darlari'n o'z ishine alatug'i'n boli'p, juwmaqlar ayti'ladi'. Jaqlaw waqti'nda komissiya temani' studenttin' tu'siniwi ha'm o'zlestiriwin, a'debiyatlardag'i' mag'li'wmatlar menen tani's ekenligin tekserip jaqlang'an jumi'sti' aqi'rg'i' ma'rte bahalaydi'.

Kurs jumi'si' oni'n' mazmuni'n ha'm jaqlani'wi'n esapqa ali'p 100 ballig' sistemada bahalanadi':

86-100 ball – jumi's ken' shen'berdegi informaciya derekleri tiykari'nda ha'rta'repleme ha'm teren' islengen, paydalani'lg'an materialarg'a kritikali'q qatnas ha'm pikirlerdin'

o'zbetinsheligi bolsa, esaplawlar ha'm juwmaqlar duri's bolsa, bayanlaw stilinde aytarli'qtay kemshilikler bolmasa qoyi'ladi'.

71-85 ball. Jumi's mazmuni', ra'smiylestiriliwi ha'm bayanlaw stili boyi'nsha barli'q talaplarga juwap beredi, jetkilikli joqari' teoriyali'q qa'ddide ori'nlang'an, temani'n' ma'selelerin toli'q ha'm ha'rta'repleme ko'rsetken, birqatar faktlerdi keltirgen, o'zbetinsheliktin' ayi'ri'm elementleri ko'rinip turg'an boli'p jaqlaw waqti'nda studenttin' temani' tu'siniwi ha'm o'zlestiriwi , a'debiyatlar menen qanaatlandi'rarli' tani's ekenligi tasti'yi'qlansa.

55-70 ball. Student haq kewilden tiykarg'i' derekler menen tani'si'p ha'm olardi' islep shi'qqan, temani' uli'wma duri's bayanlag'an, jumi'sta ayi'ri'm kemshilikler bolg'an jumi'sqa qoyi'ladi'.

0-54 ball. Kurs jumi'slari'n ori'nlaw boyi'nsha berilgen metodikali'q ko'rsetpede keltirilgen talaplarga juwap bermeytug'i'n, studentti temani' tu'sinbegenligin ko'rsetetug'i'n qopal qa'teler bar bolg'an jui'sqa qoyi'ladi' ha'm jaqlawg'a jiberilmeydi, qayta islew talap etiledi. Eger student jaqlaw processinde berilgen sorawlarg'a ken' tu'rde juwap beriwge uqi'pli' emes bolsa jumi'sqa 0-54 ball qoyi'li'p ol jumi's kafedrada qaladi'. Student jan'a tema boyi'nsha basqa jumi'sti' jazadi' yamasa si'pati'nda qayta jaqlawg'a jiberiledi. Mu'ddetinde tapsi'ri'lmag'an kurs jumi'si' si'naqqa kelmegen dep esaplanadi'. Student kurs jumi'si'n ori'nlamag'an yamasa 0-54 ball menen bahalang'an bolsa ol basqa pa'nlerden juwmaqlawshi' qadag'alawlardi' tapsi'ri'wg'a jiberilmeydi.

En' jaqsi' kurs jumi'slari' studentlik jumi'slar toplami'nda basi'li'wi'na yamasa studentlik jumi'slar konkursi'na kafedra ta'repinen usi'ni'ladi'.

A'debiyatlar dizimi

Tiykarg'i'

A'debiyatlar dizimi

Tiykarg'i'

1. Зайнобидинов С., Тешабоев А.Т. Яримўтказгичлар физикаси. Т. «Ўқитувчи». 1999.
2. Тешабоев А., Зайнобиддинов С., Эрматов Ш. Қаттиқ жисм физикаси. Т. «Молия». 2001.
3. Назиров Э.Н., Тешабоев А.Т., Назиров Д.Э. Яримўтказгич терминлари. ЎЗМУ. 2003.
4. Nazirov E.N., Nazirov D.E., Teshaboyev A.T. Yarimo'tkazgichlar fizikasi lug'ati. Т. «Universitet». 2008.
5. Ҳабибуллаев П.Қ., Назиров Э.Н., Отажонов Ш.О., Назиров Д.Э. Физика изоҳли луғати. Т. «Ўзбекистон миллий энциклопедияси». 2002.
6. Юнусов М.С., Власов С.И., Назиров Д.Э., Толипов Д.О. Электрон асбоблар. Т. ЎЗМУ. 2003.
7. Маматкаримов О.О., Власов С.И., Назиров Д.Э. «Яримўтказгич материаллар ва асбоблар физикаси практикуми». Т. ЎЗМУ. 2007.
8. Тешабоев А., Зайнобиддинов С., Мусаев Э.А. Яримўтказгичлар ва яримўтказгичли асбоблар технологияси. Т. «Ўзбекистон». 2005.
9. Ч.Киттель. Введение в физику твердого тела. Издательство "Наука". Москва. 1978. 792 с.
10. Ч.Киттель. Квантовая теория твердых тел. Издательство "Наука". Москва. 1967. 492 с.

11. Н.Ашкрофт, Н. Мермин. Физика твердого тела. Том 1. Издательство "Мир". Москва. 1975. 399 с.
12. Н.Ашкрофт, Н. Мермин. Физика твердого тела. Том 2. Издательство "Мир". Москва. 1979. 422 с.
13. П.В.Павлов, А.Ф.Хохлов. Физика твердого тела. Издательство «Высшая школа». Москва. 2000. 494 с.

Qosi'msha a'debiyat

1. Г. Н. Елманов, А. Г. Залужный, В. И. Скрытный, Е. А. Смирнов, В. Н. Яльцев. Физическое материаловедение. Учебник для вузов. В 6 томах. Том. 1. Физика твердого тела. Москва. МИФИ, 2007. 636 с.
2. В. В. Нечаев, Е. А. Смирнов, С. А. Кохтев, Б. А. Калинин, А. А. Полянский, В. И. Стаценко. Физическое материаловедение. Том 2. Основы материаловедения. Учебник для вузов в 6 т. Москва. МИФИ. 2007. 608 с.
3. Физическое материаловедение. Учебник для вузов. В 6 томах. В. В. Нечаев, Е. А. Смирнов, С. А. Кохтев, Б. А. Калинин, А. А. Полянский, В. И. Стаценко. Том. 2. Основы материаловедения. Москва. МИФИ. 2007. 608 с.
4. Б.Н.Арзамасов, И.И.Сидорин, Г.Ф.Косолапов, В.И.Макарова, Г.Г.Мухин, Н.М.Рыжов, В.И.Стилаева, Н.В.Ульянова. Материаловедение. Учебник для высших технических учебных заведений. Москва. "Машиностроение". 1986. 384 с.
5. С.С.Горелик, М.Я.Дашевский. Материаловедение полупроводников и диэлектриков. Учебник для вузов. Москва. МИСИ. 2003. 480 с.
6. В.М.Авдюхина, Д.Батсурь, В.В.Зубенко. Рентгенография. Спецпрактикум. Издательство Московского университета. Москва. 1986. 240 с.
7. Ю.П.Солнцев, Е.И.Пряхин. Материаловедение. Санкт-Петербург. Химиздат. 2007. 784 с.
8. Г.А.Барышев. Материаловедение. Издательство Тамбовского государственного университета. Тамбов. 2007. 140 с.
9. Ю.М.Лахтин, В.П.Леонтьева. Издательство "Машиностроение". Москва. Материаловедение. 1990. 528 с. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение: Учебник для машиностроительных вузов - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1980. - 493 с., ил.
10. М.А.Худяков. Материаловедение. Издательство "Монография". Уфа. 2006. 238 с.
11. Н.Е. Гарбузова, Л.А. Меташоп, Н.Л. Тискович. Материаловедение: Методические указания и контрольные задания для студентов-заочников машиностроительных специальностей вузов. 8-е изд. - М.: Высш. Школа, 1988. - 79 с.
12. Физическое материаловедение. Пер с англ. Под редакцией Р.М.Кана. Вып. 1. Издательство "Мир". Москва. 1967. 333 с.
13. Физическое материаловедение. Пер с англ. Под редакцией Р.М.Кана. Вып. 2. Издательство "Мир". Москва. 1968. 490 с.
14. Физическое материаловедение. Пер с англ. Под редакцией Р.М.Кана. Вып. 3. Издательство "Мир". Москва. 1968. 484 с.
15. Г.В.Курдюмов. Явления закалки и отпуска стали. Государственное научно-техническое издательство литературы по цветной и черной металлургии. Москва. 1960. 64 с.
16. Лифшиц Е. М., Питаевский Л.П. Статистическая физика М.: «Наука», 1978.
17. Давыдов А. С. Квантовая теория твердого тела. М.: «Наука», 1975.
18. Р.Смит. Полупроводники. Издательство "Мир". Москва. 1982, 560 с.

19. Дж.Займан. Принципы теории твердого тела. Издательство «Мир». Москва. 1974. 335 с.
20. А.А.Кацнельсон. «Введение в физику твердого тела», Издательство МГУ. Москва. 1986.
21. М.П.Шаскольская. Кристаллография . Издательство "Высшая школа". Москва. 1984 . 376 с.
22. О.Маделунг. Физика твердого тела. Локализованные состояния. Издательство "Наука". Москва. 1985. 184 с.
23. О.Маделунг. Теория твердого тела. Издательство "Наука". Москва. 1980. 416 с.
24. Б.Е.Винтайкин. Физика твердого тела. Издательство «МГТУ им. Н.Э.Баумана», 2008.
25. Г.И.Епифанов. Физика твердого тела. Издательство "Высшая школа". Москва. 1977. 288 с.
26. http://electro-t.info/ref/pr6jkovo1_provodimosti.html
27. <http://irc.spbu.ru/Library/Method/index.html>
28. <http://www.college.ru/physics/index.php>
29. <http://window.edu.ru>.
30. <http://www.ziyonet.uz>.
31. http://physic.kemsu.ru/pub/library/learn_pos/prof_pos/PosobieFKS/Plan.html

2013-2014 oqi'w ji'li'nda magistrantlarg'a usi'ni'latug'i'n temalar dizimi

1. Kristallardi'n' simmetriyasi'. Noqatli'q ha'm translyatsiyali'q simmetriya elementleri. Simmetriyalik operatsiyalar ha'm olardi' matematikali'q matricallardi'n' ja'rdemide sa'wlenendiriw.
2. Simmetriyani'n' noqatli'q ha'm ken'isliklik gruppalari'.
3. Kristallardag'i' defektler. Noqatli'q defektler. Noqatli'q defektlerdin' koncentraciyasi'ni'n' temperaturadan g'a'rezligi.
4. Bir o'lsheмли defektler (dislokatsiyalar). Dislokatsiyalarga ta'sir etetug'i'n ku'shler menen dislokatsiyalardi'n' energiyasi'ni'n' mug'dari' esaplaw.
5. Eki o'lsheмли (jaylasti'ri'w defektleri) ha'm u'sh o'lsheмли defektler. Strukturalik defektlerdin' energiyalari'n esaplaw.
6. Defektlerdi eksperimentallik (difraktsiyalik) u'yreniw usi'llari'. Rentgenografiya (topografiya) ha'm elektronlik mikroskopiya. Difraktsiyalik kontrast ha'm oni' esaplaw.
7. Kondensatsiyalang'an ortaliklardag'i' atomlar arasi'ndag'i' ta'sirlesiwler ha'm baylani'slardi'n' tiykarg'i' tipleri.
8. Kristallik denelerdegi politipizm ha'm fazalik o'tiwler.
9. Ekinshi a'wlad fazalik o'tiwlerindegi kristallik pa'njerenin' simmetriyasi'ni'n' o'zgeris ni'zamlari'.
10. Atomlardi'n' ximiyalik aktivliginin' energiyalik xarakteristikalari' (ionizatsiya potentsiali', ximiyalik uqsaslik energiyasi', elektrlik jaqtan terisilik) ha'm olardi' bahalaw usi'llari'.
11. Atomlar arasi'ndag'i' ku'shlerdin' uli'wmalik xarakteristikasi'. Atomlar menen molekullardag'i' ximiyalik baylani'slardi'n' elementar teoriiyasi'. Ionlik, kovalent ha'm molekullik kristallar, metallar.
12. Vodorodlik baylani'sqa iye qatti' deneler. Segnetoelektrikler.
13. Kristallik pa'njerenin' dinamikalik xarakteristikalari' ha'm ji'llilik qa'siyetleri. Atomlardi'n' si'ziqli' shi'nji'ri'ndag'i' terbelisler.

14. Baziske iye pa'njeredegi terbelisler. Fononlar. Modalar sani' ha'm fononlardi'n' hallari'ni'n' ti'g'i'zli'g'i'. Ali'ng'an na'tiyjelerdi baziske iye u'sh o'lshe'mli kristallar ushi'n uli'wmalasti'ri'w.
15. Kristallardag'i' fononlardi'n' dispersiya ni'zami'n eksperimentte ani'qlaw usi'llari'.
16. Kristallardi'n' ji'lli'li'q qa'siyetleri. Dyulong ha'm Pti ni'zami'. Eynshteyn ha'm Debay boyi'nsha ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i' modelleri. Debay temperaturasi'.
17. Pa'njerenin' terbelislerindegi nurlardi'n' shashi'rawi'. Fononlardi'n' bir biri menen ta'sirlesiw.
18. Kristallardi'n' ji'lli'li'q ken'eyiwi. Pa'njerelik ji'lli'li'q o'tkizgishlik. Fononlardi'n' erkin ju'riw joli'ni'n' uzi'nli'g'i'.
19. Qatti' denelerdin' elektrlik qa'siyetleri. Qatti' denelerdin' elektrlik qa'siyetleri boyi'nsha uli'wmali'q xarakteristikasi'.
20. Drude ha'm Zommerfeld boyi'nsha elektronli'q gaz modelleri. Fermi beti.
21. Elektr o'tkizgishlik, termo elektr qozg'awshi' ku'shi, elektronli'q gazdin' ji'lli'li'q o'tkizgishligi. Videman – Franc ni'zami'.
22. Elektronli'q gazdin' basi'mi', termoelektronli'q emissiya. Elektronli'q gazdin' magnitlik qabi'llag'i'shli'g'i'.
23. Dielektrik kristallardi'n' elektrlik qa'siyetleri. Dielektriklerdin' klassifikaciyasi' (piroelektrikler, pezoelektrikler, ferroelektrikler ha'm antiferroelektrikler) ha'm olardi'n' tiykarg'i' elektrlik qa'siyetleri.
24. Kristalli'q emes qatti' denelerdin' energiya spektri. Zonali'q modeldin' qollani'li'wshi'li'g'i'. Lokalizaciyali'q hallardi'n' payda boli'wi'.
25. Kristalli'q emes qatti' denelerdin' tiykarg'i' elektrlik qa'siyetleri.
26. Kristallar ushi'n Shredinger ten'lemesi, oni'n' sheshimlerinin' fizikali'q ma'nisi. Da'wirli potencial. Bir elektronli' ha'm adiabatli'q jaqi'nlas'i'w.
27. Brillyuen zonasi' tu'sinigi. Zaryad tasi'wshi'lardi'n' effektivlik massasi'. Yari'm o'tkizgishlerdin' energiya zonalari'ni'n' strukturasi'.
28. Kvantli'q hallar. Fermi-Dirak bo'listiriwi. Qosi'mtali'q ha'm menshikli o'tkizgishlik. Fermi qa'ddi ha'm oni'n' temperaturag'a baylani'sli'li'g'i'.
29. Kondensaciyalang'an ortalıqlardi'n' elekt o'tkizgishligi. Kondensaciyalang'an ortalıqlardag'i' kinetikali'q qubi'li'slar. Galvanomagnitlik, termoelektrik ha'm termomagnitik effekter. Xoll effekti.
31. Zaryad tasi'wshi'lardi'n' tunnelleniwi.
32. Franc-Keldish effekti. Generaciya-rekombinaciya qubi'li'slari'. Zaryad tasi'wshi'lardi'n' jasaw waqi'ti' haqqi'ndag'i' tu'sinik.
33. Diffuziyali'q ha'm dreyflik toqlar. Toq ushi'n u'zliksizlik ten'lemesi. Tiykarg'i' emes zaryad tasi'wshi'lardi'n' qozg'ali'si'.
34. Kondensaciyalang'an ortalıqlardag'i' kollektivlik qubi'li'slar. Magnetizm. Diamegnetizm, paramagnetizm.
35. Kondensaciyalang'an ortalıqlardag'i' kollektivlik qubi'li'slar. Ferromagnetizm, antiferromagnetizm, ferri- ha'm antiferromagnetizm.
36. Almasi'w ta'sirlesiwini'n' kvantli'q tiykarlari'.
37. Asa o'tkizgishlik. Eksperimentalli'q faktler. Asa o'tkizgish materiallar. Meysner effekti. Izotopli'q effekt.
38. Metall emes kristallardag'i' optikali'q qubi'li'slar. Skin effekt. Kristallardi'n' ren'i.
39. Kristallardi'n' optikali'q aktivligi. Eksitonlar. Qatti' deneli kvantli'q elektronika.
40. Fotoo'tkizgishlik ha'm lyuminescensiya.

«Kondensatsiyalangan ortaliklar fizikasi» pa'ni boyi'nsha oqilatilug'i'n lektsiyalar tekstleri

Eskertiw: "Kondensatsiyalangan ortaliklar fizikasi" pa'ni boyi'nsha barli'q lektsiyalar noutbukti'n' ha'm elektronli'q proektrdi'n' ja'rdeminde o'tiledi.

KIRISIW

Kondensatsiyalangan hal bir biri menen ta'sirlesetug'i'n bo'lekshelerden turatug'i'n sistema si'pati'nda

En' da'slep zatti'n' kondensatsiyalangan hal tu'sinigin ani'qlaymi'z. Bul berilgen si'rtqi' ta'sirlerdegi ko'lemi bo'leksheler arasi'ndag'i' ta'sirlesiw ku'shleri menen ani'qlanatug'i'n bo'lekshelerdin' ansamblleri boli'p tabi'ladi'. Sonli'qtan en' da'slep kvant mexanikasi'nda bo'lekshenin' qalay ani'qlanatug'i'nli'g'i' menen tani'sami'z.

Kvantli'q mexanikadag'i' elementar bo'leksheler

Kvantli'q mexanikada elementar bo'lekshelerdin' ansamblleri ushi'n qollani'latug'i'n barli'q ko'z-qaraslar eksperimentalli'q faktlerge su'yenedi. "Nelikten sonday," degen sorawg'a juwap joq. Haqi'yqi'y jag'day usi'nnan ibarat. Eksperimentlerden elektromagnit tolqi'nlari'ni'n' zatlar menen tek energiyani'n' ayi'ri'm kvantlari' tu'rinde energiya almasatug'i'nli'g'i' belgili. Sonli'qtan elektromagnit tolqi'nlardi' energiyasi' menen kvaziimpulsi

$$E_f = \hbar\omega, p_f = \hbar\omega/s = 2\pi\hbar/\lambda = \hbar|\mathbf{k}| \quad (1)$$

shamalarina ten' bolg'an kvazibo'lekshelerdin' ag'i'si' dep qarawg'a boladi'. Bul an'latpalarda s arqali' jaqti'li'qti'n' tezligi belgilengen. Bul qatnaslar fotonni'n' energiyasi' E_f penen impulsi p_f shamalarin' og'an sa'ykes keliwshi kernewligi

$$E(\mathbf{r},t) = E_0 \exp[i(\omega t - \mathbf{k}\mathbf{r})] \quad (2)$$

shamasi'na ten' tegis monoxromat tolqi'nni'n' jiyiligi ω menen tolqi'n vektori' $\mathbf{k}$ menen baylani'sti'radi'.

Fotonlardi'n' tolqi'nli'q qa'siyetleri difrakciya ha'm interferenciya boyi'nsha o'tkerilgen eksperimentlerde ani'q ko'rinedi. Solay etip elektromagnit tolqi'nlari' bir waqit'ta tolqi'nli'q qa'siyetlerge de, bo'lekshelik qa'siyetlerge de iye boladi' eken. Eger tolqi'ndi' tek fotonlardi'n' ag'i'si' dep qaraytug'i'n bolsaq, onda $E(\mathbf{r},t)$ funkciyasi'ni'n' ma'nisi mi'nadan ibarat:

A'llette, tolqi'nni'n' energiyasi'ni'n' ti'g'i'zli'g'i' usi' tolqi'ndi' qalayi'nsha qarawdan g'a'rezsiz. Elektromagnit tolqi'nni'n' r noqati'ndag'i' t waqit momentindegi energiyasi'ni'n' ti'g'i'zli'g'i' usi' noqattag'i' ha'm usi' waqit momentindegi elektr maydani'ni'n' kernewliginin' modulinin' kvadrati' bolg'an $|E(\mathbf{r},t)|^2$ shamasi'na proporcional. Al korpuskulali'q interpretatsiyada energiyani'n' ti'g'i'zli'g'i' fotonlardi'n' tag'i'zli'g'i'na, yag'ni'y $N_f(\mathbf{r},t)\hbar\omega$ shamasi'ni'n' ja'rdeminde ani'qlanadi'. Demek fotonlardi'n' ti'g'i'zli'g'i' bolg'an $N_f(\mathbf{r},t)$ shamasi' $|E(\mathbf{r},t)|^2$ shamasi'na proporcional degen so'z. Bunnan difrakciya menen interferenciya ekrandag'i' fotonlardi'n' ti'g'i'zli'g'i'ni'n' bo'listiriliwi difraktsiyalangan tolqi'ndag'i' energiyani'n' ti'g'i'zli'g'i'ni'n' bo'listiriliwine sa'ykes keletug'i'nli'g'i' kelip

shi'g'adi'. $E(\mathbf{r}, t)$ maksimal bolg'an ori'nlarda $N_f(\mathbf{r}, t)$ shamasini da maksimalli'q ma'niske iye boladi'.

Al bir foton bolg'an jag'dayda awhal qanday boladi'?

Foton o'zi menen birge energiya kvanti'n ali'p ju'redi. Fotonni'n energiyasi'ni'n qanday ba bir bo'limin o'lsheytug'i'n hesh bir usil yamasa a'sbap joq. Sonli'qtan ekranda jaylasti'ri'lg'an fotonlardi'n sshetshiklari $\hbar\omega$ energiya kvanti'n esapqa aladi' yamasa hesh na'rseni de esapqa almaydi'. Sonli'qtan fotonni'n ekrang'a kelip tu'siwi itimalli'qli'q process boli'p tabi'ladi'. Bul itimalli'q difrakciyag'a ushi'rag'an tolqi'nni'n energiyasi'ni'n ti'g'i'zli'g'i' bolg'an $|E(\mathbf{r}, t)|^2$ shamasini'n ja'rdeminde ani'qlanadi'. Demek $|E(\mathbf{r}, t)|^2$ shamasini fotondi' ken'isliktin berilgen noqati'nda tabi'wdi'n itimalli'g'i'n ani'qlaydi'.

Tap sol si'yaqli' energiyasi' $p^2/2m$, al impulsi p bolg'an elektronlar da'stesi tegis monoxromat tolqi'n si'yaqli' difrakciyag'a ushi'raydi'. Bul da eksperimentalli'q fakt boli'p tabi'ladi'. Fotondi' ta'riyiplegen si'yaqli' erkin elektrondi' da sa'ykes tolqi'n funkciyasi' ja'rdeminde ta'riyiplew mu'mkin:

$$\psi(\mathbf{r}, t) = A_0 \exp [i(\omega t - \mathbf{k}\mathbf{r})]. \quad (3)$$

Bul an'latpada $\omega = p^2/(2\hbar m)$, $k = p/\hbar$. $\psi(\mathbf{r}, t)$ funkciyasi'ni'n fizikali'q ma'nisi mi'nadan ibarat: Oni'n modulinin' kvadrati' $|\psi|^2 = \psi\psi^*$ elektrondi' t waqi't momentinde ken'isliktin' $\mathbf{r}$ noqati'nda tabi'wdi'n itimalli'g'i'na ten'. Elektron ushi'n de Broyl tolqi'ni' dep atalatug'i'n itimalli'q tolqi'ni' jazi'ladi'.

Solay etip bo'leksheler tolqi'nli'q, al tolqi'nlar bo'lekshelik qa'siyetlarga iye. Bul kvantli'q-mexanikali'q dualizm boli'p tabi'ladi'.

A'dette bo'lekshenin' tipi ha'm oni'n hali' turaqli' xarakteristikalar menen ani'qlanadi'. Bunday turaqli' xarakteristikalar qatari'na massa, zaryad ha'm t waqi't momentindegi bo'lekshelerdi ani'qlaytug'i'n dinamikali'q xarakteristikalar bolg'an koordinata, impuls, energiya, ishki mexanikali'q moment (spin) kiredi. Bul xarakteristikalar klassikali'q fizikada mexanikali'q sistema si'pati'nda bo'lekshenin' hali'n toli'q ani'qlaydi'. Kvantli'q mexanikada bolsa dinamikali'q xarakteristikalar'ga Geyzenbergin' ani'qsi'zli'q principinen kelip shi'g'atug'i'n shekler qoyi'ladi':

$$\Delta p \cdot \Delta x \sim \hbar, \quad \Delta E \cdot \Delta t \sim \hbar. \quad (4)$$

Bul an'latpalarda $\hbar$ orqali' Plank turaqli'si' belgilengen.

Bo'lekshe noqatli'q obekt emes. Barli'q dinamikali'q xarakteristikalar'ni bir waqi'tta da'l beriw mu'mkin emes ha'm bunday procedura ma'niske de iye emes. Ani'qsi'zli'q qatnasi' klassikali'q fizikani'n tu'siniklerin kvantli'q obektlerge (bo'lekshelerge) qollani'wdi'n shegin ko'rsetedi.

U'zliksizlik ha'm diskretlik tu'siniklerin birlestiriw ushi'n kvantli'q mexanikada "maydan" tu'sinigin kirgizedi. Bo'lekshelerdin' ha'r bir sorti'na belgili maydan, mi'sali' fotonlarga elektromagnit maydani', elektronlar menen pozitronlarga elektronli'q-pozitronli'q maydan, mezonlarga mezonli'q maydan sa'ykes keledi. Ken'isliklik-u'zliksiz ortali'q si'pati'nda maydandi' ha'r qi'yl'i diskretlik-impulslik hallarda tura alatug'i'n bazi' bir dinamikali'q sistema dep qaray alami'z. Bul sistemani'n en' to'mengi hali' "maydanni'n vakuumi'" dep ataladi'. Bul bo'leksheler bolmaytug'i'n materiyani'n ayri'qsha hali' boli'p tabi'ladi'. Qozi'w ayi'ri'm porciyalardi'n, energiya menen impuls kvantlari'ni'n payda boli'wi' menen ju'zege keledi. Energiya kvantlari' maydanlardi'n elementar qozi'wlari' dep ataladi'. Bul qozi'wlar bo'leksheler si'pati'nda ani'qlanadi'. Elementar qozi'wlardi'n energiyasi' bo'lekshenin' massasi'n ani'qlaydi':

$$E = mc^2. \quad (5)$$

Biraq kinetikali'q energiya bo'lekshenin' impulsi menen de baylani'sli'. Qozi'wdi'n' en' to'mengi energiyasi'ni'n' ma'nisi $p = 0$ impulsine sa'ykes keledi. Bul bo'lekshenin' tuwi'li'wi' ushi'n za'ru'rli bolg'an en' kishi energiya boli'p tabi'ladi'. Bul energiya bo'lekshenin' massasi'n da ani'qlaydi'.

Elektron-pozitronli'q maydanni'n' jubi'ni'n' (elektron menen pozitronni'n') tuwi'li'wi' ushi'n kerek bolg'an energiya shama menen 1 MeV ke ten'. Bul elektronni'n' shama menen $m_0 = 10^{-30}$ kg bolg'an massasi'na sa'ykes keledi. Elektromagnit maydanni'n' qozi'w energiyasi' nolden baslanadi'. Bul fotonni'n' massasi'ni'n' nolge ten' ekenligin an'g'artadi'.

Ha'r qi'yl'i' maydanlar biri biri menen energiya almasa aladi', yag'ni'y bir biri menen ta'sir etisedi (ta'sirlesedi). Bunday ta'sirlesiw bo'lekshelerdin' bir birine ta'sir etiw ku'shin ani'qlaydi'. Bo'lekshelerdin' bir biri menen ta'sirlesiw xarakterleytug'i'n parametr di olardi'n' zaryadi' dep ataydi'. Qanday maydandag'i' ta'sirlesiw din' qarap ati'ri'lg'anli'g'i'na baylani'sli' elektr zaryadi' (mi'sali' elektromagnit maydani' menen ta'sirlesiw ori'n alg'anda), mezonli'q zaryad (mezanli'q maydan menen ta'sirleskende) ha'm basqa da zaryadlar haqqi'nda ayti'ladi'. Birinshi jaqi'n lasi'wda neytron elektromagnit maydani' menen ta'sirlespeydi. Oni'n' elektr zaryadi' nolge ten'. Solay etip elementar bo'lekshelerdi kvantli'q maydanlardi'n' elementar qozi'wlari' dep qarawg'a boladi' eken.

Zatlardi'n' strukturali'q birlikleri

Bo'lekshelerdin' korpuskulali'q-tolqi'nli'q ta'biyati' usi' bo'leksheler ta'repinen payda etilgen kondensaciyalang'an haldi'n' u'zliksizlik ha'm diskretlik tin' sintezi ekenligin ko'rsetedi. Korpuskulali'q ha'm tolqi'nli'q ko'z-qaraslar materiya qa'siyetinin' eki proekciyasi' boli'p tabi'ladi'. Bul bir haqi'yqatli'qti'n' eki ta'repi. Biraq zatty an' konlensaciyalang'an hali'ni'n' strukturali'q sho'lkemlestiriliwinde belgili bir ierarxiya ori'n aladi': nuklonlar yadrolardi' payda etedi. Ha'zirgi zamandag'i' ori'n alg'an ko'z-qaraslar boyi'nsha protonlar menen neytronlar kvarkler menen glyuonlardan turadi', atom yadrolari' bolsa bir biri menen ta'sirlesetug'i'n ko'p sandag'i' kvarklerden, glyuonli'q ha'm mezanli'q maydanlardan turadi'. Biraq kondensaciyalang'an sistemalardi' qarap shi'qqanda yadrolardi'n' tek makroskopiyali'q parametrleri g'ana a'hmiyetke iye. Sonli'qtan ken' tu'rde qabi'l etilgen nuklonli'q modelden paydalani'w menen shekleniwge boladi'. Yadrolar menen elektronlar atomlardi', al atomlar bolsa molekularardi' payda etedi. Usi'g'an baylani'sli' soraw tuwi'ladi': zatlardi' u'yrengende qanday jag'daydan kelip shi'g'i'w kerek? Olardi' barli'q elementar bo'lekshelerdin' ji'ynag'i'nan turadi' dep esaplaw kerek pe yamasa zatlardi' payda etetug'i'n quramali' bolg'an sistemalardi' (mi'sali' yadrolardi', atomlardi', molekularardi') qarap shi'g'i'w menen sheklenip olardan zatlardi' quri'w kerek pe? A'piwayi'raq ha'm quramali'raq du'zilislerdin' (na'rselerdin', obrazovaniyelerdin') arasi'ndag'i' shegara qaysi' ori'nda o'tedi. Bul shegara "zatti'n' strukturali'q birligi" tu'siniginin' ja'rdeminde ani'qlanadi'. Kondensaciyalang'an ortali'qlardi' payda etkende "elementar" tu'rde qaralatug'i'n bo'lekshelerdi zatlardi' strukturali'q birligi dep qabi'l etiledi. Zatti'n' strukturali'q birligi haqqi'nda aytqanda payda boli'wi'ni'n' energiyasi' olar arasi'ndag'i' ta'sirlesiw energiyasi'na ha'm olardi'n' qozg'ali'si'ni'n' kinetikali'q energiyasi'na sali'sti'rg'anda a'dewir u'lken bolg'an bo'leksheler yamasa bo'leksheler komplekslerin' tu'siniw kerek. Payda boli'w energiyasi' deginimizde ko'p bo'lekshelerden turatug'i'n kompleksler ushi'n baylani's energiyasi'n, al ayi'ri'm bo'leksheler ushi'n olardi'n' tuwi'li'w energiyasi'n tu'sinemiz.

Eger zatty an' baslang'i'sh strukturali'q birlikleri atomlar yamasa molekular boli'p tabi'latug'i'n bolsa, onda yadro menen elektron arasi'ndag'i' baylani's energiyasi' yamasa molekularladag'i' atomlar arasi'ndag'i' baylani's energiyasi' olardi'n' qozg'ali'si'ni'n' kinetikali'q energiyasi'nan ja'ne olar arasi'ndag'i' ta'sirlesiw energiyasi'nan u'lken boli'wi'

kerek. Bunday sha'rt ori'nlang'anda zat bar bolatug'i'n temperaturalar intervali'ni'n' barli'g'i'nda da atomlar menen molekulalardi'n' individuallig'i' toli'q saqlanadi'. Biraq kondensaciya bari'si'nda ta'sirlesiw ku'shlerinin' shamasi' ju'da' u'lken ha'm sonli'qtan atomlar menen molekulalardi'n' individuallig'i' jog'alatug'i'n bolsa, onda olardi' strukturali'q birlikler si'pati'nda qarawg'a bolmaydi'. Bug'an as duzi' NaCl kristalli' mi'sal bola aladi'. Bul kristalda Na⁺ ioni' bir waqi'tta 8 dana Cl⁻ ioni' menen baylani'sqan. NaCl kristalli' gigant du'zilis boli'p tabi'ladi'. Oni'n' strukturali'q birlikleri Na yamasa Cl atomlari' emes, al Na⁺ ha'm Cl⁻ ionlari' boli'p tabi'ladi'. Ekinshi mi'sal retinde metallardi' ko'rsetiw mu'mkin. Metallarda kollektivlestirilgen elektronlar on' zaryadli' ionli'q tulg'alar ta'repinen payda etilgen pa'njereni tolti'ri'p turadi'.

Zatti'n' kondensaciyalang'an hali'n' strukturali'q birliklerdin' ansambli dep qaraw ma'selelerdi a'dewir a'piwayi'lasti'radi'.

Kondensaciya'li'q ortalig'qlardi'n' qaliplesiwinde (payda boli'wi'nda) strukturali'q birliklerdin' tutqan orni'

Qondensaciya'li'q ortalig'qlardi'n' qalipsetleri:

- a) atomlardi'n' yadrolari'ni'n' qalipsetleri,
- b) atomlardi'n' elektronli'q qabi'qlari'ni'n' strukturali'q,
- v) strukturali'q birlikler arasi'ndag'i' ta'sirlesiw ku'shleri,
- g) strukturali'q birlikler ansamblin' ta'riyipleytug'i'n statistika boyi'nsha ani'qlanadi'.

1. Yadrolar. Strukturali'q birlikler si'pati'nda yadrolardi'n' a'hmiyetli xarakteristikalarini' mi'nalardan ibarat: massa (protonlar menen neytronlardi'n' sani' boyi'nsha ani'qlanadi'), zaryad (protonlardi'n' sani'), qozg'ali's mug'dari'ni'n' mexanikali'q momenti L_N , $\hbar$ shamasi'na ten' bolg'an spin (I arqali' yadroli'q kvant sani' belgilengen). Yadroni'n' spini nuklonlardi'n' menshikli qozg'ali's momentleri menen olardi'n' orbitali'q momentlerinin' vektorli'q qosi'ndi'si'na ten'. Neytronlar menen protonlardi'n' spinleri $\hbar/2$ ge ten'. Orbitali'q momentler $\hbar$ shamasi'na yamasa usi' shamadan n ese u'lken boladi'. Taq sanli' nuklonlardan turatug'i'n yadrolar yari'm pu'tin spinge iye boladi' ($I = 1/2, 3/2, 5/2, \dots$) ha'm Fermi-Dirak statistikasi'na bag'i'nadi'. Al jup nuklonnan turatug'i'n yadrolar pu'tin spinge iye ($I = 1, 2, 3, \dots$) ha'm Boze-Eynshteyn statistikasi'na bag'i'nadi'. Ko'plegen yadrolardi'n' spinleri u'lken emes: $I < 9/2$. Ten'dey sanlag'i' protonlar menen neytronlardan turatug'i'n yadrolar ushi'n $I = 0$.

Yadrolardi'n' diametri shama menen 10^{-15} metrge ten'. Elektronlardi'n', protonlardi'n' ha'm neytronlardi'n' tiykarg'i' xarakteristikalarini' to'mendegi kestede keltirilgen.

Bo'lekshe	Massasi'		Zaryad, Kl.	Spin, $\hbar$
	kg	m.a.b.		
Elektron	$9,109 \cdot 10^{-31}$	0,0005486	$-1,6022 \cdot 10^{-19}$	$1/2$
Proton	$1,673 \cdot 10^{-27}$	1,00728	$1,6022 \cdot 10^{-19}$	$1/2$
Neytron	$1,675 \cdot 10^{-27}$	1,00867	0	$1/2$

Spini $I \neq 0$ bolg'an yadrolar magnitlik dipollik momentke iye boladi':

$$\mu_N = \gamma \hbar I. \quad (6)$$

Yadroli'q giromagnitlik qatnas γ yadroni'n' magnit momenti bolg'an μ_N shamasi'ni'n' oni'n' qozg'ali's momenti L_N ge qatnasi'na ten'. Bul shamani' giromagnitlik qatnas $\gamma_0 = e/m_p$ shamasi' arqali' an'lati'w qabi'l etilgen (e menen m_p protonni'n' zaryadi' menen massasi'n an'g'artadi'). Bunday jag'dayda $\gamma = g\gamma_0$. Bul an'latpada g arqali' yadroli'q Lande faktori'

belgilengen. $\mu_N = g\gamma_0\hbar I = g\mu_B^N I$. $\mu_B^N = \frac{e\hbar}{2m_p c} = 5,05 \cdot 10^{-24}$ erg/Gs (bul SGS birlikler sistemasi'nda) $= e\hbar/2m_p = 5,05 \cdot 10^{-27}$ Dj/Tl (bul SI birlikler sistemasi'nda) yadroli'q magneton boli'p tabi'ladi'. μ_N shamasi' a'dette μ_B^N yadroli'q magnetonlardi' o'lishenedi.

Spin menen yadroli'q magnit momentinin' bar boli'wi' menen mi'nalar baylani'sli': 1) yadroli'q magnetizm ha'm 2) elektrlardi'n' magnit momentleri menen magnitlik ta'sirlesiw (bul elektronlardi'n' energiya qa'ddilerinin' asa juqa qa'ddilerge aylani'wi'na ali'p keledi).

Qozbag'an tiykarg'i' halda turg'anda yadroni'n' elektr zaryadi'ni'n' ti'g'i'zli'g'i' ρ koordinatalardi'n' jup funkciyasi' boli'p tabi'ladi', yag'ni'y $\rho(\mathbf{r}) = \rho(-\mathbf{r})$. Conli'qtan yadrolardi'n' turaqli' elektrlik dipollik momenti nolge ten'. Biraq $I \geq 1$ bolg'an barli'q yadrolar elektrlik kvadрупollik momentke iye boladi'. Kvadрупollik momentler yadroni'n' formasi'ni'n' (yadroni'n' formasi' haqqi'nda ga'p etkenimizde zaryadi'n' ken'isliktegi tarqali'wi'n na'zerde tutami'z) sferali'q simmetriyadan o'zgesheligi menen baylani'sli'. Kvadрупollik momenttin' ma'nisi yadroni'n' o'lishemlerinin' o'siwi menen birge o'sedi. Pri $I < 1$ bolg'an jag'daylarda yadrolar sferali'q simmetriyag'a iye boladi' ha'm sonli'qtan olardi'n' elektrlik kvadрупollik momentleri nolge ten'.

Elektrlik kvadрупollik momenttin' ishki bir tekli emes E elektr maydani' menen ta'sir etisiwi (yag'ni'y elektr maydani'ni'n' gradientinin' ori'n ali'wi') yadroli'q spin I din' E maydani'ni'n' simmetriya ko'sherlerine sali'sti'rg'anda ha'r ki'yli' orientaciyalarg'a iye boli'wi'na baylani'sli' energiyali'q hallardi'n' azg'i'ni'wi'ni'n' ali'p taslani'wi'na ali'p keledi. Bul yadroli'q kvadрупollik rezonans qubi'li'si'ni'n' ju'zege keliwine sebep boladi'. Bunday rezonans si'rtqi' magnit maydani' bolmag'an jag'daylarda baqlanadi'. Al magnitlik rezonansta bolsa bir energiya qa'ddinin' bir neshe qa'ddilerge bo'liniwi si'rtqi' magnit maydani' ta'repinen ju'zege keltiriledi.

Usi'ni'n' menen bir qatarda yadrolardi'n' elektrlik kvadрупollik momentlerinin' elektronlar menen ta'sirlesiw dipollik magnit momentlerinin' ta'sirlesiw si'yaqli' atomlar menen molekulalardag'i' elektronlardi'n' energiya qa'ddilerinin' asa juqa tu'rde qa'ddilerge aji'rali'wi'na ali'p keledi.

Yadroni'n' zaryadi' zattag'i' relyativistlik effektlerdin' shamasi'n ani'qlaydi'. Mi'sali' spin-orbitali'q ta'sirlesiw din' shamasi'n ani'qlaydi'. Spin-orbitali'q ta'sirlesiw degenimiz elektronni'n' menshikli magnit momenti menen oni'n' orbitali'q qozg'ali'si'nan payda bolg'an magnit momenti arasi'ndag'i' ta'sirlesiw boli'p tabi'ladi'. Bunday ta'sirlesiw din' potentsialli'q energiyasi' spin-orbitali'q baylani'sti'n' energiyasi' dep ataladi'. Spin-orbitali'q ta'sirlesiw din' energiyasi' elektronni'n' qozg'ali's tezligi V ni'n' ja'rdeminde ani'qlanadi'. Sonli'qtan bul ta'sirlesiw relyativistlik effekt boli'p tabi'ladi'. Atomdag'i' elektronlardi'n' qozgali's tezligi yadroni'n' zaryadi'na baylani'sli' bolg'anli'qtan awi'r atomlarda spin-orbitali'q baylani'sti'n' energiyasi' u'lken boladi'. Spin-orbitali'q ta'sirlesiw din' saldari'nan spinnin' porekciyalari' menen bir birinen ayrali'tug'i'n elektronni'n' hallari' ha'r qi'yli' energiyalarg'a iye boladi'. Bul atomlardag'i', molekulalardag'i', kristallardag'i' elektronlardi'n' energiya qa'ddilerinin' awi'si'wi'ni'n' ha'm bir neshe qa'ddilerge bo'liniwinin' sebebi boli'p tabi'ladi'.

Da'slep atomdag'i' spin-orbitali'q ta'sirlesiw di qarap o'temiz. Atomda elektronlardi'n' yadroni'n' do'geregindegi orbitali'q qozg'ali'si'na baylani'sli' barli'q waqi'tta da ishki magnit maydani' boladi'. Atomda zaryadi' Ze bolg'an yadroni'n' do'gereginde V tezligi menen shen'ber ta'rizli orbita boyi'nsha qozg'alatug'i'n elektronli' qaraymi'z. Elektron menen baylani'sli' bolg'an koordinatada yadro -V tezligi menen qozg'aladi'. Na'tiyjede -ZeV tog'i' payda boladi'. Elektron ornatilgan noqattag'i' bul toqti'n' magnit maydani'

$$H = -\frac{Ze}{cr^3} [\mathbf{rV}] = \frac{Ze}{mcr^3} l \quad (7)$$

shamasi'na ten' boladi'. Bul an'latpada $\mathbf{l} = m[\mathbf{rV}] = [\mathbf{rp}]$ arqali' elektronni'n' qozg'ali's mug'dari'ni'n' orbitali'q momenti, $\mathbf{p}$ arqali' elektronni'n' impulsi belgilengen.

Elektronli'q spinlik magnit momenti $M = -\frac{eS}{mc}$ ($\mathbf{S}$ arqali' elektronni'n' spini belgilengen) elektron menen baylani'sqan koorlinatalar sistemasi'ndag'i' $\mathbf{H}$ magnit maydani' menen ta'sirlesedi ha'm bul ta'sirlesiwge sa'ykes keletug'i'n energiya

$$H_s = -(\mathbf{MH}) = \frac{e}{mc} \frac{Ze}{mcr^3} [\mathbf{Sl}] = \frac{Ze^2}{m^2c^2r^3} (\mathbf{Sl}) \quad (8)$$

shamasi'na ten'. En' baslang'i'sh koorlinatalar sistemasi'nda Lorenc tu'rlendiriwinen keyin ali'ng'an an'latpada $\mathbf{l}/2$ ko'beytiwshisi payda boladi'.

$$\frac{\mathbf{lS}}{r^3} = \frac{[\mathbf{rp}]\mathbf{S}}{r^3} \quad (9)$$

an'latpasi'n qaraymi'z. Kulon potentsiali' ushi'n

$$U(r) = -\frac{Ze^2}{r}. \quad (10)$$

Cferali'q koorlinatalar sistemasi'ndag'i' gradient bi'layi'nsha jaziladi':

$$\nabla U(r) = -\frac{Ze^2\mathbf{r}}{r^3}. \quad (11)$$

Bunnan

$$\frac{\mathbf{r}}{r^3} = \frac{\nabla U(r)}{Ze^2}. \quad (12)$$

$\frac{\mathbf{r}}{r^3}$ shamasi'n (9)-an'latpag'a qoysaq

$$\frac{\mathbf{lS}}{r^3} = \frac{[\nabla U(r)\mathbf{p}]\mathbf{S}}{Ze^2} \quad (13)$$

an'latpasi'n alami'z. Bunnan

$$H_s = \frac{Ze^2[\nabla U(r)\mathbf{p}]\mathbf{S}}{2m^2c^2Ze^2} = \frac{[\nabla U(r)\mathbf{p}]\mathbf{S}}{2m^2c^2} \quad (14)$$

an'latpasi'n alami'z. Elektron ushi'n $S = \hbar/2$. Spin-orbitali'q ta'sirlesiw energiyasi'ni'n' elektronni'n' yadrog'a sali'sti'rg'andag'i' qozg'ali'si'ni'n' ori'n ali'wi'ni'n' saldari'nan payda boladi': elektron yadroni'n' elektr maydani'nda qozg'aladi'. Sonli'qtan kristallardag'i' spin-orbitali'q ta'sirlesiw elektronni'n' pa'njerenin' bir tekli emes elektr maydani'nda qozg'ali'wi'ni'n' saldari'nan payda boladi' eken.

Joqari'da keltirilgen esaplaw sxemasi'n paydalani'w ushi'n atomdag'i' orayli'q maydandi' kristaldi'n' da'wirli maydani' menen almasti'ri'w jetkilikli. Uli'wma jag'dayda H_s shamasi' potentsialdi'n' gradientinin' esabi'nan payda boladi'.

2. Atomlardi'n' elektronli'q qabi'g'i'. Elektronli'q qabi'qti'n' strukturasi'

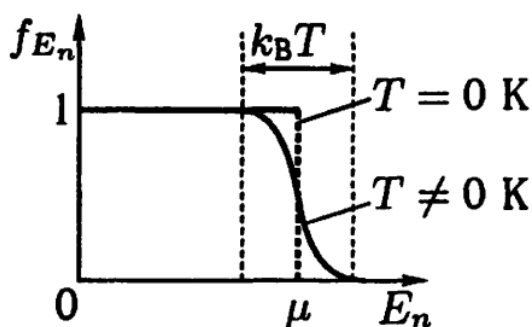
a) ximiyali'q baylani'slardi'n' strukturasi'n, olardi'n' energiyasi'n ha'm bir birine sali'sti'rg'andag'i' orientaciyalari'n, soni'n' menen birge kristallardi'n' strukturasi'n;

b) atomlardi'n' magnitlik orbitali'q ha'm spinlik magnitlik momentlerin;
v) energiya qa'ddilerinin' strukturali'n ha'm atomlardi'n' optikali'q qa'siyetlerin ani'qlaydi'.

3. Strukturali'q birlikler ansambllerinin' statistikasi'. Statistika bo'lekshelerdin' energiya qa'ddileri boyi'nsha bo'listiriliwin ani'qlaydi'. Eger bo'leksheler yari'm pu'tin spinge iye bolsa, onda ular Fermi-Dirak statistikasi'na ha'm Pauli principine bag'i'nadi'. Bul princip boyi'nsha spin menen impulstin' berilgen ma'nisine iye ha'r bir halda tek bir bo'lekshe g'ana tura aladi'. Pu'tin spinge iye bo'leksheler Boze-Eynshteyn statistikasi'na bag'i'nadi'. Bunday jag'dayda ha'r bir halda qa'legen sandag'i' bo'lekshenin' boli'wi' mu'mkin. Fermi-Dirak bo'listiriliwinde energiyasi' E_n bolg'an halda bo'leksheni tabi'wdi'n' itimalli'g'i' f_{E_n} temperatura T shamasina ten' bolg'anda (usi'ni'n' menen birge E_n energiyasi'na iye haldag'i' bo'leksheler sani' n_E haqqi'nda da ayti'wg'a boladi')

$$f_{E_n} = \frac{1}{\exp\left[\frac{E_n - \mu}{k_B T}\right] + 1} \quad (15)$$

formulasi' menen ani'qlanadi'. Bul an'latpada μ arqali' ximiyali'q potentsial, k_B arqali' Bolcman turaqli'si' belgilengen. (15)-g'a'ezlik eki temperatura ushi'n to'mendegi 1-su'wrette keltirilgen.



1-su'wret.
 $T = 0$ ha'm $T \neq 0$ temperaturalardag'i'
Fermi-Dirak bo'listiriliwinin' tu'ri.

$E_n < \mu$ ha'm $T = 0$ bolg'anda $f_{E_n} = 1$, yag'ni'y energiyasi' μ energiyasi'nan kishi bolg'an hallardi'n' barli'g'i' da tolti'ri'lg'an. $E_n > \mu$ ha'm $T = 0$ bolg'anda barli'q hallar bos. Bunday bo'listiriliw eki talapti'n' ori'nlani'wi'ni'n' na'tijyesi boli'p tabi'ladi': energiyani'n' minimalli'g'i'ni'n' ha'm Pauli principinin'. Erkin elektronlar ushi'n tolti'ri'lg'an hallardi'n' shegarasi'na sa'ykes keliwshi E_F energiyasi' Fermi energiyasi' dep ataladi'. Uli'wma jag'dayda Fermi energiyasi'n $f_{E_n} = 1/2$, yag'ni'y $E_F = \mu$ bolg'an jag'daydag'i' energiya si'pati'nda ani'qlaydi'. $T > 0$ bolg'anda Fermi-Dirak bo'listiriliwi $\approx k_B T$ shamasina so'zi'ladi' (razmi'vaetsya). Bul jag'day 1-su'wrette keltirilgen.

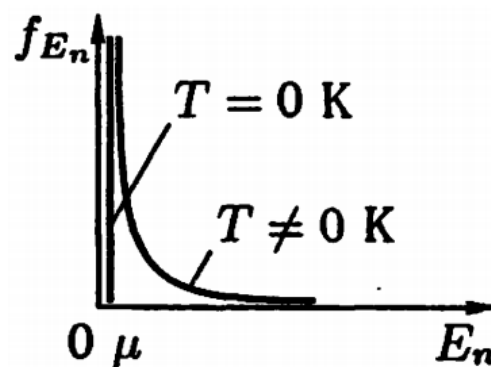
Boze-Eynshteyn bo'listiriliwinde energiyasi' E_n shamasina ten' halda bo'leksheni tabi'wdi'n' itimalli'g'i'

$$f_{E_n} = \frac{1}{\exp\left[\frac{E_n - \mu}{k_B T}\right] - 1} \quad (16)$$

formulasi'ni'n' ja'rdeminde ani'qlanadi'. $E_n > \mu$ ha'm $T = 0$ bolg'anda $f_{E_n} = 0$, al $E_n \rightarrow \mu$ sheginde $f_{E_n} \rightarrow \infty$. Boze-Eynshteyn bo'listiriliwi 2-su'wrette keltirilgen ha'm ol bo'leksheler arasi'nda ta'sirlesiw bolmag'an jag'dayda turi's boladi'.

2-su'wret.

$T = 0$ ha'm $T \neq 0$ temperaturalardag'i
Boze-Eynshteyn bo'listiriliwinin' tu'rleri.



Ta'sirlesiw bar bolg'an jag'daylarda (iyterisiw ku'shleri bar bolg'anda) barli'q bo'lekshelerdin' en' to'mengi qa'ddide kondensaciyalani'wi' energiyali'q jaqtan uti'mli' emes. Bunday jag'dayda bir haldag'i' bo'lekshelerdin' ju'da' u'lken ti'g'i'zli'g'i' iyterisiw ku'shlerinin' esabi'nan ta'sirlesiw din' potentsialli'q energiyasi'ni'n' u'lkeyiwine ali'p keledi. Ti'ykarg'i' haldag'i' hallardi'n' ti'g'i'zli'g'i'ni'n' kemeyiwi ha'm bo'lekshelerdin' bir bo'leginin' energiyani'n' joqari' qa'ddilerine o'tiwi energiyali'q jaqtan uti'mli' boladi'. Bunday jag'dayda boze-eynshteyn kondensati'ni'n' ju'dewi (istoshenie) ori'n aladi' dep ayti'w qabi'l etilgen.

A'melde ansambllerdin' statistikasi' olardi'n' barli'q qa'siyetlerin ani'qlaydi': ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'n, ji'lli'li'q o'tkizgishligin, elektr o'tkizgishligin ha'm magnetizmd.

Ta'sirlesiw ku'shleri. Ta'sirlesiw ku'shleri mi'nalardi' ani'qlaydi': 1) strukturani', 2) sistemani'n' qatti'li'g'i'n, 3) konlensaciyalang'an ortalit'qtag'i' bo'lekshelerdin' terbelislerinin' spektrin, 4) zaryadlang'an bo'leksheler ushi'n (mi'sali' metaldag'i' ionlar menen elektronlar) bir sistema ekinshi sistemani' polyarizaciyalaydi', bul tek kondensaciyalang'an sistemalar ushi'n xarakterli bolg'an ta'sirlesiw din' jan'a tipinin' payda boli'wi'na ali'p keledi. Ta'sirlesiw din' bul jan'a tipin polyarizaciya li'q ku'shler dep ataydi'. Dara jag'dayda bunday ta'sirlesiw din' ori'n ali'wi'ni'n' saldari'nan asa o'tkizgishlik qubi'li'si' ju'zege keledi.

1. Kristalli'q pa'njere

Kristalli'q qatti' denelerdin' en' basli' o'zgesheligi olardi' payda etiwshi atomlardi'n' yamasa molekulalardi'n' ken'isliktegi da'wirli tu'rde jaylasi'wi' boli'p tabi'ladi'. Sol atomlar menen molekular ken'isliklik u'sh o'lshe'mli kristalli'q pa'njereni payda etedi. Kristallardi'n' duri's geometriya li'q formalarg'a iye boli'wi' atomlardi'n' da'wirli jaylasi'wlari'na baylani'sli'. Kristalli'q pa'njeredegi atomlardi'n' anizotropiya li'q jaylasi'wlari' qatti' denelerdin' texnikada ken' tu'rde qollani'latug'i'n ko'p sandag'i' anizotropiya li'q qa'siyetlerinin' payda boli'wi'n ta'miyinleydi. Kristallardi'n' ji'lli'li'q qa'siyetleri oni'n' kristalli'q pa'njeresinin' terbelislerin tallawdan kelip shi'g'adi'. Elektronlardi'n' kristalli'q pa'njerenin' da'wirli potentsiali'ndag'i' qozg'ali'slari'n qaraw kristallardi'n' elektrlik qasiyetlerin tu'sindiredi. Kristalli'q pa'njerenin' ishinde qozg'alatug'i'n bo'lekshelerdin' de, si'rttan kelip tu'setug'i'n bo'lekshelerdin' de (elektronlardi'n', neytronlardi'n', fotonlardi'n') difrakciyasi' baqlanadi'. Kristallarda qozg'alatug'i'n elektronlardi'n' difrakciyasi'ni'n' ja'rdeminde kristallardag'i' elektronlardi'n' energiya li'q qa'ddilerinin' jaylasi'wlari'ni'n' o'zgesheliklari ani'qlanadi'. Kristalli'q pa'njeredegi elektronlardi'n', fotonlardi'n', neytronlardi'n' difrakciyalari qatti' denelerdin' quri'li'si'n izertlew din' en' ko'p informaciya g'a iye usi'llari' boli'p tabi'ladi'. Buzi'qli'qlar, yag'ni'y kristalli'q pa'njerenin' defektleri bolsa qatti' denelerdin' barli'q qa'siyetlerine ju'da' ku'shli ta'sir etedi.

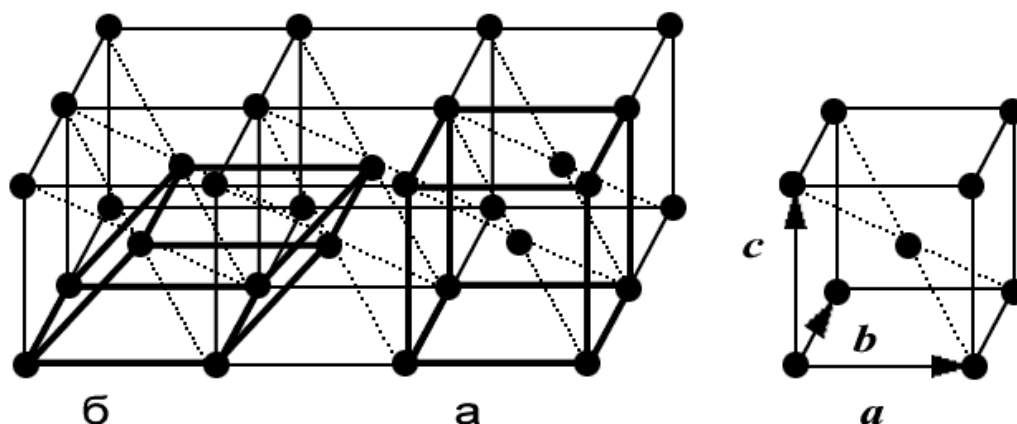
Biz to'mende kristalli'q pa'njere tu'siniginin' ja'rdeminde kristallardi' ta'riplewdin' usi'llari'n, kristallardi'n' payda boli'wi'ni'n' fizikali'q sebeplerin ha'm bo'lekshelerdin' kristallardag'i' difraktsiyasi'ni'n' o'zgesheliklerin qarap shi'g'ami'z. Bunnan keyingi lekciyalarda qarap shi'g'i'latug'i'n qatti' denelerdin' ha'r qi'yli' qa'siyetleri usi' lekciyalardag'i' tu'sinikler menen konsepciyalarg'a tiykarlanadi'.

1.1. Kristallardi'n' quri'li'si'n ta'riplew

Kristaldi' ken'islikte da'wirli tu'rde qaytalanatug'i'n birdey strukturali'q birlik bolg'an kristaldi'n' elementar quti'shalari'nan turadi' dep ko'z aldi'mi'zg'a keltiruwimiz mu'mkin. Elementar quti'sha bir yamasa bir neshe atomnan turi'wi' mu'mkin.

Elementar quti'sha uli'wma jag'dayda qi'ya mu'yeshli paralelopiped formasi'na iye boladi'. Bul quti'shada jaylasqan barli'q atomlardi' kristaldi'n' elementar quti'shasi'ni'n' bazisi dep ataw qabi'l etilgen. Elementar quti'shani'n' ha'm bazistin' quri'li'si'ni'n' ni'zamli'qlari' kristaldi'n' ko'plegen qa'siyetlerin ani'qlaydi'. Mi'sali' quti'shani'n' simmetriyali'q da'rejesi kristaldi'n' ko'plegen qa'siyetlerin, soni'n' ishinde elektrlik, magnitlik ha'm mexanikali'q qa'siyetlerin ani'qlaydi'. Elementar quti'sha o'z ishine bir yamasa bir neshe atomdi' ali'wi' mu'mkin. Temir, xrom, mi's, gu'mis si'yaqli' ko'pshilik metallarda elementar quti'sha tek bir atomnan turadi'. Kristal bir neshe ximiyali'q elementlerden turatug'i'n bolsa elementar quti'sha keminde eki atomnan turadi'. Bunday kristallarg'a mi'sal retinde xlorli' nartiydi keltire alami'z. Geypara kristallardi'n' elementar quti'shalari'nda bir birine ilinirken molekulali'q toparlar bar boladi' (muz kristallar, ko'plegen magnitlik materiallardi'n' kristallari'). Beloklardi'n' elementar quti'shalari' bolsa o'z ishine bir neshe mi'n' atomlardi' aladi'.

Elementar quti'shani' saylap ali'w. Qa'legen kristaldi'n' quri'li'si'n ta'riplew ushi'n oni'n' elementar quti'shasi'n saylap ali'w kerek boladi'. Bir kristaldi'n' elementar quti'shasi'n ko'p sanli' usi'llar menen saylap ali'wdi'n' mu'mkin ekenligi o'z-o'zinen tu'sinikli. (1.1-su'wret). Elementar quti'shani' saylap alg'anda quti'shani'n' formasi'ni'n' a'piwayi'li'g'i'na, tuwri' mu'yeshlerdin' mu'mkin bolg'ani'nsha ko'p boli'wi'na ha'm oni'n' ko'leminin' minimumg'a iye boli'wi'na ti'ri'sadi'. En' kishi ko'lemge iye bolg'an elementar quti'shani' a'piwayi' elementar quti'sha (primitivnaya elementarnaya yasheyka) dep ataydi'. Biraq ko'pshilik jag'daydarda elementar quti'shani' ko'lemin u'lkenlew, sonli'qtan oni'n' ishinde bir neshe atom bolatug'i'n, biraq oni'n' formasi'n a'piwayi' etip saylap aladi'. Bunday elementar quti'shalarda bazisti bir neshe atom quraydi'. 1.1-su'wrette α -temirdin' kristalli'q pa'njeresi keltirilgen. Bul quri'li'sti' kublar menen toltiri'lg'an ken'islik tu'rinde su'wretlegen qolayli'. Kublardi'n' mu'yeshlerinde (1) ha'm orayi'nda (2) temir atomlari' jaylasqan boladi'. Tap usi'nday, soni'n' menen ko'p tarqalg'an pa'njereni ko'lemde oraylasqan kubli'q (KOK) pa'njere dep ataw qabi'l etilgen. Elementar quti'shani' kvadrat ultang'a iye qi'ya mu'yeshli paralelopiped (b) tu'rinde qabi'l etiwge boladi'. Biraq elementar quti'sha retinde ko'lemi 2 ese u'lken ha'm mu'yeshlerinin' barli'g'i' da tuwri' mu'yeshli bolg'an (a) quti'shani' saylap alg'an qolayli'. Bunday elementar kati'sha atomlardi'n' jaylasi'wlari'ndag'i' simmetriyani' jaqsi'raq sa'wlelendiredi ha'm oni' matematikali'q jaqtan tallaw ushi'n qolayli'.



1.1-su'wret. Ko'lemde oraylasqan elementar quti'shani' saylap ali'w.

Saylap ali'ng'an elementar quti'shani' oni'n' qabi'rg'alari'na sa'ykes keliwshi ha'm bir noqatta kesilesetug'i'n u'sh $\vec{a}$, $\vec{b}$, $\vec{c}$ translyაციyalari' menen ta'ripleydi. $\vec{r}' = \vec{r} + n_1\vec{a} + n_2\vec{b} + n_3\vec{c}$ qatnasi' menen baylani'sqan (n_1, n_2, n_3 ler pu'tin sanlar) radius-vektorlari' $\vec{r}'$ ha'm $\vec{r}$ bolg'an eki noqat kristaldi'n' ha'r qi'yli' elementar quti'shalardag'i' bazistin' bir noqati'n ta'ripleydi. Bunday jag'dayda bazistin' atomlari'ni'n' jaylasi'wlari'n bir elementar quti'shani'n' sheklerinde ta'riplegen qolayli' boladi'. Al kristaldi'n' barli'q quri'li'si' usi' quti'shani' «tirajlaw» menen a'melge asi'ri'ladi'. «Tirajlaw» ushi'n quti'shani' translyaciya vektorlari' dep atalatug'i'n $\vec{T} = n_1\vec{a} + n_2\vec{b} + n_3\vec{c}$ vektori' shamalari'na ji'li'sti'ri'p shi'g'i'w kerek boladi'. Solay etip kristaldi'n' quri'li'si'n toli'q ta'riplew ushi'n to'mendegilerdi beriw kerek eken:

- 1) berilgen noqatti' barli'q $\vec{T}$ vektorlari'na parallel ko'shiriw joli' menen ali'ng'an ken'isliklik pa'njere,
- 2) bazis.

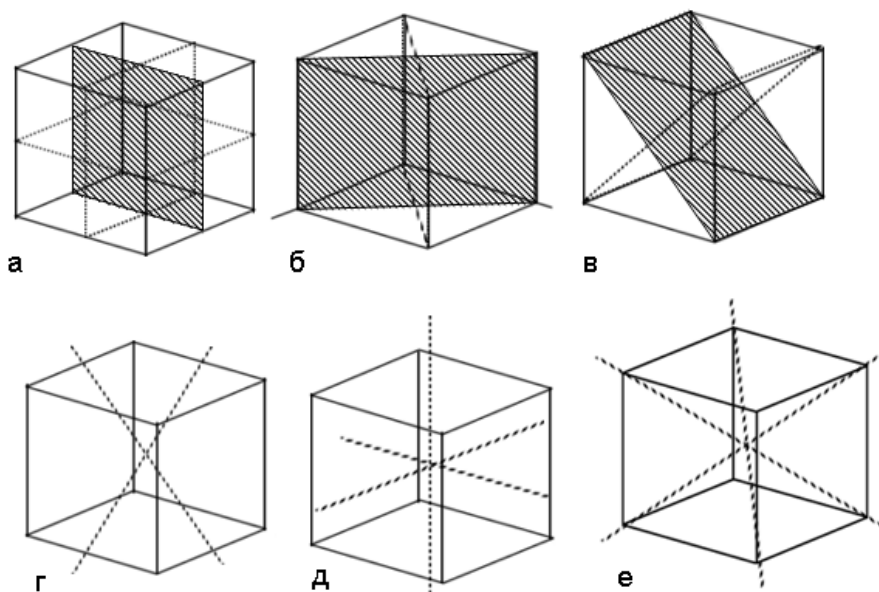
Ken'isliklik pa'njereni a'dette $\vec{a}$, $\vec{b}$, $\vec{c}$ vektorlari' ja'rdeminde xarakterleydi. Buni'n' ushi'n usi' vektorlardi'n' uzi'nli'g'i' a, b, c shamalari'n ha'm olar arasi'ndag'i' mu'yeshler α, β, γ lardi' beriw kerek. a, b, c shamalari'n kristalli'q pa'njerenin' da'wirleri dep ataydi'. Bul parametrlar zatlardi'n' quri'li'si' (strukturasi') boyi'nsha spravoshniklerde beriledi.

Bazisti $\vec{r}_i = x_i\vec{a} + y_i\vec{b} + z_i\vec{c}$ radius-vektorlari'ni'n' ja'rdeminde bir quti'shada beriw arqali' ani'qlaw qabi'l etilgen. x_i, y_i, z_i sanlari' atomlardi'n' qaysi' ori'nlarda jaylasqanli'g'i'n $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ vektorlari' u'leslerine sa'ykes beredi.

Bazistegi atomlar sani'n quti'shani'n' qaptal betleri menen kesilgen ken'isliktegi atomlardi'n' sani'n esaplaw menen a'melge asi'ri'ladi'. Elementar quti'shani'n' ishindeg'i atomlar sani'na kaptal betler ta'repinen kesilgen yari'm, to'rtten bir, segizden bir atomlardi'n' sanlari' qosi'ladi'. 1.1 (b) su'wrette keltirilgen quti'shada to'belerde jaylasqan mu'yeshlik segizden birlik 8 atom jaylasqan. usi'g'an baylani'sli' bunday bazis koordinatalari' 000 bolg'an 1 atomnan turadi' dep esaplaydi'. Kristallografiya atomlardi'n' koordinatalari'n a'dettegi () tu'rindagi qawsi'rmag'a almaydi'. Sebebi bunday qawsi'rma ja'rdeminde kristallografiya tegislikler belgilenedi. KOK pa'njerede (1.1 (a) su'wretke qaran'i'z) quti'shani'n' ishinde 1 atom ha'm quti'shani'n' to'belerinde segizden birlik 8 atom bar: bir atom 0,0,0 awhali'n, al ekinshi atom $\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}$ awhali'n iyeleydi.

Kristalli'q pa'njerelerdin' simmetriyasi'. Ko'pshilik zatlardi'n' kristalli'q pa'njereleri bir neshe simmetriya elementlerine iye boladi'. Simmetriya elementleri menen simmetriya operaciylar baylani'sqan. Simmetriya operaciylar ori'nlang'anda ken'isliklik pa'njere o'zinin' da'slepki awhali'na qayti'p keledi. $2\pi/2, 2\pi/3, 2\pi/4, 2\pi/6$ mu'yeshlerine buratug'i'n ko'sherler (bunday ko'sherlerdi ekinshi, u'shinshi, to'rtinshi ha'm

alti'nshi' ta'rtpi simmetriya ko'sherleri dep ataydi') simmetriya elementleri boli'p tabi'ladi'. 1.1 (a) ha'm 1.2-su'wretlerde keltirilgen pa'njereler ko'p simmetriya ko'sherlerine iye (mi'sali' to'rtinshi, u'shinshi, ekinshi ta'rtpi simmetriya ko'sherleri). Basqa tu'rdegi simmetriya elementleri qatari'na simmetriya tegisligin (bunday tegislikni aynali'q shashi'rati'w tegisligi dep te ataydi') ha'm simmetriya orayi'n (bunday noqatti' inversiya orayi' dep te ataydi') kirgiziwge boladi'.



1.2-su'wret.

Kubti'n' bazi' bir simmetriya elementleri: a) kubti'n' qabi'rg'alari'na perpendikulyar bolg'an u'sh dana simmetriya tegisligi; b, v) kubti'n' qaptallari'ni'n' diagonallari'na perpendikulyar bolg'an 4 simmetriya tegisligi (bunday tegisliklerdin' sani' 6), g) kubti'n' qaptal diagonallari'na parallel bolg'an 2-ta'rtpi alti' simmetriya ko'sherinin' ekewi (bul ko'sherler qarama qarsi' qabi'rg'alardi'n' ortalari' arqali' o'tedi), d) kubti'n' qaptal betlerine perpendikulyar ha'm olardi'n' oraylari' arqali' o'tiwshi 4-ta'rtpi simmetriya ko'sherinin' u'shewi, e) kubti'n' diagonallari'na parallel ha'm oni'n' to'beleri arqali' o'tiwshi to'rt dana 3-ta'rtpi simmetriya ko'sheri.

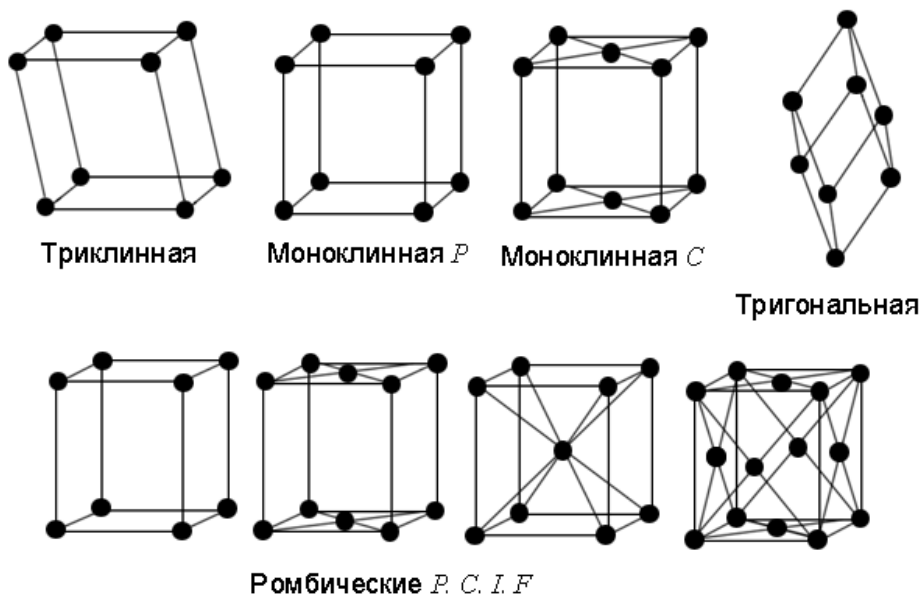
1.2-su'wrettegi kubli'q pa'njere qaptal betlerine parallel bolg'an u'sh simmetriya tegisligine, qaptal betlerdin' diagonallari'na perpendikulyar bolg'an alti' dana diagonalli'q simmetriya tegisligine, u'sh to'rtinshi ta'rtpi simmetriya ko'sherine, alti' dana ekinshi ta'rtpi simmetriya ko'sherine, to'rt dana u'shinshi ta'rtpi simmetriya ko'sherine ha'm kubti'n' orayi'nda jaylasqan simmetriya orayi'na iye. Kristalli'q pa'njerenin' simmetriya operaciyalari'ni'n' mu'mkin bolg'an ji'ynag'i'n ta'ripleytug'i'n matematikali'q toparlar teoriyasi' (teoriya grupp) bar.

Kristalli'q pa'njerelerdin' tipleri. Toparlar teoriyasi' ja'rdeminde kristallardi'n' barli'g'i'n 14 dana kristalli'q pa'njerenin' ja'rdeminde ta'riplewdin' mu'mkin ekenligin ko'rsetti. Bunday pa'njerelerdi Brave pa'njereleri dep ataymi'z ha'm olardi'n' su'wretleri 1.3-su'wrette keltirilgen. Olardi' elementar quti'shalari'ni'n' tu'ri boyi'nsha ayri'latug'i'n jeti sistemag'a bo'liw qabi'l etilgen:

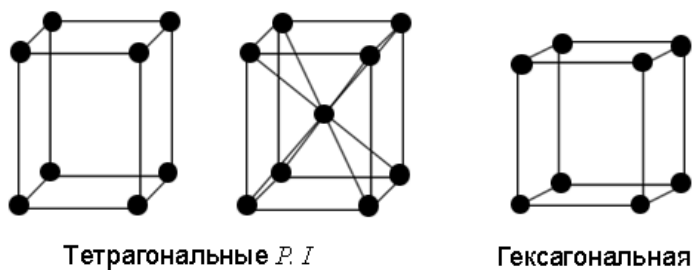
triklinlik,
monoklinlik,
rombali'q,
tetragonalli'q,

trigonalli'q,
geksagonalli'q,
kubli'q.

Ha'r bir sistema a, b, c ha'm α, β, γ shamalari' arasi'ndag'i' belgili bir qatnas penen ayri'ladi' (1-kestede keltirilgen). Bul pa'njerelerdin' ayi'ri'mlari' ha'r qanday tu'rge iye: primitivlik (a'piwayi') -P, ko'lemde oraylasqan (KO) - I, qaptalda oraylasqan (QO) – F ha'm bir birine qarama-qarsi' bolg'an bir kaptali' oraylasqan – S.



1.3a su'wret.
Brave pa'njereleri.



1.3b su'wret.
Brave pa'njereleri.

1. Triklinlik sistemada barli'q mu'yeshler de, barli'q ta'replerdin' uzi'nli'qlari' da bir birine ten' emes. Bunday pa'njere elementar quti'shani'n' orayi'nda simmetriya orayi'na iye boli'wi' mu'mkin.

2. Monoklinlik sistemada quti'sha ha'r qi'yli' uzi'nli'qtag'i' qabi'rg'alarg'a iye tuwri' prizma tu'rinde boladi'. Quti'sha tuwri' prizmani'n' ultanlari'nda oraylasqan boli'wi' mu'mkin. Sonli'qtan monoklinlik S pa'njere menen P pa'njere bar. Usi'nday pa'njerege simmetriya elementleri qosi'ladi': tuwri' prizmani'n' ultani'na parallel simmetriya tegisligi ha'm ultanni'n' orayi' arqali' o'tiwshi 2-ta'rtpi simmetriya ko'sheri.

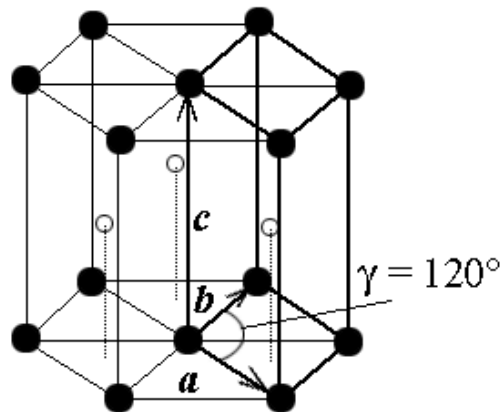
3. Rombali'q sistemada elementar quti'sha tuwri' mu'yeshli ha'm ha'r qanday uzi'nli'qtag'i' qabi'rg'alarg'a iye. Quti'sha kristalli'q pa'njerenin' barli'q 4 tu'rlerine iye: P, I, F, A (B yamasa C). Bunday pa'njerede simmetriya elementlerinin' sani' ko'p: qaptallarg'a parallel bolg'an u'sh simmetriya tegisligi, birdey bolg'an qarama-qarsi' qaptallardi'n' orayi' arqali' o'tiwshi u'sh 2-ta'rtpi simmetriya ko'sheri.

4. Tetragonalli'q sistemada quti'sha ultani' kvadrat bolg'an tuwri' mu'yeshli parallelepiped tu'rine iye. Quti'sha primitivlik (a'piwayi') P yamasa ko'lemde oraylasqan I boli'wi' mu'mkin. Rombali'q sistemag'a kiriwshi quti'sha menen sali'sti'rg'anda tetragonalli'q sistemada bir dana to'rtinshi ta'rtpi simmetriya ko'sheri ha'm basqa da bir neshe simmetriya tegislikleri bar.

5. Kubli'q sistemada quti'sha kub tu'rine iye. Quti'shani'n' qaptal betleri oraylasqan (qaptaldan oraylasqan kub yamasa QOK), quti'shani'n' orayi' oraylasqan (ko'lemde oraylasqan kub yamasa KOK) yamasa pu'tkilley oraylaspag'an boli'wi' mu'mkin (primitivlik yamasa P-pa'njere). Bul en' joqari' simmetriyag'a iye pa'njere boli'p tabi'ladi'. Oni'n' simmetriya elementlerin biz joqari'da ko'rdik (1.2-su'wret).

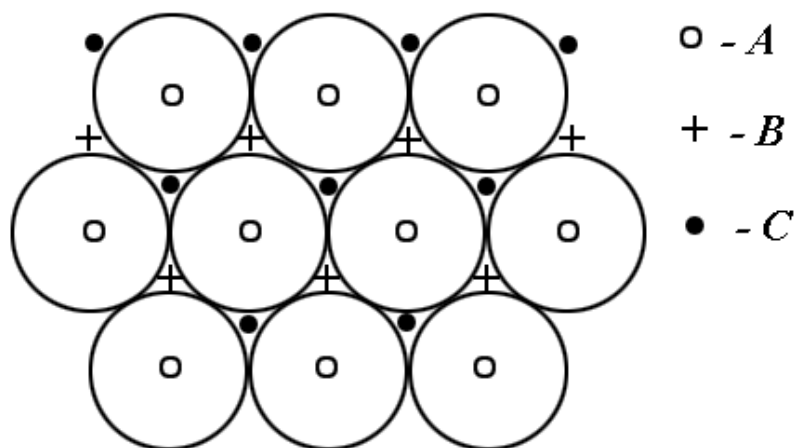
6. Geksagonalli'q sistemada quti'sha tuwri' prizma formasi'na iye. Oni'n' ultani' romb boli'p tabi'ladi' ha'm rombadag'i' mu'yesh 60 gradusqa ten'. Ko'binese elementar quti'shadan u'sh ese u'lken quti'shani' paydalanadi' (1.4-su'wrette ko'rsetilgen). Bunday quti'sha duri's alti' mu'yeshlik prizma formasi'na iye ha'm bunday prizmadag'i' alti'nshi' ta'rtpi simmetriya ko'sheri ani'q ko'rinip turadi'.

7. Trigonalli'q sistemada quti'shani' romboedr formasi'nda ko'rsetiw qabi'l etilgen. Oni'n' barli'q qabi'rg'alari'ni'n' uzi'nli'qlari' birdey. Oni'n' to'besindegi mu'yeshlerdin' ma'nisi 90 gradusqa ten' emes. KOK ha'm QOK pa'njerelede ko'lemi saylap ali'ng'an kubli'q quti'shadan 2 ha'm 4 ese kishi bolg'an trigonalli'q quti'shalardi' saylap ali'w mu'mkin (1.1-ma'selege qaran'i'z).



1.4a su'wret.

Geksagonalli'q pa'njerenin' elementar quti'shalari'.



1.4b su'wret.

Ti'g'i'z jaylasti'ri'lg'an quri'li'slardag'i' (strukturalardag'i') atomlardi'n o'z-ara jaylasi'w variantlari'.

Pa'njerelerdin' basqa barli'q tu'rleri (tiplari) $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ vektorlari'n saylap ali'w joli' menen joqari'da keltirilgen tiplerdin' birewine ali'p klinedi.

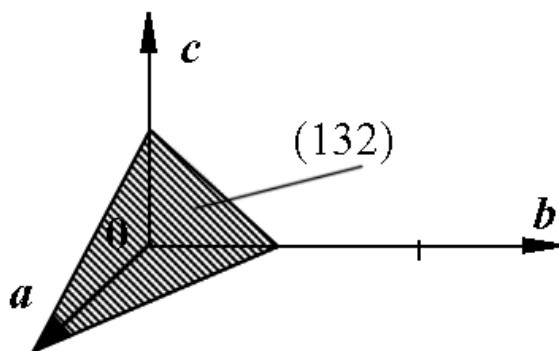
Pa'njerenin' simmetriyasi' fizikali'q qa'siyetlerdin' anizotropiyasi'n ani'qlaydi' (ha'r qi'yli' bag'i'tlar boyi'nsha fizikali'q shamalardi'n ha'r qi'yli' boli'wi'). Bazi' bir fizikali'q qa'siyetlerdin' anizotropiyasi'n elementar quti'shani'n tu'ri boyi'nsha boljawg'a boladi'. Mi'sali' sali'sti'rmali' az sandag'i' simmetriya elementlerine iye romballi'q, monoklinlik ha'm triklinlik pa'njereler ushi'n ko'p xarakteristikalaridin' anizotropiyasi' belgili (mi'sali' sali'sti'rmali' elektr sin'irgishlik, ji'lli'li'q o'tkizgishlik koefficienti ha'm basqalar). Zatlardi'n bunday xarakteristikalaridin' a'dette ekinshi ta'rtpi tenzorlardi'n ja'rdeminde ta'ripleydi. Simmetriyalik kubli'q pa'njerede bul shamalar skalyar shamalg'a aylanadi'. Tetragonalli'q ha'm geksagonalli'q pa'njere jag'daylari'nda kristaldi'n qa'siyetleri s ko'sherine perpendikulyar bolg'an qabi'rg'ag'a perpendikulyar bolg'an tegisliklerde birdey boladi'.

Vigner-Zeyc quti'shasi'. Vigner-Zeyc quti'shasi' dep atalatug'i'n elementar quti'shani' saylap ali'w di'n usi'li' bar. Bul quti'shani' kelesi lekciyalarda kristaldag'i' bo'lekshelerdin' qozg'ali'slari'n tallaw ushi'n qollanami'z. Quti'shani' saylap ali'w ushi'n kristalli'q pa'njerenin' berilgen tu'yinine «en' jaqi'n jaylasqan» ken'isliktin' oblasti'n ayi'ri'p aladi'. Buni'n' ushi'n saylap ali'ng'an tu'yindi qon'i'si'las tu'yin menen tutasti'radi' ha'm ali'ng'an si'zi'qti'n' da'l ortasi'nan usi' si'zi'qqa perpendikulyar tegislik ju'rgizedi. Bul tegislik ken'islikti eki ken'islikke bo'ledi. Berilgen tu'yinge iye ken'islikti ayi'ri'p aladi'. Barli'q ayi'ri'p ali'ng'an yari'm ken'isliklerdin' kesilmeleri Vigner-Zeyc quti'shasi'n beredi. A'piwayi' kubli'q, tetragonalli'q ha'm romballi'q pa'njereler ushi'n Vigner-Zeyc quti'shasi'ni'n' formasi' ha'm o'lshemleri boyi'nsha orayi' pa'njerenin' tu'yinine sa'ykes keliwshi elementar quti'shag'a sa'ykes keledi. KOK ha'm QOK pa'njerelerinde Vigner-Zeyc quti'shasi' quramali'raq formag'a iye.

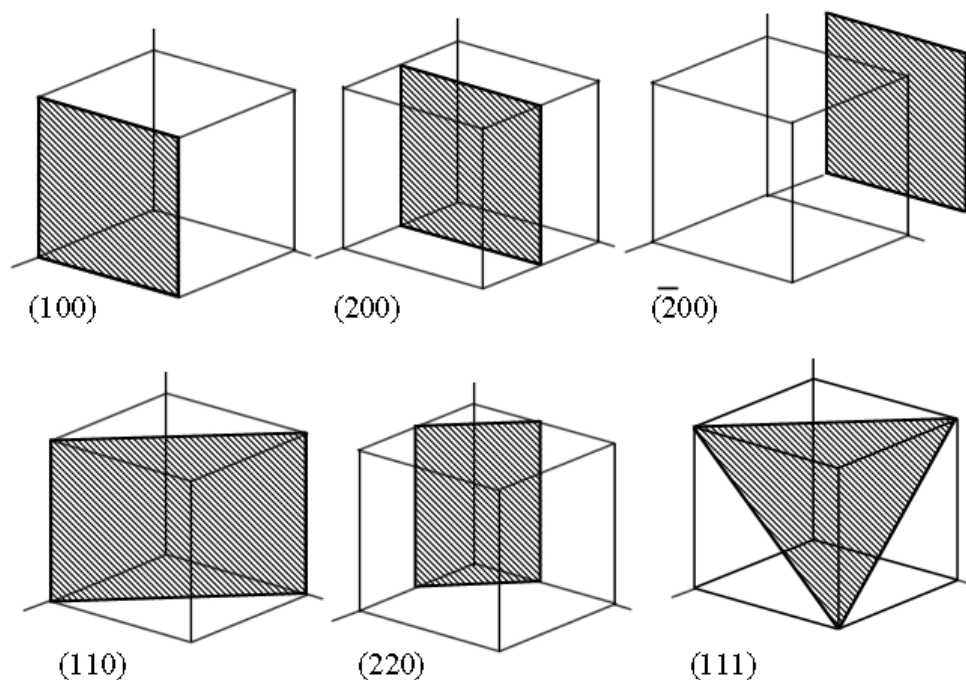
Kristalli'q pa'njeredegi bag'i't. Kristalli'q pa'njeredegi bag'i'tti' $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ bazislik vektori'ndag'i' bag'i'tlawshi' vektordin' koordinatalari' menen beredi. Bul koordinatalardi' a'dette kvadrat qawsi'rmalarg'a ali'p jazadi'. Koordinatani'n ma'nisi teris bolg'andag'i' minus belgisin sanni'n' u'stine minus belgisin qoyi'w menen a'melge asi'radi'. En' a'hmiyetli'rek bolg'an bag'i'tlar pu'tin sanlar menen beriledi. 1.2-su'wrettegi [100] bag'i'ti' kubti'n qabi'rg'asi'na parallel. $[\bar{1}00]$ ha'm [110] bag'i'tlari' oni'n' to'mengi ultani'na parallel. Bazi' bir bag'i'tlar pa'njerenin' simmetriyalig'i'na baylani'sli' birdey (mi'sali' kubli'q pa'njerede [110], $[101]$, $[011]$ ha'm $[\bar{1}10]$ bag'i'tlari'). Bag'i'tlardi'n usi'nday semeystvosi'n ta'riplew ushi'n $\langle 110 \rangle$ belgilewi qabi'l etilgen.

Kristallografiyalik tegisliklar. Kristalda kristallik pa'njerenin' tu'yinlari arqali' o'tetug'i'n kristallografiyalik tegisliklar u'lken a'hmietke iye boladi'. Kristallik pa'njerenin' tu'yinlarinin' en' ko'pshiligi jaylasqan kristallografiyalik tegisliklar kristallardi'n' qaptallari'n boljag'anda da, usi' tegisliklar boyi'nsha bo'lekshelerdin' qozg'ali'slari'n qarag'anda da ju'da' u'lken a'hmietke iye.

Kristallografiyalik tegisliklar Miller indeksleri menen belgilew qabi'l etilgen. Bunday indeksler u'sh sannan ibarat ha'm a'piwayi' qawsi'rmag'a ali'p jazi'ladi': (hkl) . Keri indeksin' teris belgisin joqari'si'na jazadi'. Bunday indeksler a'piwayi' geometriyalik mag'anag'a iye. Eger $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ vektorlari' ja'rdeminde berilgen u'sh koordinatalik ko'sheri boyi'na sa'ykes $\frac{a}{h}, \frac{b}{k}, \frac{c}{l}$ shamasindag'i' kesindilerdi ju'rgizse (1.5-su'wretti qaran'i'z), onda ali'natug'i'n u'sh noqat usi' noqatlar arqali' o'tetug'i'n (hkl) tegisliklari bir ma'nisli ani'qlaydi'. 1.6-su'wrette $(100), (200), (\bar{1}10), (110), (111)$ tegisliklari ko'rsetilgen. 1.5-su'wrettegi tegislikke parallel etip kristallik pa'njere tu'yinlari arqali' o'tiwshi ha'm bir birinen $na/h, nb/k, nc/l$ qashiqli'g'i'nda turg'an (n arqali' pu'tin san belgilengen) ko'p sandag'i' tegisliklari saylap ali'w mu'mkin ekenligin an'g'ari'wg'a boladi'. Sonday tegisliklar arasindag'i' qashiqli'qti' d_{hkl} arqali' belgileydi ha'm (hkl) tegisliklar semeystvosi' ushi'n tegisliklar arasindag'i' qashiqli'q dep ataydi'. d_{hkl} shamasin' (000) noqati'nan og'an en' jaqi'n bolg'an (hkl) tegisligine shekemgi arali'q tu'rinde esaplaw qolayli'. (1.5-su'wrette ko'rsetilgen). Kublik quti'shadag'i' iye kristallarda Miller indekslarinin' ma'nislari usi' tegisliklarga tu'sirilgen normaldin' bag'i'tindag'i' vektordin' indekslariga sa'ykes keledi. Biraq basqa tu'rdegi elementar quti'shalar jag'dayi'nda bunday sa'ykeslik ori'n almaydi'.



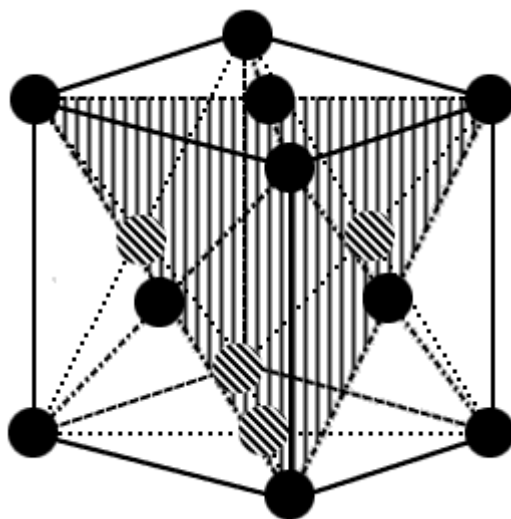
1.5-su'wret.
Kristaldag'i' Miller
indeksinin' geometriyalik ma'nisi.



1.6-su'wret. Kubli'q pa'njerenin' bazi' bir kristallografiyalik tegisliklari.

Jiyi ushi'rasatug'i'n strukturalar menen tani'sami'z.

Qaptalda oraylasqan kubli'q pa'njere 1.7-su'wrette keltirilgen elementar quti'shag'a iye boladi'. Tu'yinler kubti'n' to'belarinde ha'm qaptallari'ni'n' oraylari'nda jaylasqan. Quti'shadag'i' tu'yinlerdin' sani' 4 ke ten' (8 dana segizden birge ha'm 6 dana yari'mg'a iye). Ha'r bir atomni'n' $a/\sqrt{2}$ qashi'qli'g'i'nda 12 qon'i'si'g'a iye bolatug'i'nli'g'i' ko'rinip tur. Ko'p metallar tap usi'nday pa'njerege iye (temir, kobalt, mi's ha'm basqalar) ha'm olardi'n' atomlari' pa'njerenin' tu'yinlarida jaylasqan.



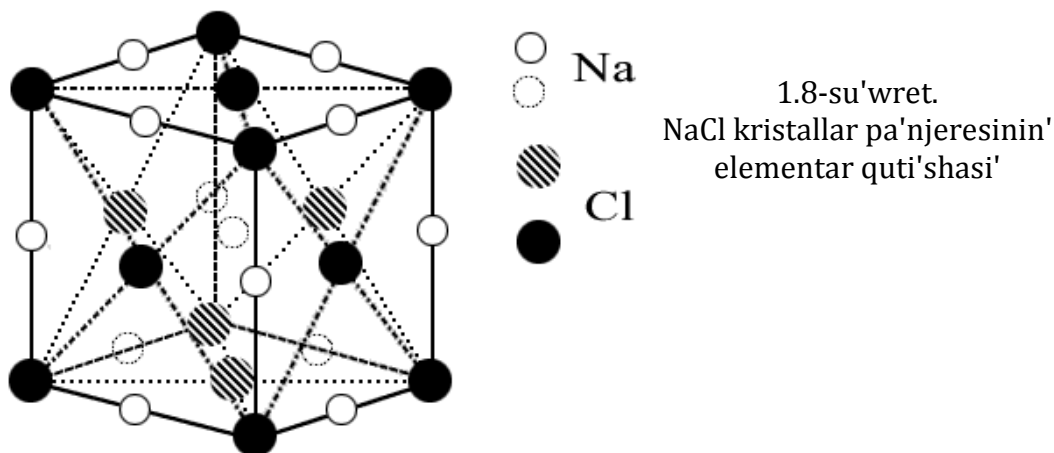
1.7-su'wret.
QOK pa'njerenin'
elementar quti'shasi'.

NaCl tipidagi quri'li'sti' (1.8-su'wret) QOK pa'njere tu'rinde ko'rsetiw mu'mkin. Bunday pa'njerede natriy ionlari' tu'yinlarga sa'ykes keledi, al xlor ionlari' bolsa Na ionlari'na sali'sti'rg'anda kubti'n' ko'lemlik diagonal' boyi'nsha $a/2$ shamasina ji'li'sqan. Bul jag'dayda Bravenin' QOK pa'njeresinin' bazisin eki atom (eki ion) quraydi': koordinatalari' 0,0,0 bolg'an natriy ha'm koordinatalari' $\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}$. Biraq ko'pshilik jag'daydarda elementar quti'sha retinde 8 atomnan ibarat kub qabi'l etiledi. Olardi'n' to'rtiwi natriy ha'm to'rtewi xlor. Olar to'mendegidey koordinatalarg'a iye:

Na: 0 0 0; $\frac{1}{2} \frac{1}{2} 0$; $\frac{1}{2} 0 \frac{1}{2}$; 0 $\frac{1}{2} \frac{1}{2}$;

Cl: $0\ 0\ \frac{1}{2}$; $0\ \frac{1}{2}\ 0$; $\frac{1}{2}\ 0\ 0$; $\frac{1}{2}\ \frac{1}{2}\ \frac{1}{2}$.

Tap usi'nday quri'li'sqa (strukturag'a) ko'p kristallar iye (KCl, KBr, PbS, MgO ha'm basqalar). Olar bir birinen tek a shamalari'ni'n' ma'nisi boyi'nsha g'ana pari'qlanadi'.



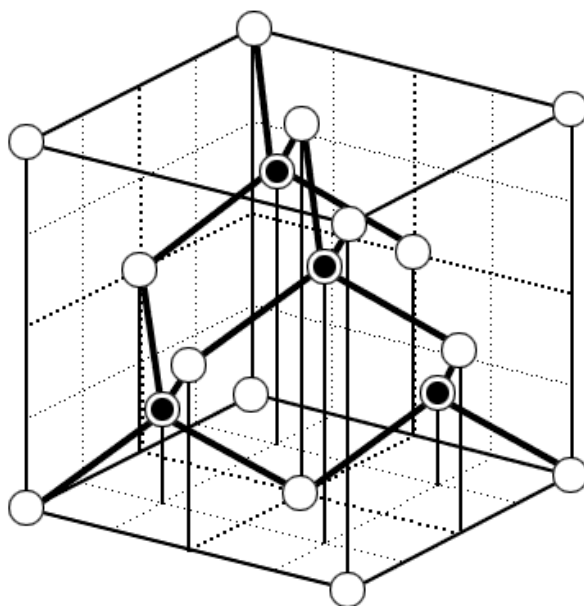
Almazdi'n' strukturasi' (1.9-su'wret) QOK pa'njere si'pati'nda ko'rsetiwge boladi'. Bul jag'dayda pa'njereni atomlari' tu'yinlerde ha'm ko'lemlik diagonal boyi'nsha olarg'a sali'sti'rg'anda ken'isliklik diagonaladi'n' $\frac{1}{4}$ bo'legine ji'li'sti'ri'lg'an eki pa'njerenin' qosi'ndi'si' tu'rinde ko'z aldi'g'a elesletemiz. Bunday QOK pa'njerenin' bazisin eki atom quraydi'. Olardi'n' koordinatalari' $0,0,0$ ha'm $\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}$. Ko'pshilik jag'daydarda almazdi'n' elementar quti'shasi' retinde bazisi 8 atomg'a iye kubti' qabi'l etedi. Olardi'n' koordinatalari' to'mendegilerden ibarat:

Awi'spag'an QOK pa'njerenin' to'rt atomi' ushi'n:

$0\ 0\ 0$; $0\ \frac{1}{2}\ \frac{1}{2}$; $\frac{1}{2}\ 0\ \frac{1}{2}$; $\frac{1}{2}\ \frac{1}{2}\ 0$

Awi'sqan QOK pa'njerenin' to'rt atomi' ushi'n:

$\frac{1}{4}\ \frac{1}{4}\ \frac{1}{4}$; $\frac{1}{4}\ \frac{3}{4}\ \frac{3}{4}$; $\frac{3}{4}\ \frac{1}{4}\ \frac{3}{4}$; $\frac{3}{4}\ \frac{3}{4}\ \frac{1}{4}$.



Ha'r bir uglerod atomi'ni'n' ken'isliklik diametrdin' $\frac{1}{4}$ shamasi'na ten'dey qashi'qli'qta jaylasqan to'rt en' jaqi'n atom menen qon'si'las ekenligin ko'rsetiwge boladi'. Basqa so'z benen aytqanda ha'r bir uglerod atomi' tetraedr'din' orayi'nda jaylasqan boli'p, sol tetraedr'din' to'belerinde de uglerod atomlari' ornasqan. Ha'r bir atom o'z qon'i'si'lari'

menen kovalentli baylansqan ha'm bir biri menen ten'dey mu'yeshlerdi payda etedi (kelesi bo'limdi qaran'i'z). Uglerodtan basqa tap usi'nday quri'li'sqa to'rt valentli yari'm o'tkizgishler kremniy menen germaniy iye.

Cink sulfidi tipidegi quri'li'sti' ali'w ushi'n joqari'da keltirilgen almazdi'n' quri'li'si'nan paydalani'w kerek. Bul jerde cink atomlari'n «awi'spag'an pa'njerege», al ku'kirt atomlari'n «awi'sqan pa'njerege» ornalasti'ri'w kerek boladi'. Bunday quri'li'sta bir sorttag'i' atomni'n' ha'r biri tetraedrlerdin' to'belerinde jaylasqan ekinshi sorttag'i' to'rt qon'i'si'g'a iye. Olar bir biri menen kovalentli baylani'sqa iye. Bul baylani's bir biri menen ten'dey mu'yeshlerdi payda etedi.

Geksagonalli'q struktura (quri'li's) 1.4-su'wrette keltirilgen. U'sh elementar quti'shani'n' su'wretin paydalang'an qolayli'. Bunday jag'dayda quri'li's qatlamlardan turatug'i'n ha'rrenin' uyasi'n ko'z aldi'na elesletedi. Ko'plegen zatlar tap usi'nday quri'li'sqa iye. Bunday jag'dayda atomlar topari' ken'islikte duri's alti' mu'yeshliklerdi payda etedi. Bunday quri'li'sti'n' ha'r qi'yli' tu'rleri jiyi ushi'rasadi'. Bunday quri'li'sti' a'dette ti'g'i'z jaylasti'ri'lg'an geksagonalli'q (TJG) quri'li's dep ataydi' ha'm oni' qatlamlar menen sa'wlelendiriw mu'mkin (1.4 b su'wret): birinshi qatlam (A) – to'mendegi tegisliktin' tu'yinlerinde jaylasqan atomlar – sharlar. Ekinshi qatlamni'n' atomlari' (V) to'mengi qatlamdag'i' atomlardi'n' arasi'ndag'i' «oyi'qlarda» to'mengi qatlamni'n' atomlari' menen tiyisip jaylasqan. Al u'shinshi qatlamdag'i' atomlar bolsa 1.4-su'wrette ko'rsetilgendey birinshi qatlamdag'i' atomlardi'n' da'l u'stinde yamasa ekinshi qatlamdag'i' atomlar arasi'ndag'i' «oyi'qlarda» jaylasadi'. Na'tiyjede $\vec{c}$ vektori'ni'n' bag'i'ti'nda c da'wirine iye qatlamlardi'n' jaylasi'wlari'ni'n' da'wirliqi payda boladi'. Bunday da'wirli quri'li'sti' bi'layi'nsha jazami'z: $ABABAB \dots$ Usi'ni'n' saldari'nan sharlardi'n' ti'g'i'z jaylasti'ri'lg'an quri'li'si' payda boli'p, bunda ha'r bir shar 12 jaqi'n jaylasqan qon'i'si'g'a iye boladi'. Qon'i'si'lar arasi'ndag'i' qashi'qli'q sharlardi'n' eki radiusi'na ten'. Bunday quri'li'sta $\frac{c}{a}$ qatnasi'ni'n' $\frac{c}{a} = (8/3)^{1/2} = 1,633$ shamasin' ten' ekenligine an'sat ko'z jetkeriwge boladi'. Ko'p metallar tap usi'nday quri'li'sqa iye (tek g'ana $\frac{c}{a}$ qatnasi'ni'n' ma'nisi sa'l basqashalaw). Mi'sali' kobaltta $\frac{c}{a} = 1,622$, Magniyde $\frac{c}{a} = 1,623$, al titanda $\frac{c}{a} = 1,586$.

Sharlardi' jaylasti'ri'wdi'n' ja'ne bir usi'li'ni'n' bar ekenligin an'g'ari'wi'mi'z kerek: da'slepki eki qatlam joqari'dag'i'day boli'p jaylasti'ri'ladi', al u'shinshi qatlamdag'i' (bul qatlamdi' S arqali' belgileymiz) atomlar 1.4-su'wrette atanaqlar menen belgilengen ori'nda jaylasadi'. To'rtinshi qatlam birinshi qatlamni'n' u'stinde, besinshi qatlam ekinshi qatlamni'n' u'stinde, qalg'anlari' tap sonday ta'rtipte jaylasti'ri'ladi'. Bunday jag'dayda $\vec{c}$ vektori'ni'n' bag'i'ti'nda $3c/2$ da'wirine iye qatlamlardi'n' $ABCABCABC \dots$ izbe-izligindegi jaylasti'ri'wlari' ju'zege keledi. Bunday jag'dayda da jaqi'n qon'si' atomlardi'n' sani' 12 ge ten' boladi'. Bunday quri'li'sti'n' kaptaldan oraylasqan kubli'q (QOK) quri'li'sqa sa'ykes keletug'i'nli'g'i'n ko'rsetiwge boladi' (1.7-su'wret). Bunday kubli'q quri'li'sta [111] bag'i'ti' $\vec{c}$ vektori' menen bag'i'tlas (1.4-su'wret).

Joqari'da bayan etilgen ti'g'i'z jaylasti'ri'lg'an geksagonalli'q ha'm qaptalda oraylasqan kubli'q quri'li'slardi'n' bir birine ju'da' uqsas ekenligin an'sat an'g'ari'w mu'mkin. Olar bir birinen tek ti'g'i'z jaylasti'ri'lg'an atomlardi'n' izbe-izligi menen pari'qlanadi'. Sonli'qtan olardi'n' payda boli'w energiyasi' derlik birdey boli'wi' kerek ha'm ko'plegen metallar sharayatlar azmaz o'zgergende TJG ha'm QOK pa'njerelerge iye bola aladi'. Mi'sali' neodim, ZnS, ZnSe kristallari' to'mengi temperaturalarda QOK pa'njerege, al joqari' temperaturalarda TJG pa'njerege iye.

Geypara metallar menen quymalar joqari'da keltirilgen atomlar qatlamlari'ni'n' izbe-izligindegi defektlerge iye boladi' (1.4-su'wretti qaran'i'z). Bunday jag'dayda qatlamlardi'n' izbe-izligi buzi'ladi'. Na'tiyjede TJG ha'm QOK pa'njereler haqqi'nda keskin tu'rde ani'q ayti'w mu'mkinshiligi bolmay qaladi'.

Ko'plegen zatlar ha'r qi'yli' sharayatlarda (mi'sali' temperatura, basi'm) ha'r qi'yli' kristalli'q pa'njerelerga iye boladi'. Mi'sali' temir o'jire temperaturalari'nda ko'lemde oraylasqan kubli'q (KOK), 910-1400 °S temperaturalari'nda QOK, al onnan da joqari' temperaturalarda qaytadan KOK quri'li'sqa iye. Zatti'n' bir bo'leginde eki tu'rli pa'njerenin' bir waqi'tta boli'wi' mu'mkin: olardi'n' biri ten' salmaqli'q, al ekinshisi metastabilli (metaorni'qli') boli'p, metaorni'qli' pa'njere ten' salmaqli'q pa'njerege o'tip u'lgermegen halda saqlani'p qaladi'. Bunday situaciya shi'ni'qti'ri'wdan (birden salqi'nlati'wdan) keyingi polatlarda (Fe-C quymalari'nda) ori'n aladi'. Shi'ni'qti'ri'wdi'n' aqi'betinde QOK ha'm KOK pa'njerelerga iye oblastlardi'n' quramali' sistemasi' payda boladi'. Ha'r qi'yli' pa'njerelerga iye oblastlardi'n' formalari' menen jaylasi'wlari' materialdi'n' ko'plegen qa'siyetlerin ani'qlaydi'.

1-ma'sele: KOK (ko'lemde oraylasqan kubli'q) pa'njerenin' primitivli elementar quti'shasi' retinde $\vec{a} = (\frac{1}{2}; -\frac{1}{2}; \frac{1}{2})$; $\vec{b} = (-\frac{1}{2}; \frac{1}{2}; \frac{1}{2})$; $\vec{c} = (\frac{1}{2}; \frac{1}{2}; -\frac{1}{2})$ vektorlari'nda quri'lg'an trigonalli'q quti'shani' saylap ali'wdi'n' mu'mkin ekenligin ko'rsetin'iz. Buni'n' ushi'n oni'n' qabi'rg'alari'ni'n' uzi'nli'qlari' ha'm qabi'rg'alar arasi'ndag'i' mu'yeshlerdi esaplan'i'z. Bul primitivlik quti'shani'n' ko'leminin' sa'ykes KOK pa'njere quti'shasi'ni'n' ko'leminin' yari'mi'na ten' ekenligin ko'rsetin'iz.

Sheshimi: Koordinatalar ko'sherlerinin' bag'i'tlari'n kubti'n' qabi'rg'alari'ni'n' bag'i'ti'nda alami'z ha'm ko'sherler boyi'nsha uzi'nli'q retinde kubti'n' qabi'rg'asi'ni'n' uzi'nli'g'i' a_c shamasi'n alami'z.

Bunday koordinatalar sistemasi'nda vektordi'n' uzi'nli'g'i'n

$$|a| = a_c \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = a_c \sqrt{3/4}$$

formulasi'ni'n' ja'rdeminde esaplaymi'z. $\vec{a}$ ha'm $\vec{b}$ vektorlari' arasi'ndag'i' φ mu'yeshinin' kosinusi'n

$$\cos(\varphi) = (\vec{b} \cdot \vec{a}) / (|a| \cdot |b|) = (-1/4) / (3/4) = -1/3; \quad \varphi \approx 110^\circ$$

formulasi'ni'n' ja'rdeminde tabami'z. Saylap ali'ng'an elementar quti'shani'n' ko'lemin to'mendegi ani'qlawshi'ni'n' ja'rdeminde esaplaymi'z:

$$V_{a\&c} = a^3 \begin{vmatrix} 1/2 & -1/2 & 1/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \\ 1/2 & 1/2 & -1/2 \end{vmatrix} = a^3 1/2$$

Quti'shani'n' ko'lemi eki atomg'a iye KOK pa'njerenin' elementar quti'shasi'ni'n' ko'leminin' yari'mi'na ten'. Saylap ali'ng'an quti'shani' primitivli dep atawg'a boladi'.

Analitikali'q geometriyani'n' a'piwayi' formulalari'n esaplawlar ju'rgizilip ati'rg'an koordinatalar sistemasi' tuwri' mu'yeshli bolg'anda, al oni'n' ortlari' birdey uzi'nli'qqa iye bolg'anda g'ana paydalani'w mu'mkin. Ma'seleni sheshiwde biz paydalang'an koordinatalar sistemasi' tap usi'nday sistema boli'p tabi'ladi'.

Tap sonday jollar menen ko'lemi $\vec{a} = (\frac{1}{2}; \frac{1}{2}; 0)$; $\vec{b} = (0; \frac{1}{2}; \frac{1}{2})$; $\vec{c} = (\frac{1}{2}; 0; \frac{1}{2})$ vektorlari'nda quri'lg'an kubli'q quti'shani'n' ko'leminen 4 ese kishi bolg'an trigonalli'q quti'shani' quri'w mu'mkin (8-su'wretti qaran'i'z).

2-ma'sele. Almazdi'n' kristalli'q pa'njeresinde (9-su'wret) koordinatalari' $\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}$ bolg'an ha'r bir atomni'n' (qa'legen atomni'n' ekenligin de ko'rsetiwge boladi') to'rt jaqi'n jaylasqan qon'i'si' atom menen qorshalg'anli'g'i'n ha'm sol atomlar menen bolg'an kovalentlik baylani'slardi'n' birdey mu'yeshlerdi payda etetug'i'nli'g'i'n ko'rsetin'iz.

Sheshimi. Saylap ali'ng'an koordinatalari' $\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}$ bolg'an atomni'n' qon'i'si'lari'ni'n' koordinatalari'ni'n' $0\ 0\ 0; \frac{1}{2}\ \frac{1}{2}\ 0; 0\ \frac{1}{2}\ \frac{1}{2}; \frac{1}{2}\ 0\ \frac{1}{2}$ ekenligin ko'rsetiwge boladi' (eger $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ vektorlari'n uzi'nli'g'i' a shamasina ten' kubti'n' qabi'rg'alari' boyi'nsha alsaq). Saylap ali'ng'an atomnan usi' atomlarga shekemgi qashi'qli'q analitikali'q geometriyani'n'

$$\rho = a \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

formulasi'ni'n' ja'rdeminde esaplanadi' ha'm barli'q jaqi'n jaylasqan qon'i'si'lar ushi'n $a \frac{\sqrt{3}}{4}$ shamasina ten' boli'p shi'g'adi'.

Kovalentlik baylani'slar arasi'ndag'i' mu'yesh φ di tabi'w ushi'n da'slep basi' saylap ali'ng'an atomni'n' orayi'nda jaylasqan, al ushi' indeksi i bolg'an jaqi'n qon'i'si'larda bolg'an $\vec{b}_i$ vektori'ni'n' koordinatalari'n tabami'z. Bunnan keyin $\text{Cos}[\varphi]$ shamasin

$$\text{Cos}[\varphi] = (\vec{b}_i \cdot \vec{b}_j) / (|\vec{b}_i| \cdot |\vec{b}_j|)$$

formulasi'ni'n' ja'rdeminde tabami'z.

1.2. Kristallardi'n' payda boli'wi'ni'n' (o'siwinin') fizikali'q mexanizmlari

Ha'zirgi waqi'tlari' millionlag'an kristalli'q zatlar belgili. Olardi'n' ishine sali'sti'rmali' a'piwayi' metallar ha'm olardi'n' quymalari', ju'da' quramali' quri'li'slarg'a iye kristallar da kiredi. Sol kristallardi'n' o'zine ta'n qa'siyetleri ko'p sanli' atomlardi'n' ayri'qsha tu'rde jaylasi'wlari' menen baylani'sli'. biraq usi' jag'daylarga qaramastan bul kristallardi'n' barli'g'i' da ko'p sanli' emes, biraq bir birine sali'sti'rg'anda ha'r qi'yli' boli'p jaylasqan atomlardan turadi'. Atomlar arasi'ndag'i' elektromagnitlik ta'sirlesiwler atomlardi'n' bir biri menen baylani'si'wi'n ha'm kristalli'q pa'njerelerdin' ha'r qi'yli' tiplerinin' payda boli'wi'n ta'miyinleydi. Bul processte zaryadlardi'n' ta'sirlesiwini'n' elektrostatikali'q energiyasi' tiykarg'i' ori'ndi' iyeleydi. Ayi'ri'm jag'daylarda magnitlik ta'sirlesiwidin' de u'lesi ko'rinedi. Biraq magnitlik ta'sirlesiwidin' u'lesi elektrostatikali'q ta'sirlesiwidin' u'lesine sali'sti'rg'anda a'dewir kishi boladi'. Joqari'da atap o'tilgen ta'sirlesiwler atomli'q elektronli'q qabi'qlar si'yaqli' belgili bir simmetriyaga iye boladi'. Sonli'qtan atomlar da bir biri menen simmetriyali' bolg'an quri'li'slardi' payda etip kristalli'q denelerdi payda etedi. Bunday simmetriyali'q quri'li'slar haqqi'nda joqari'da ga'p etildi. Tap usi'nday sebeplerge baylani'sli' xarakteristikalari' boyi'nsha bir birine jaqi'n atomlar atomlari'ni'n' jaylasi'wi' bir birine sa'ykes keletug'i'n strukturalardi' payda etedi. Kristallardi'n' du'zilisini'n' uli'wmali'q ni'zamli'qlari'n bile oti'ri'p jan'a quri'li'slardi' boljaw, qolda bar kristalli'q materiallardin' fizikali'q ha'm texnologiyali'q qa'siyetlerin jaqsi'law mu'mkin.

Ha'zirgi waqi'tlari' atomlardi'n' bir biri menen baylani'si'ni'n' xakteri boyi'nsha kristallardi' 5 tipke ayi'radi':

- 1) ionli'q kristallar,
- 2) kovalentlik kristallar,
- 3) metal kristallar,
- 4) vodorodli'q baylani'sqa iye molekulali'q kristallar,
- 5) Van-der-Vaals kristallari'.

Van-der-Vaals kristallari'nan basqalari'ni'n' barli'g'i' da ta'biyatta ha'm ha'zirgi zaman texnikasi'nda a'hmiyetli ori'nlaridi' iyeleydi.

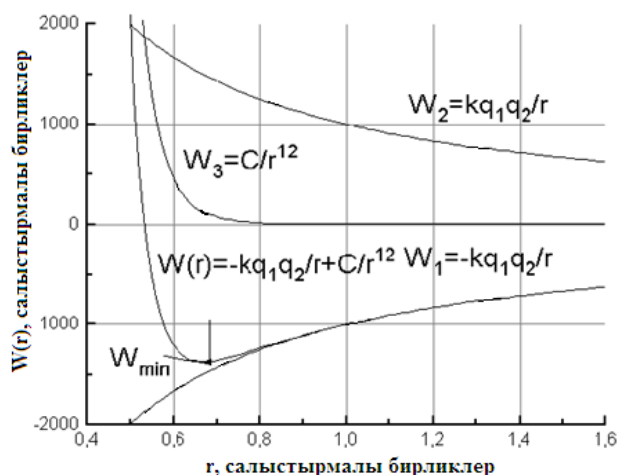
Kristallardi' joqari'dag'i'day ta'rtipte bo'liwdin' qatan' tu'rdegi qag'i'ydasi' joq. Sebebi sonday tiplerdin' arasi'ndag'i' baylani'sqa iye kristallar da az emes. Baylani'sti'n' bir bo'legi kovalentlik, al qalg'an bo'legi vodorodli'q bolg'an kristalli'q zatlar de bar. Endi kristallardi' baylani'sti'n' tipleri boyi'nsha qarap shi'g'ami'z.

Ionli'q kristallar. Ionli'q kristallar birdey beglige iye ionlardi'n' iytirisiwinin' ha'm qarama-qarsi' belgilerg'e iye zaryadlarga iye ionlardi'n' bir birine tarti'si'wi'ni'n' na'tijesinde qal'iplesedi. En' kop tarqalg'an mi'sal retinde NaCl ha'm CsCl kristallari'n' ali'p qarawg'a boladi'. Ha'r bir on' zaryadlang'an ion (mi'sali' Na, Cs) o'zinin' a'tirapi'na qarama-qarsi' zaryadqa iye bolg'an ionlardi' (Cl) ji'ynawg'a ti'ri'sadi'. Al teris zaryadlang'an ionlar bolsa o'zlerin on' zaryadqa iye ionlar menen qorshaydi'. Ionlar bir birine olardi'n' elektronli'q qabi'qlari' tiyiskenshe jaqi'nlasadi'. Bunnan keyin olar arasi'nda kvantli'q ta'biyatqa iye iytiriw ku'shleri payda boladi'. Usi'ni'n' saldari'nan 1- ha'm 8-su'wretlerde keltirilgen strukturalarday strukturalar ji'yi payda boladi'. CsCl kristallari'nda ha'r bir ion qarama-qarsi' belgidegi zaryadqa iye segiz ion menen qorshalg'an. Olar bir birine sali'sti'rg'anda simmetriyali' boli'p ortadag'i' ionni'n' orayi'nan $a\sqrt{3}/2$ qashi'qli'qta jaylasqan. Onnan armani'raq a qashi'qli'g'i'nda tap sonday zaryadqa iye 6 ion jaylasadi'. Quri'li's tap usi'nday izbe-izlikte dawam etedi. NaCl kristallari'nda ha'r bir ionni'n' $a/2$ qashi'qli'qta jaylasqan qarama-qarsi' belgidegi zaryadqa iye alti' jaqi'n jaylasqan qon'i'si'si' bar, bunnan keyin $a\sqrt{2}$ qashi'qli'qta tap sonday belgidegi zaryadqa iye 12 ion jaylasqan. Demek saylap ali'ng'an iondi' qarama qarsi' zaryadqa iye ionlardi'n' qorshap turi'w tendenciya'si' ko'rinip tur degen so'z. Ionlardi'n' usi'nday ta'qlitte jaylasi'wlari'nda elektrostatikali'q energiyadan uti'w ori'n aladi'.

Endi elektrostatikali'q energiyadan qansha uti'w ori'n alatug'i'ni'li'g'i'n esaplaymi'z. Bunnan keyin usi'nday esaplawlar na'tijeleri paydalani'p ionlardi'n' kristallardi'g'i' baylani's energiya'si'n tabami'z. Esaplawdi' bir birinen r qashi'qli'g'i'nda turg'an q_1 ha'm q_2 zaryadli' ionlar jubi' arasi'ndag'i' potentsialli'q energiyani' qaraymi'z:

$$W(r) = q_1 q_2 / (4\pi\epsilon_0 r) + C / r^{12} \quad (1.1)$$

Birinshi qosi'li'wshi' ionlar arasi'ndag'i' tarti'li's yamasa iytirilis ku'shlerin ta'ripleydi. Ekinshi qosi'li'wshi' bolsa ionlardi'n' elektronli'q qabi'qlari' bir birine tiye baslag'anda payda bolatug'i'n iytirilis ku'shlerin da'l ani'qlaydi'. S parametrin esaplaw na'tijeleri menen eksperimentalli'q na'tijelerdi bir birine sa'ykeslendiriw arqali' a'melge asi'ri'ladi'. $W(r)$ funkciya'si'ni'n' ha'm oni'n' eki qosi'li'wshi'lari'ni'n' tu'rleri 10-su'wrette keltirilgen.



1.10-su'wret.

Eki ionni'n' ta'sirlesiw energiya'si' $W(r)$ shamasi'ni'n' ionlar arasi'ndag'i' qashi'qli'q r den g'a'rezligi.

Bunnan keyin ionlardi'n' birewin saylap aladi' ha'm usi' ionni'n' a'tirapi'ndag'i' jaqi'n ha'm uzaqlaw jaylasqan ionlar menen jup-juptan ta'sirlesiw energiyalari'n tabadi' ha'm olardi' bir biri menen qosi'p shi'g'adi' (summalaydi'). Esaplawlarda kristaldi' ju'da' u'lken dep esaplaydi' ha'm betlik effektlerdi esapqa almaydi'. Esaplang'an qosi'ndi' (summa) kristaldag'i' saylap ali'ng'an ionni'n' energiya'si'n beredi. Bunnan keyin bul energiyani'

pa'njere turaqli'si' a ni'n' funkciyasi' dep esaplap energiya minimumg'a iye bolatug'i'n a shamasini'n' ten' salmaqli'q ma'nisin ani'qlaydi'. Esaplang'an energiyani'n' a boyi'nsha ekinshi ta'rtpi tuwi'ndi'si'n da esaplaw mu'mkin. Bunday jag'dayda serpinliktin' ko'lemlik moduli bolg'an $B = -V(dp/dV)$ shamasini'n esaplaw mu'mkinshiligine iye bolami'z.

Eger S parametri duri's saylap ali'ng'an bolsa baylani's energiyasi'ni'n', pa'njere turaqli'si' a ni'n' ha'm modul B nin' da'l ma'nislerin esaplaw mu'mkinshiligi payda boladi'.

Ionli'q kristallar a'dette sali'sti'rmali' a'piwayi', ku'shli ti'g'i'z jaylasti'ri'lg'an ha'm joqari simmetriyali' kristalli'q pa'njerege iye (mi'sali' kubli'q). Bul kristallardi'n' ko'pshiligi mort keledi.

Kovalentlik kristallar. Kovalentlik kristallar atomlar arasi'ndag'i' kovalentlik baylani'slardi'n' esabi'nan payda boladi'. Al kovalentlik baylani's elektronli'q bultlardi'n' (qabi'qlardi'n') bir birine tiyisiwinin' na'tijesinde elektronlardi'n' bir atomnan ekinshisine o'tiwinin' na'tijesinde payda boladi'. Usi'ni'n' aqi'betinen atomlar arasi'nda eki atomdi' bir birine tartatug'i'n teris zaryadti'n' qoyi'wlasi'wi' payda boladi'. Atom valentligine baylani'sli' bir biri menen ha'r qi'yli' mu'yeshlerdi' jasap ornalasatug'i'n baylani'slardi'n' bir neshe tipin payda etedi. Kovalentlik kristaldag'i' atomlar bir biri menen kovalentlik baylani'slardi'n' esabi'nan birigedi. Qala berse baylani'slar arasi'ndag'i' mu'yeshler ha'm olardi'n' arasi'ndag'i' «uzi'nli'qlar» ha'r qi'yli' bolg'an kristallar ushi'n azmaz ayri'ladi'.

Belgili kovalentlik kristalg'a mi'sal retinde almazdi' ko'rsetiwge boladi'. Oni'n' kristalli'q quri'li'si' 9-su'wrette berilgen. Almazdi'n' quri'li'si'nda (pa'njeresinde) ha'r bir atom tetraedrlik tu'rde jaylasqan to'rt atom menen qorshalg'an. Uglerod atomi'ni'n' kovalentlik baylani'slari' ko'pshilik jag'daylarda almazdag'i'day boli'p jaylasadi'.

Kovalentlik kristallar jag'dayi'nda baylani's energiyasi'n esaplaw procedurasi' jetkilikli da'rejede quramali'. Sonli'qtan bunday esaplawlar jumi'si'n keltirmeymiz.

Kovalent kristallardi'n' kristalli'q pa'njereleleri ha'm olardi'n' bazisleri ju'da' quramali' ha'm to'men simmetriyag'a iye boladi'. Sebebi kristal atomlar yamasa molekulalardi'n' bo'limlerindegi kovalentlik baylani'slardi'n' bag'itlari' ju'da' ko'p sanli'. Kovalent kristallardi' u'yrengende belgili bir sorttag'i' atomni'n' «atomni'n' kovalentlik radiusi'», «kovalent baylani'sti'n' uzi'nli'g'i'», kovalent baylani'slar arasi'ndag'i' mu'yeshler si'yaqli' tu'siniklerdi' ji'yi qollanadi'. Bunday shamalardi'n' derlik barli'g'i' da kristaldag'i' bul atomlar basqa atomlar ta'repinen ha'r qi'yli' boli'p qorshalg'anda az shamag'a o'zgeredi.

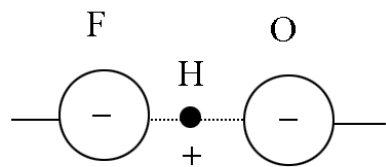
Kovalent ha'm ionli'q kristallar arasi'nda kristallardi'n' ko'p sanli' arali'qli'q tipleri bar. Bunday kristallardag'i' baylani's kovalentlik ha'm polyar. Bunday baylani'sta kovalentlik baylani'sqa juwap беретug'i'n elektronli'q ti'g'i'zli'qti'n' u'lkenirek ma'niske iye bolg'an ori'nlarda ionlardi'n' birine qaray awi'sqan. Usi'ni'n' saldari'nan azmaz zaryadlang'an atomlar arasi'nda qosi'msha kulonli'q ta'sirlesiw ku'shi payda boladi'. Ionli'q baylani's a'dette elektronli'q qabi'qlari' derlik tol'g'an atomlar arasi'nda payda boladi' (siltili metallar, Mendeleev kestesindegi birinshi ha'm jetinshi topar elementleri, ekinshi ha'm alti'nshi topar elementleri arasi'nda kulonli'q baylani's siyregirek ushi'rasadi'). U'shinshi-besinshi topar elementleri a'dette kovalentlik baylani's payda etedi. Ayi'ri'm jag'daylarda eksperimentlerde kristaldag'i' ha'r bir atomg'a sa'ykes keletug'i'n elektronlardi'n' ortasha ma'nisin ani'qlaw mu'mkin (mi'sali' difrakciyali'q usi'llardi'n' ja'rdeminde o'tkerilgen eksperimentlerde). Bul o'z gezeginde atomlardi'n' zaryadi' haqqi'nda da, kristaldag'i' baylani'sti'n' xarakteri haqqi'nda da juwmaqlar shi'g'ari'wg'a mu'mkinshilik beredi.

Metal kristallar. Metal kristallarda atomlardi'n' si'rtqi' elektronlari' ionlardi'n' tulg'alari' (ionni'e ostovi') arasi'nda erkin qozg'ali'p ju're aladi'. Bul elektronlardi' teris zaryadlang'an bulli' payda etedi dep ko'z-aldi'g'a keltiriwge boladi'. Bul bult ishinde metaldi'n' ionlari' jaylasqan boladi'. Ionlardi'n' bir biri ha'm elektronlar bulti' menen penen ta'sirlesiw metaldag'i' atomlardi'n' jaylasi'wi'ni'n' ta'rtpilesiwine ali'p keledi. O'tiwshi metallarda (perexodni'e metalli') olardi'n' d qabi'qlari'ni'n' bir birine o'tiwi ha'm soni'n' aqi'betinde metaldag'i' baylani's energiyasi'ni'n' u'lkeyiwine ali'p keletug'i'n kovalentlik

baylani'sqa usag'an baylani's ta payda boladi'. Metallardag'i' baylani's energiyasi'n esaplaw ju'da' qi'yi'n ma'seleler qatari'na kiredi ha'm sonli'qtan bunday esaplawlardi' keltirmeymiz.

A'dette metallar ti'g'i'z jaylasti'ri'lg'an kristalli'q pa'njerelerdi payda etedi (ti'g'i'z etip jaylasti'ri'lg'an geksagonalli'q, QOK yamasa KOK).

Vodorodli'q baylani'sqa iye molekulali'q kristallar. Vodorodli'q baylani'sqa iye molekulali'q kristallarda vodorodli'q baylani's teris zaryadlang'an F, O, N atomlari' arasi'nda payda boladi'. Al bul atomlardi'n' o'zleri basqa atomlar menen (eger ortasi'nda vodorod bolsa) polyarli'q kovalentlik baylani'sqan boli'wi' kerek. Joqari'da formulalari' keltirilgen atomlardi'n' biri o'zine vodorod atomi'ni'n' elektroni'n qabi'l etedi. Usi'ni'n' saldari'nan vodorod atomi' shekli jag'dayda protong'a aylanadi'. Bul protong'a ko'pshilik jag'daylarda eki teris zaryadlang'an ion arasi'nda ornasqan energiyali'q jaqtan uti'mli'raq boladi' (F, O, N atomlari' menen baylani'sqang'a sali'sti'rg'anda, 11-su'wretti qaran'i'z). Bunday jag'dayda teris zaryadlang'an ionlardi'n' vodorod ionini' menen tartasi'wi'ni'n' saldari'nan energiyasi' shama menen 0,1 eV bolg'an bekkem baylani's payda boladi'. Vodorod ionini'n' kishiliginen ol tek eki atomdi' bir biri menen baylani'sti'radi'.

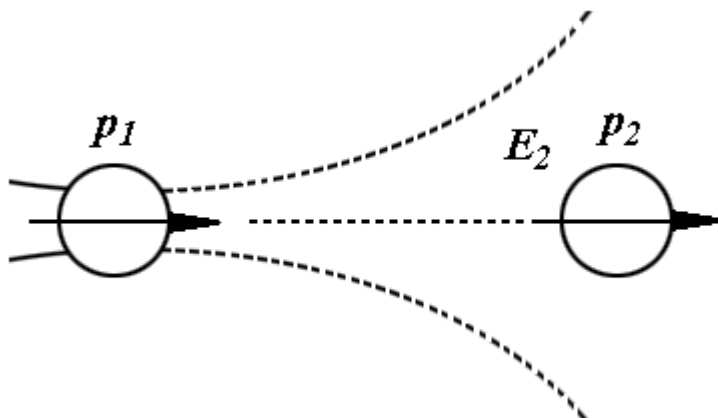


1.11-cu'wret.

Vodorodli'q baylani'sti'n' payda boli'w sxemasi'.

Vodorodli'q baylani's biologiyali'q molekullarda ha'm kristallarda a'hmiyetli ori'ndi' iyeleydi. Mi'sali' DNK molekulasini'n' eki spirali'ni'n' bir biri menen baylani'si'wi' vodorodli'q baylani'sti'n' ori'n ali'wi'ni'n' saldari'nan ju'zege keledi. Ayi'ri'm kristallardi'n' segnetoelektriklik (ferroelektriklik) qa'siyetleri ha'm suw menen muzdi'n' molekullari'ni'n' 0°S temperaturadag'i' qa'siyetleri olarda vodorodli'q baylani'slardi'n' ori'n alatug'i'nli'g'in tu'sindiredi.

Van-der-Vaals kristallari'. Van-der-Vaals kristallari' elektrlik jaqtan neytral bolg'an atomlardan olar arasi'ndag'i' dipol-dipollik baylani'sti'n' esabi'nan payda boladi'. Bunday baylani'slardi'n' ta'sirinde to'mengi temperaturalarda inert gazlerdin' kristallari' payda boladi'. Bunday kristallar barli'q waqi'tlarda da ti'g'i'z jaylasti'ri'lg'an QOK quri'li'sqa iye boladi'. Van-der-Vaals baylani'si' joqari'da qarap o'tilgen baylani'slardi'n' ishindeg'i' en' a'zzisi. Sonli'qtan ionli'q, kovalentlik ha'm metalli'q baylani'slardi'n' payda boli'wi' ushi'n sharayatlar do'retilmegen jag'daylarda ayqi'n ko'rinedi.



1.12-su'wret.

Dipol-dipollik baylani'sti'n' payda boli'w sxemasi'.

Van-der-Vaals baylani'si'ni'n' payda boli'wi'n a'piwayi' klassikali'q modelden ko'riwge boladi'.. Eki neytral bolg'an atomni'n' bir biri menen ta'sirlesiwinqaraymi'z. Olardi'n' oraylari' arasi'ndag'i' qashi'qli'q r ge ten' bolsi'n (12-su'wretti qaran'i'z). Waqi'tti'n' ha'r bir

momentinde teris zaryadti'n' orayi' on' zaryadlang'an atomni'n' orayi' menen sa'ykes kelmeydi. Sonli'qtan 1-atom ushi'n bir zamatli'q dipol momenti p_1 shamasini'n' ma'nisi nolge ten' bolmaydi'. Bul dipol momenti 2-atom jaylasqan ori'nda E elektr maydani'n payda etedi. Bul shamani'n' moduli

$$E_2 = \text{const} \cdot p_1 / r^3. \quad (1.2)$$

Bul maydan ekinshi atomdi' polyarizaciyalaydi' ha'm sonli'qtan ekinshi atom da dipol momentine iye boladi':

$$p_2 = \beta \epsilon_0 E_2 = \beta \epsilon_0 \text{const} \cdot p_1 / r^3, \quad (1.3)$$

bul an'latpada β arqali' atomni'n' polyarizaciyali'wshi'li'g'i' belgilengen. Eki dipol arasi'ndag'i' ta'sirlesiw energiyasi' $p_1 p_2 / r^3$ shamasina proporcional. Sonli'qtan eki atom arasi'ndag'i' ta'sirlesiw energiyasi' $1/r^6$ shamasina proporcional boli'p, ma'nisi ju'da' kishi ha'm qashi'qli'qti'n' o'siwi menen tez kemeyetug'i'n shama boladi'. Sonli'qtan Van-der-Vaals ta'sirlesiw tek kishi qashi'qli'qlarda g'ana sezilerliktey ma'niske iye boladi'. Ionli'q kristallardi' qarag'andag'i' ko'z-qaraslar boyi'nsha ta'sirlesiw energiyasi' ushi'n an'latpani' jazi'w mu'mkin. Bul jag'dayda eki atom arasi'ndag'i' $1/r^6$ shamasina proporcional bolg'an ta'sirlesiw energiyasi'na $1/r^{12}$ shamasina proporcional bolg'an atomlar arasi'ndag'i' iyterilis energiyasi'n qosi'p kristalli'q pa'njerenin' payda boli'w energiyasi'n, pa'njere parametrin ha'm serpimlilik modulin esaplaw mu'mkin boladi'. Usi'nday izbe-izlikte o'tkerilgen esaplawlardi'n' na'tiyjeleri eksperimentte ali'ng'an mag'li'wmatlar arasi'nda jaqsi' sa'ykeslik ori'n alg'an.

Mono- ha'm polikristalli'q zatlar. Texnikada qollani'latug'i'n materiallar menen olardi'n' bo'lekleri tek bir kristalli'q pa'njerege iye kristaldan siyrek jag'daylarda g'ana turadi'. Bunday zatlardi' monokristalli'q zatlar (yamasa monokristallar) dep ataydi'. Monokristallar tutas bir kristaldan turadi'.

Texnikada tiykari'nan polikristallar dep atalatug'i'n materiallar qollani'ladi'. Polikristallar bir birinen o'sip shi'qqan og'ada ko'p monokristalli'q da'neshelerden turadi'. Bunday kristalli'q quri'li'sti'n' payda boli'wi'ni'n' sebebi mi'nadan ibarat: zatlardi'n' kristallani'wi' bir waqi'tta og'ada ko'p sanli' kristallani'w oraylari'nda baslanadi'. Na'tiyjede polikristalli'q zat qa'liplesedi. Eger arnawli' ila'jlar qollani'lsa eritpeden yamasa eritilgen (balqi'ti'lg'an) zattan monokristal ali'nadi'.

Ayi'ri'm jag'daylarda monokristalli'q zatlardi' yamasa olardan sog'i'lg'an bo'leklerdi paydalani'w za'ru'rli boladi'. Mi'sali' optikali'q nurlardi'n' polyarizatorlari'n, rentgen nurlari'ni'n' monoxromatorlari'n, elektronli'q saatlardag'i' rezonatorlardi' tek monokristallardan sog'adi'. Ayi'ri'm jag'daylarda monokristallardi' paydalani'w olardan sog'i'lg'an bo'leklerdin' sapasi'n keskin tu'rde joqari'latadi'. Usi'nday jag'daylar to'mende ayqi'n mi'sallarda ko'rsetiledi

Ma'sele:

Eger 0°S temperaturada qon'si'las atomlari' arasi'ndag'i' ta'sirlesiwge sa'ykes keliwshi potentsialli'q energiya $W(r) = \frac{C}{r^{12}} - b/r^6$ bolsa argon kristallari'ndag'i' Van-der-Vaals baylani'si'ni'n' ha'm oni'n' eriw (balqi'w) temperaturasi'ni'n' ma'nisin esaplan'i'z. Esaplawlarda tek en' jaqi'n qon'si' atomlar arasi'ndag'i' ta'sirlesiwdi ha'm argonni'n' quri'li'si'ni'n' QOK ekenligin esapqa ali'n'i'z.

Sheshimi. QOK quri'li'sta atomni'n' en' jaqi'n jaylasqan 12 qon'si'si' menen ta'sirlesiw energiyasi' $W(r) = 12 \left(\frac{C}{r^{12}} - b/r^6 \right)$ formulasi' menen beriledi. Bunnan keyin da'stu'rge

aylang'an matematikali'q usi'l menen bul an'latpani'n' minimumi'n tabi'w kerek boladi'. Oni'n' ushi'n $W(r)$ funkciyasi'nan r boyi'nsha tuwi'ndi' ali'nadi' ha'm oni' nolge ten'eydi. Usi'nday jollar menen $W(r)$ funkciyasi'nan minimalli'q ma'nisi esaplanadi'. Bul ma'nisti Bolcman turaqli'si'na bo'lip eriw (balqi'w) temperaturasi'ni'n' ma'nisin bahalaw mu'mkin.

Nurlar menen bo'lekshelerdin' kristalli'q pa'njeredegi difrakciyasi'

Texnikani'n' qansha da'rejede rawajlang'anli'g'i' ba'rshege ma'lim. Biraq usi' jag'dayg'a qaramastan kristalli'q pa'njeredegi yamasa molekulalardag'i' atomlardi'n' qanday ori'nlarda jaylasqanli'g'i' haqqi'nda tikkeley mag'li'wmatlardi' beretug'i'n isenimli ha'm effektiv asbap-u'skeneler elege shekem do'retilgen joq. En' jetilistirilgen elektronli'q mikroskoplardi'n' ja'rdeminde tek en' iri bolg'an atomlardi' (mi'sal retinde uran menen alti'nni'n' atomlari'n) baqlaw mu'mkin. En' ko'p tarqalg'an elektronli'q mikroskoplardi'n' ja'rdeminde bir neshe atomlardi'n' o'lshemlerindey bolg'an bir tekli emes ori'nlardi' baqlawg'a boladi'. Ionli'q mikroskoplar principinde iri atomlardi' baqlaw mu'mkinshiligine iye bolsa da olardi' paydalani'w og'ada qi'yi'n. Bunday asbap-u'skenelerdin' ja'rdeminde atomlar arasi'ndag'i' qashi'qli'qlardi' ani'qlaw ma'selese bolsa og'ada qi'yi'n sheshiletug'i'n ma'seleler qatari'na kiredi.

Usi' ku'nleri kristallardag'i' atomlardi'n' bir birine sali'sti'rg'anda jaylasi'wlari'n u'yreniw'din' en' effektivlik usi'li' mikrobo'leksheler: fotonlardi'n', elektronlardi'n', neytronlardi'n' difrakciyasi' boli'p tabi'ladi'. Kristallar menen molekulalardi'n' quri'li'si' haqqi'nda spravoshniklerde keltirilgen mag'li'wmatlardi'n' barli'g'i' da tap usi' usi'ldi'n' ja'rdeminde ali'ng'an.

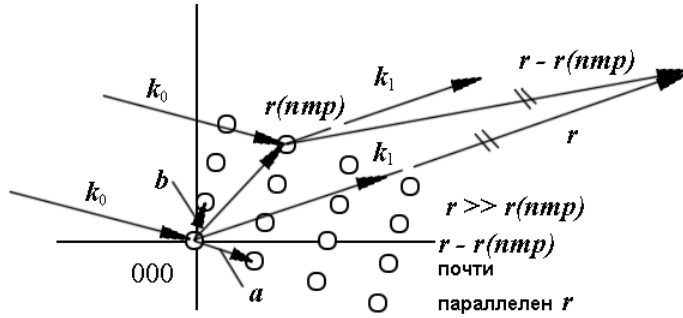
Kristallardi' difrakciyasi'q usi'llar menen izertlegende kristalli'q u'lgige bo'lekshelerdin' derlik parallel da'stesin bag'i'tlaydi', usi' bo'lekshelerdin' difrakciyasi'ni'n' ha'r qi'yli' bag'i'tlar boyi'nsha intensivliginin' tarqali'wi'n u'yrenedi (geypara jag'daylarda kristaldi'n' ha'r qi'yli' orientirovkalari'nda), al bunnan keyin difrakciyasi'q su'wret boyi'nsha kristaldi'n' elementar quti'shasi'ni'n' tipi ha'm oni'n' bazisinin' quri'li'si' haqqi'nda juwmaqlar shi'g'aradi'. Bul usi'llardi'n' (metodlardi'n') ja'rdeminde kristalli'q pa'njerenin' da'wirlerin 4-5 belgige shekemgi da'llikte ha'm bazistegi atomlardi'n' jaylasi'wlari'n ani'qlaydi'.

Kristalli'q denelerdeg'i difrakciya qubi'li'si'n baqlaw ushi'n difrakciyag'a ushi'rawshi' bo'lekshelerdin' de-Broyl tolqi'n uzi'nli'g'i' kristalli'q pa'njerenin' da'wirinen kishi boli'wi' kerek. Bunday sha'rtke energiyalari' $E = 5-20$ keV shamasini'ndag'i' fotonlar (rentgen ha'm gamma nurlari'), energiyasi' $E = 10-100$ eV bolg'an elektronlar ha'm energiyasi' $E = 0,01-0,1$ eV bolg'an neytronlar iye boladi' (bunday neytronlardi' ji'lli'li'q neytronlari' dep ataydi' ha'm oni'n' energiyasi'ni'n' shamasini' kT g'a barabar). Joqari'da atlari' atop o'tilgen u'sh tu'rli bo'leksheler (fotonlar, elektronlar ha'm neytronlar) kristallardi' difrakciyasi'q izertlewlerde qollani'ladi'. Fotonlardi'n' difrakciyasi'n baqlaw en' an'sat difrakciyasi'q usi'llardi'n' biri boli'p tabi'ladi'. Sonli'qtan fotonlardi'n' (rentgen nurlari'ni'n') difrakciyasi' elektronlardi'n' difrakciyasi'n paydalani'wg'a sali'sti'rg'anda ju'da' ko'p qollani'ladi'. Elektronlardi'n' difrakciyasi' baqlaw ushi'n joqari' vakuum (bunday vakuum elektron mikroskopi'ni'n' ishinde ali'nadi'), al neytronlardi' paydalani'w ushi'n olardi'n' deregi retinde u'lken yadroli'q reaktor talap etiledi. Neytronlar menen elektronlardi'n' difrakciyasi' fotonlardi'n' difrakciyasi'na ju'da' uqsas. Sonli'qtan biz to'mende kristalli'q pa'njerenin' quri'li'si'n u'yreniw ushi'n fotonlardi'n' difrakciyasi'ni'n' qollani'li'wi' menen toli'g'i'raq tani'sami'z. Bul juwmaqlardi' kristallardag'i' neytronlar menen elektronlardi'n' difrakciyasi'n tallaw ushi'n da paydalani'wg'a boladi'.

Kristalli'q pa'njere kristalda qozg'ali'wshi' fotonlar, elektronlar ha'm neytronlar ushi'n u'sh o'lsheimli difrakciyasi'q pa'njerenin' orni'n iyeleydi. Elektromagnit tolqi'nlari'ni'n' kvantlari' bolg'an fotonlardi'n' u'sh o'lsheimli pa'njeredegi difrakciyasi'ni'n' ni'zamli'qlari'n u'yreniw ushi'n N dana san'laqqa iye bir o'lsheimli difrakciyasi'q pa'njeredegi difrakciyani'

eske tu'siriw kerek. En' da'slep izertlewshiler eni sheksiz kishi san'laqlardag'i difrakciya qubi'li'si'n izertledi, keyinirek san'laqlardi'n' eninin' shekli ma'niske iye bolatug'i'nli'g'i'n esapqa aldi'. Usi'ni'n' na'tiyjesinde ayqi'n maksimumlar seriyasi'nan turatug'i'n su'wret ali'ndi'. Al intensivlikler bolsa bir san'laqti'n' sheklerindegi intensivliktin' tarqali'wi'ni'n' xarakterine baylani'sli' boli'p shi'qti'.

Da'slep tuwri' mu'yeshlik emes primitivlik elementar quti'shag'a iye kristalli'q pa'njereni ali'p qaraymi'z. Oni'n' ta'replerinin' uzi'nli'g'i' $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ vektorlari'ni'n' ja'rdeminde berilgen bolsi'n. Meyli usi' $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ vektorlari'ni'n' bag'i'ti'nda sa'ykes M, N, P tu'yin bolsi'n (1.13-su'wret).



1.13-su'wret.
Elektromagnit tolqi'nlari'ni'n'
kristalli'q pa'njerenin' tu'yinleri
ta'repinen shashi'rati'li'wi'.

Meyli usi'nday pa'njerege tolqi'n vektori' $\vec{k}_0$, jiyiligi ω_0 bolg'an tolqi'n kelip tu'ssin. Al shashi'rag'an tolqi'nni'n' tolqi'n vektori' $\vec{k}_1$ ge ten' bolsi'n. Pa'njerenin' tu'yinlerinde shashi'rag'anda tolqi'nni'n' jiyiligi o'zgermeytug'i'n jag'daydi' qarayiq, yag'ni'y $\omega_0 = \omega_1 = \omega$. Ani'qlama boyinsha $\omega = kc$. Sonli'qtan $|\vec{k}_0| = |\vec{k}_1| = k$. Kristalg'a kelip tu'siwshi tolqi'nni'n' $\vec{r} = (0,0,0)$ noqati'ndag'i' kernewligi $\vec{E}_0(\vec{r}, t)$ to'mendegidey an'latpani'n' ja'rdeminde beriletug'i'n bolsi'n:

$$\vec{E}_0(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 \cdot \exp(i \omega t). \quad (1.4)$$

Shashi'rag'an tolqi'nda 0,0,0 tu'yini ta'repinen beriletug'i'n u'les mi'na tu'rge iye boladi':

$$\vec{E}_{0,0,0}(\vec{r}, t) = \text{Const} \cdot \vec{E}_0 \cdot \exp(i \omega t) \cdot \exp(-i(\vec{k}_1 \cdot \vec{r})) / |\vec{r}|. \quad (1.5)$$

Nomeri m, n, p bolg'an tu'yinde shashi'rag'an tolqi'n 0,0,0 tu'yininde shashi'rag'an tolqi'ng'a sali'sti'rg'anda basqa uzi'nli'qtag'i' joldi' o'tedi (1.13-su'wret). Kristaldi'n' o'lshemlerinin' kishi ekenligin esapqa alami'z. Bunday jag'dayda $|\vec{r}(m, n, p)|$ menen $|\vec{r}|$ modulleri arasi'ndag'i' ayi'rma esapqa ali'nbaydi' ha'm $|\vec{r} - \vec{r}(m, n, p)| = |\vec{r}|$ sha'rti ori'nlanadi'. Kristaldag'i' tolqi'nni'n' juti'li'wi'n da esapqa almaymi'z. Rentgen nurlari' ushi'n si'ni'w ko'rsetkishin 1 ge ten' dep esaplaymi'z (haqi'yqati'nda da rentgen nurlari' ushi'n si'ni'w ko'rsetkishi ju'da' u'lken da'llikte 1 ge ten'). Bunday jag'dayda $|\vec{r}(m, n, p)|$ menen $|\vec{r}(0,0,0)|$ noqatlari'nda shashi'rag'an nurlar arasi'ndag'i' optikali'q ju'risler ayi'rmasi'n mi'na formulani'n' ja'rdeminde esaplaw mu'mkin:

$$\Delta_{onm} = |\vec{r}(n; m; p)| \cdot \cos(\vec{k}_0; \vec{r}(n; m; p)) - |\vec{r}(n; m; p)| \cdot \cos(\vec{k}_1; \vec{r}(n; m; p)). \quad (1.6)$$

Fazalar ayi'rmasi' to'mendegi shamag'a ten' boli'p shi'g'adi':

$$\Delta\varphi = \Delta_{\text{orm}} \cdot (2\pi / \lambda) = (\vec{k}_0 \cdot \vec{r}(n; m; p)) - (\vec{k}_1 \cdot \vec{r}(n; m; p)). \quad (1.7)$$

$\vec{E}$ vektori'na m, n, p nomerine iye tu'yin ta'repinen qosi'latug'i'n u'les mi'na tu'rge iye:

$$\begin{aligned} \vec{E}_{n,m,p}(\vec{r}, t) &= \vec{E}_{0,0,0}(\vec{r}, t) \cdot \exp(-i\Delta\varphi) = \\ &= \vec{E}_{0,0,0}(\vec{r}, t) \cdot \exp\{i[(\vec{k}_0 \cdot \vec{r}(n; m; p)) - (\vec{k}_1 \cdot \vec{r}(n; m; p))]\} = \\ &= \vec{E}_{0,0,0}(\vec{r}, t) \cdot \exp\{i[(\vec{G} \cdot \vec{r}(n; m; p))]\}, \end{aligned} \quad (1.8)$$

bul an'latpada $\vec{G} = \vec{k}_1 - \vec{k}_0$ arqali' shashi'raw vektori' belgilengen. Bul vektor difrakciya teoriyasi'nda ju'da' u'lken a'hmiyetke iye ha'm shashi'rawdi'n' saldari'nan tolqi'n vektori'ni'n' qanshag'a o'zgergenligin an'g'artadi'.

Pa'njerenin' barli'q tu'yinlerinin' $\vec{E}$ vektori'na u'lesi mi'na an'latpa ja'rdeminde ani'qlanadi':

$$\begin{aligned} \vec{E}(\vec{r}, t) &= \text{const} \cdot \vec{E}_0(\vec{r}, t) \cdot \exp\{i[\omega t - (\vec{k}_0 - \vec{k}_1) \cdot \vec{r}]\} \times \\ &\times (1/|\vec{r}|) \cdot \sum_{n,m,p} \exp\{i(\vec{G} \cdot \vec{r}(n; m; p))\}. \end{aligned} \quad (1.9)$$

Bul formula boyi'nsha summalar pa'njerenin' barli'q tu'yinleri boyi'nsha ju'rgiziledi.

$\vec{r}(m, n, p) = n\vec{a} + m\vec{b} + p\vec{c}$ ekenligin esapqa ali'p ha'm $\vec{E}_1 = \text{const} \cdot \vec{E}_0(\vec{r} \cdot t) \cdot \exp\{i[\omega t - (\vec{k}_0 - \vec{k}_1) \cdot \vec{r}]\} \cdot \frac{1}{|\vec{r}|}$ belgilewin qabi'l etip to'mendegini alami'z:

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \vec{E}_1 \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{p=0}^{P-1} \exp(i\vec{G}(n\vec{a} + m\vec{b} + p\vec{c})) = \\ &= \vec{E}_1 \sum_{n=0}^{N-1} \exp(i\vec{G}\vec{a}n) \sum_{m=0}^{M-1} \exp(i\vec{G}\vec{b}m) \sum_{p=0}^{P-1} \exp(i\vec{G}\vec{c}p). \end{aligned} \quad (1.10)$$

$\vec{E}_1$ ushi'n jazi'lg'an an'latpa u'sh summani'n' ko'beymesinen turadi'. Birinshisi birinshi ag'zasi' 1 ge ten' ha'm bo'limi $\exp[i\vec{a} \cdot \vec{G}]$ bolg'an birinshi N ag'zani'n' summasi'. Ol mi'nag'an ten':

$$\sum_{n=0}^{N-1} \exp(i\vec{G}\vec{a}n) = \frac{1 - \exp(i\vec{G}\vec{a}N)}{1 - \exp(i\vec{G}\vec{a})}. \quad (1.11)$$

Tap usi'nday an'latpani' basqa summalar ushi'n da ali'wg'a boladi'. Difrakciyag'a ushi'rag'an tolqi'nni'n' intensivligi I shamasi' ushi'n $\vec{E}$ ni oni'n' kompleksli tu'yinlesi $\vec{E}^*$ ge ko'beytip bir qansha tu'rlendiriwlerden keyin mi'na an'latpani' alami'z:

$$I = \vec{E} \vec{E}^* = \frac{\sin^2((\vec{a}\vec{G}N)/2)}{\sin^2((\vec{a}\vec{G})/2)} \frac{\sin^2((\vec{b}\vec{G}M)/2)}{\sin^2((\vec{b}\vec{G})/2)} \frac{\sin^2((\vec{c}\vec{G}P)/2)}{\sin^2((\vec{c}\vec{G})/2)}. \quad (1.12)$$

Eger bir waqi'tta

$$(\vec{a}\vec{G})/2 = \pi H; \quad (\vec{b}\vec{G})/2 = \pi H; \quad (\vec{c}\vec{G})/2 = \pi H; \quad (1.13)$$

sha'rtleri ori'nlanatug'i'n bolsa, onda I din' ma'nisi maksimali'q ha'm $(NMP)^2$ shamasina ten' boladi'. Bul an'latpada H, K, L shamalari' pu'tin sanlar. Eger $\frac{\vec{G}\vec{a}}{2}, \frac{\vec{G}\vec{b}}{2}$ ha'm $\frac{\vec{G}\vec{s}}{2}$ shamalari' da pu'tin sanlardan sa'ykes $\frac{\pi}{N}, \frac{\pi}{M}, \frac{\pi}{L}$ shamalari'nan ko'p ma'niske ayi'rmag'a iye bolmasa da intensivlik nolge ten' bolmaydi'.

(1.134)-formula tallaw ushi'n di'm qolaysi'z. Biraq bul an'latpag'a a'piwayi' tu'rdegi ko'rgizbeli geometriyali'q ma'nis beriw mu'mkin. buni'n' ushi'n keri pa'njere tu'sinigin ko'rip shi'g'ami'z.

Keri pa'njere. Keri pa'njerenin' tiykarg'i' translyაციалari' bolg'an $\vec{A}, \vec{B}, \vec{C}$ vektorlari' bi'layi'nsha ani'qlanadi':

$$\begin{aligned}\vec{A} &= 2\pi[\vec{b} \times \vec{c}] / (\vec{a}[\vec{b} \times \vec{c}]); \\ \vec{B} &= 2\pi[\vec{c} \times \vec{a}] / (\vec{b}[\vec{c} \times \vec{a}]); \\ \vec{C} &= 2\pi[\vec{a} \times \vec{b}] / (\vec{c}[\vec{a} \times \vec{b}]).\end{aligned}\quad (1.14)$$

Mi'na qatnaslardi'n' ori'nlanatug'i'nli'g'i'n tekserip ko'riw mu'mkin:

$$\begin{aligned}(\vec{A} \cdot \vec{a}) &= 2\pi; (\vec{B} \cdot \vec{a}) = 0; (\vec{C} \cdot \vec{a}) = 0; \\ (\vec{A} \cdot \vec{b}) &= 0; (\vec{B} \cdot \vec{b}) = 2\pi; (\vec{C} \cdot \vec{b}) = 0; \\ (\vec{A} \cdot \vec{c}) &= 0; (\vec{B} \cdot \vec{c}) = 0; (\vec{C} \cdot \vec{c}) = 2\pi.\end{aligned}\quad (1.15)$$

$\vec{A}$ vektori'ni'n' $\vec{c}$ menen $\vec{b}$ g'a perpendikulyar ekenligin, al usi' $\vec{A}$ vektori'ni'n' modulinin' $2\pi/d$ g'a ten' ekenligin ko'rsetiwge boladi'. Bul an'latpada d arqali' $\vec{c}$ menen $\vec{b}$ vektorlari'nda quri'lg'an kristallografiyali'q tegislikler arasi'ndag'i' kashi'qli'q. Tap sol si'yaqli' qatnaslar $\vec{B}$ ha'm $\vec{C}$ vektorlari' ushi'n da ori'nli'.

Kristalli'q pa'njeredegidey mu'mkin bolg'an translyაციалар vektorlari' bolg'an $\vec{T} = h\vec{A} + k\vec{B} + l\vec{C}$ vektorlari'ni'n' ushlari' keri pa'njere dep atalatug'i'n ken'isliklik pa'njereni payda etedi.

Keri pa'njereni de kristalli'q pa'njere si'yaqli' tallaw mu'mkin. buni'n' ushi'n ondag'i' hkl tu'yinlerin, hkl koordinatalari'na iye vektorlardi', a'hmiyetli bag'i'tlardi', tegisliklerdi, noqatlardi'n' koordinatalari'n ha'm tag'i' basqalardi' qarap shi'g'i'w kerek boladi'. Mi'sali' hkl koordinatalari'na iye keri pa'njerenin' vektori'ni'n' Myuller indeksleri hkl bolg'an kristallografiyali'q tegislikke perpendikulyar ekenligin da'lillewge boladi'. Al oni'n' uzi'nli'g'i' bolsa $2\pi/d$ shamasina ten' (d arqali' tegisliklerdin' usi' sistemasi' ushi'n tegislikler arasi'ndag'i' qashi'qli'q belgilengen).

Eskertiw: Bir qansha jag'daylarda, a'sirese teoriyali'q fizikada keri pa'njere haqqi'nda ga'p etilgende 2π ko'beytiwshisi qatnasadi' (mi'sali' $2\pi/d$). Biraq kristallar rentgenografiyasi'nda, neytronografiyada ha'm elektron mikroskopiya'si'nda 2π ko'beytiwshisi paydalani'lmaydi' ha'm $2\pi/d$ shamasini'n' ornina $1/d$ shamasini' paydalani'ladi' (demek masshtab 2π ko'beytiwshisine pari'q qi'ladi' degen so'z).

Rombali'q elementar quti'shasi' bar keri pa'njereni qaraymi'z. (1.14, 1.15) formulalari' boyi'nsha ha'm $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ vektorlari' arasi'ndag'i' mu'yeshlerdi tuwri' dep esaplap mi'nalarg'a iye bolami'z:

$$\vec{A} = 2\pi\vec{a} / |\vec{a}|^2; \vec{B} = 2\pi\vec{b} / |\vec{b}|^2; \vec{C} = 2\pi\vec{c} / |\vec{c}|^2. \quad (1.16)$$

Rombali'q quti'shani'n' en' uzi'n ta'repine keru pa'njerenin' quti'shasi'ni'n' en' kelte ta'repinin' sa'ykes keletug'i'nli'g'i' ko'rinip tur. Tap usi'nday jollar menen primitivlik kubli'q pa'njere ushi'n elementar quti'shani'n' qabi'rg'asi'ni'n' uzi'nli'g'i' $1/a$ shamasina ten' kub bolatug'i'nli'g'i'na an'sat ko'z jetkeriwge boladi'.

Tetragonalli'q ha'm geksagonalli'q pa'njerelerde $\vec{A}, \vec{B}, \vec{C}$ vektorlari'ni'n' keru ken'islikte sa'ykes tetragonalli'q ha'm geksagonalli'q pa'njerelerdi payda etetug'i'nli'g'i'n da an'sat ko'rsetiwge boladi'. Bul jag'dayda a menen c arasi'ndag'i' qatnaslar g'ana o'zgeredi. Triklinlik ha'm monoklinlik quti'shalar ushi'n keru pa'njerenin' vektorlari' bolg'an $\vec{A}, \vec{B}, \vec{C}$ shamalari'n tabi'w biraz quramali'. Bunday jag'dayda (1.14)-formulani' paydalani'wg'a tuwri' keledi.

Difrakciya sha'rti (1.13) ti qanaatlandi'ratug'i'n $\vec{G}$ vektorlari'n izlewge qayti'p kelemiz. Endi olarg'a a'piwayi' geometriyalig' ma'nis beriw mu'mkin. Meyli $\vec{G}$ vektorlari' $\vec{A}, \vec{B}, \vec{C}$ vektorlari' boyi'nsha jayi'lg'an bolsi'n:

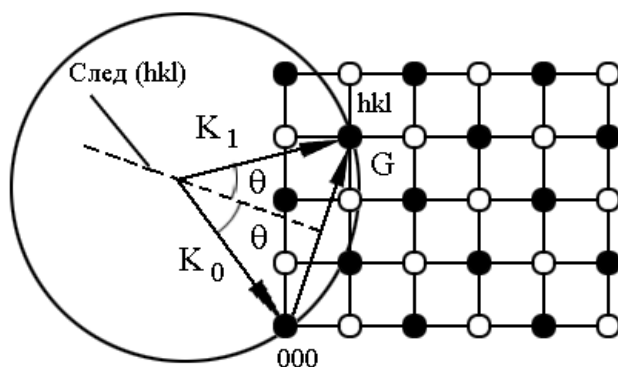
$$\vec{G} = h\vec{A} + k\vec{B} + l\vec{C}. \quad (1.17)$$

Bunday jag'dayda (1.17)-an'latpani' (1.13)-an'latpag'a qoyi'p (1.15)-qatnasti' esapqa ali'p difrakciya maksimumlari' sha'rtin alami'z: $h = H, k = K, l = C$. Bul an'latpadag'i' H, K ha'm L shamalari' pu'tin sanlar. Demek h, k, l shamalari' pu'tin sang'a ten' bolg'anda, yag'ni'y $\vec{G}$ vektorlari' keru pa'njerenin' translyaciya vektorlari' bolg'an $\vec{T}^*$ vektorina ten' bolg'anda difrakciyani'n' maksimumi' ori'n aladi' eken.

Keru pa'njerenin' u'sh o'lshemli pa'njereden ali'natug'i'n difrakciyalig' su'wretti sa'wlelendiretug'i'nli'g'i'n ko'rsetiwge boladi'. Optika kursinda Fraungoferdin' difrakciyalig' su'wretinin' nurlani'w intensivliginin' bir ha'm eki o'lshemli tarqali'wi'ni'n' Fure-obrazi' ekenligin tasti'yi'qlaydi'. Tap sol si'yaqli' u'sh o'lshemli keru pa'njere sheksiz u'lken kristaldi'n' Fure-obrazi', al shekli o'lshemli tu'yinlerge iye keru pa'njere shekli o'lshemlerge iye kristaldi'n' Fure-obrazi' boli'p tabiladi'. Bunday keru pa'njerenin' o'lshemleri [yag'ni'y difrakciyani'n' intensivligi (1.12)-formulag'a sa'ykes nolge ten' emes oblastlar] kristaldi'n' sa'ykes bag'i'ttag'i' uzi'nli'g'i'na keru proporcional. Sonli'qtan difrakciyalig' su'wrettin' tu'rin kristallig' pa'njerenin' Fure tu'rlendiriwin esaplaw arqali' aldi'n-ala esaplap ko'rsetiwge boladi'. Buni'n' kristaldag'i' elektronli'q ti'g'i'zli'qti'n' tarqali'wi'na baylani'sli' ekenligin biz to'mende ko'remiz

Keru pa'njere kristaldi'n' kristallig' pa'njeresi menen bekkem baylani'sqan. Kristaldi' bursa oni'n' keru pa'njeresi de buri'ladi'. Difrakciyani' baqlaw ushi'n shashi'raw vektorin' keru pa'njerenin' qanday da bir tu'yinine sa'ykes keletug'i'nday etip qoyadi'. Buni' ko'rsetpeli etip tu'sindiriw ushi'n Evald quri'lmasi'n paydalani'w kerek.

Evald quri'lmasi'. Difrakciya sha'rtinin' ori'nlani'wi'n ha'm difrakciyag'a ushi'rag'an tolqi'nlardin' bag'i'ti'n ani'qlaw ushi'n Evald quri'lmasi'nan paydalani'w ju'da' qolayli' (1.14-su'wret).



1.14-su'wret.
Evald quri'lmasi'.

Kristalg'a kelip tu'siwshi tolqi'nni'n $\vec{k}_0$ vektori'ni'n ushi'n keru pa'njerenin' 000 tu'yinide jaylasti'rami'z. Tu'siwshi ha'm shashi'rag'an tolqi'nlardi'n tezliklari de, jiyiliklari de birdey bolg'anli'qtan $\vec{k}_1$ vektori'ni'n da uzi'nli'g'i $\vec{k}_0$ vektori'ni'n uzi'nli'g'i'nday boladi'. Endi wazi'ypa usi' $\vec{k}_1$ vektori'ni'n bag'i'ti'n tabi'wdan ibarat. Radiusi'ni'n shamasi' $\vec{k}_1$ vektori'ni'n moduline teng sfera si'zami'z (Evald sferasi'). Oni'n orayi' $\vec{k}_0$ vektori'ni'n basi'nda ornalasti'ri'ladi'. Shashi'raw vektori'ni'n basi' menen ushi' $\vec{k}_0$ menen $\vec{k}_1$ vektorlari'ni'n ushlari'na sa'ykes keledi. Endi $\vec{G}$ vektorlari'ni'n birini'n keru pa'njerenin' tu'yinlerini'n birine sa'ykes keletug'i'nli'g'i'n yamasa kelmeytug'i'nli'g'i'n tekseremiz. Buni'n ushi'n keru pa'njerenin' baslang'i'sh tu'yinin shashi'raw vektori' $\vec{G}$ vektorlari'ni'n basi'na jaylasti'rami'z (bul noqat $\vec{k}_0$ vektori'ni'n ushi' boli'p tabi'ladi') ha'm Evald sferasi'na qanday da bir tu'yinnin' tiyetug'i'nli'g'i'n tekseremiz. Biraq noqatli'q tu'yinlerdin' sfera beti menen tiyisetug'i'nli'g'i'ni'n itimalli'g'i'ni'n ju'da' kishi' ekenligi' belgili. Soni'n ushi'n (tu'yindi sferani'n betine tiyidiriw ushi'n) kristaldi', oni'n menen baylani'sqan keru pa'njereni buri'w kerek. Endi geometriyani'n ja'rdeminde keru pa'njereni (kristaldi'n o'zin) qansha mu'yeshke buri'wdi'n za'ru'rli'gi an'sat tu'rde ani'qlanadi'.

Ha'zirgi waqi'tlari' difrakciya qubi'li'si'n baqlawg'a arnalg'an difraktometr dep atalatug'i'n a'sbaplar kompyuterler menen toli'qti'ri'lg'an. Olar kristaldi', difrakciyag'a ushi'rag'an tolqi'nlardi' registratsiyalawshi' detektordi' qansha shamag'a buri'wdi' avtomat tu'rde ani'qlay aladi'.

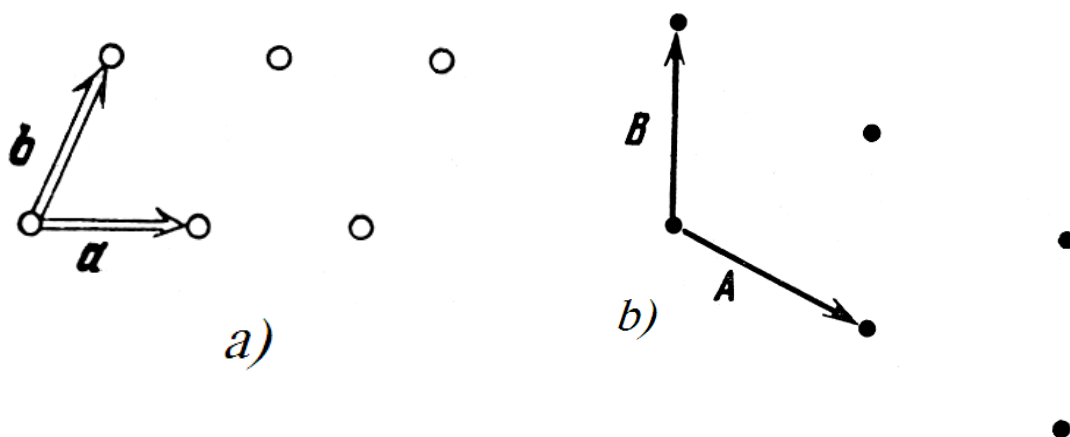
1.14-su'wrette $\vec{k}_0$ menen $\vec{G}$ vektorlari'ni'n uzi'nli'qlari' arasi'nda

$$|\vec{G}| = |\vec{k}_0| \cdot 2 \sin(\Theta) \quad (1.18)$$

an'latpasi' menen esaplanatug'i'n baylani'sti'n bar ekenligi ko'rinip tur. Bul an'latpada Θ arqali' difraktsiyali'q mu'yesh dep atalatug'i'n mu'yeshdin' ma'nisi belgilengen. $|\vec{G}| = 2\pi/d_{hkl}$ ekenligin esapqa ali'p belgili Vulf-Bregg ten'lemesine iye bolami'z:

$$2d_{hkl} \sin[\theta] = \lambda.$$

Bul ten'lemede d_{hkl} shamasi' shashi'raw ta'rtibi n di de o'z ishini aladi'. Sebebi qanday da bir sen eselengen hkl shamalari' shashi'raw ta'rtibi n di o'z ishini aladi' (Vulf-Bregg ten'lemesinin' a'dette $2d_{hkl} \sin[\theta] = n\lambda$ tu'rinde jazi'latug'i'nli'g'i'n esapqa alami'z).



Kristalli'q pa'njere (a) ha'm og'an sa'ykes keletug'i'n keru pa'njere (b)

Polikristaldi'n' keru pa'njeresi. Joqari'da ga'p etilgende, polikristalli'q material bir birine sali'sti'rg'anda i'qti'yarli' tu'rde bag'i'tlang'an og'ada ko'p sanli' mayda kristalli'q da'neshelerden turadi'. Usi'nday ha'r bir da'neshege keru pa'njere sa'ykes keledi. Ha'r qi'yli' da'neshelerga juwap beretug'i'n keru pa'njereler birdey da'wirlerge, birdey boli'p jaylasqan tu'yinlerge iye boladi'. Biraq olardi'n' barli'g'i' da keru pa'njerenin' 000 tu'yinine sali'sti'rg'anda i'qti'yarli' tu'rde bag'i'tlang'an boladi'. Bunday jag'dayda keru pa'nejerenin' hkl tu'yinine keru ken'isliktegi radiusi' T_{hkl}^* ge ten' bolg'an bette jaylasqan ko'p sanli' tu'yinler sa'ykes keledi. I'qti'yarli' tu'rde bag'i'tlarga iye da'neshelerga iye ideal polikristall jag'dayi'nda keru pa'njerenin' tu'yinin sferag'a aylanadi' dep esaplawg'a boladi'. Keru pa'njerenin' barli'q tu'yinlerinin' ji'ynag'i'na radiuslari' T_{hkl}^* shamasi'na ten' bolg'an, kristallografiyalik tegisliklerdin' ma'nisine baylani'sli' izbe-iz jaylasqan sferalar ji'ynag'i' sa'ykes keledi. Bunday jag'dayda Evald quri'lmasi'nda Evald sferasi'n keru pa'njere tu'yinlerinin' sferalar ji'ynag'i' bazi' bir shen'berler boyi'nsha kesip o'tedi (1.14-su'wret). Sonli'qtan usi'nday polikristaldan difrakciya polikristaldi'n' qa'legen bag'i'ti'nda ha'm qa'legen tolqi'n uzi'nli'g'i'nda ali'nadi'. Polikristallardan difrakciyani' baqlaw ushi'n monoxrom rentgen nurlari'n yamasa rentgen spektrinin' xarakteristikali'q si'zi'qlari'nan paydalanadi'.

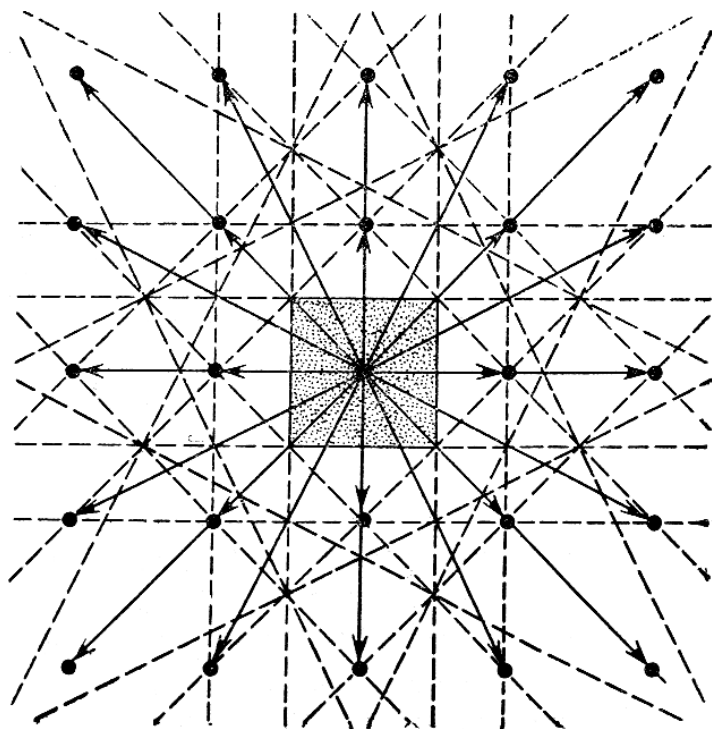
Brillyuen zonalari'. Kristallarda difrakciya sha'rtin qanaatlandi'ratug'i'n tolqi'nlar menen bo'lekshelerdin' tolqi'n vektorlari' bolg'an $\vec{k}_0$ vektorlari'ni'n' ko'pligin tapqan paydali' boladi'. (1.18)-ten'lemeni bi'layi'nsha jazi'wg'a boladi':

$$|\vec{G}| = |\vec{k}_0| \cdot 2 \cdot \cos(\vec{G}\vec{k}_0) \text{ yamasa } |\vec{G}|^2 = 2(\vec{G}\vec{k}_0) \quad (1.20)$$

Keyingi ten'leme $\vec{G}$ vektori'na perpendikulyar ha'm koordinata basi'nan $|\vec{G}|/2$ qashi'qli'g'i'nda jaylasqan tegislik ushi'n jazi'lg'an ten'leme boli'p tabi'ladi'. Soni'n' menen birge bul ten'lemenin' difrakciya sha'rtin qanaatlandi'ratug'i'n barli'q $\vec{k}_0$ vektorlari' ushi'n jazi'lg'an ten'leme ekenligin itibarg'a alami'z. Bunday jag'dayda difrakciya sha'rtine juwap beretug'i'n $\vec{k}_0$ vektorlari'ni'n' ushlari'ni'n' ko'pligi bir tegislikte jatadi' ha'm bul tegislik keru pa'njerenin' barli'q vektorlari'ni'n' ortasi' arqali' o'tedi ha'm olardi'n' barli'g'i'na da perpendikulyar bag'i'tlang'an. Tap usi'nday jollar menen joqari'da Vigner-Zeytc quti'shasi' sog'i'lg'an (du'zilgen) edi. Keru ken'islikte du'zilgen Vigner-Zeytc quti'shasi'n Brillyuennin' birinshi zonasi' dep ataw qabi'l etilgen. Bul zona a'hmiyetli qa'siyetke iye: tolqi'n vektori' oni'n' shegarasi'na sa'ykes keletug'i'n tolqi'nlar menen bo'leksheler difrakciya sha'rtin qanaatlandi'radi'. Brillyuen zonalari' elektronlardi'n', fononlardi'n' ha'm basqa da bo'lekshelerdin' kristallarda qozg'ali'wi'n, kristallardag'i' energiyali'q zonalardi'n'

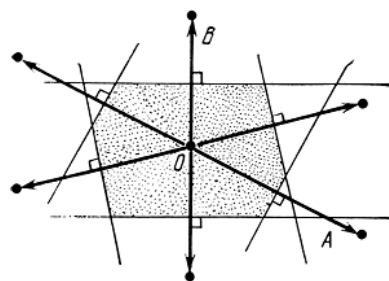
quri'li'si'n izertlegende a'hmiyetli ori'ndi' iyeleydi. Bul haqqi'nda keyinirek toli'q tu'rde ga'p etiledi.

Brillyuen zonalari'n quri'w qi'yi'n proceduralar qatari'na kirmeydi. Bul 1.14 b-f su'wretlerde demonstraciyalang'an.



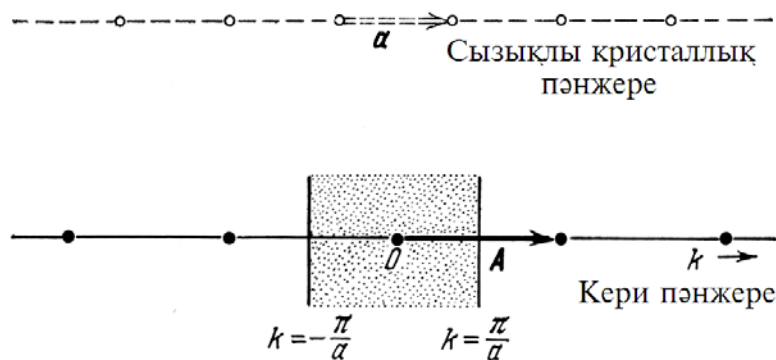
1.14 b su'wret.

Kvadrat ker pa'njere. Jin'ishke tutas si'zi'qlardi'n' ja'rdeminde ker pa'njerenin' vektorlari' belgilengen. Usi' vektorlarga perpendikulyar punktir si'zi'qlar olardi' ten'dey ekige bo'ledi. Su'wrettin' orayi'nda joylasqan kvadrat en' kishi maydang'a iye boladi' ha'm punktir si'zi'qlar menen toli'q tuyi'qlang'an. Bul kvadratti'n' maydani' koordinatalar basi'ni'n' a'tirapi'ndag'i' barli'q kvadratlardi'n' maydani'nan kishi. Bul kvadrat ker pa'njeredegi Vigner-Zeytctin' primitivlik elementar quti'shasi' boli'p tabi'ladi'.

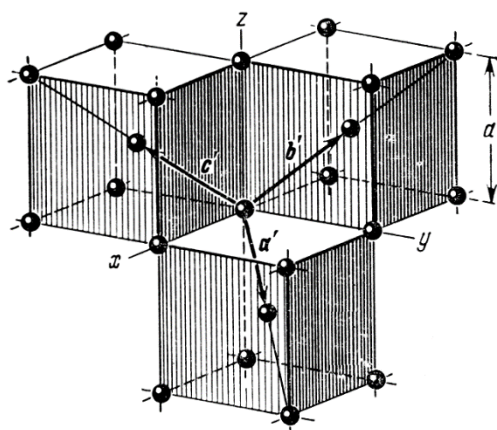


1.14 s su'wret.

Eki o'lsheqli qi'ya mu'yeshli (tuwri' mu'yeshli emes pa'njere ushi'n Brillyuennin' birinshi zonasi'n sog'i'w. Da'slep O noqati'n ker pa'njerenin' jaqi'n joylasqan tu'yinleri menen tutasti'ratug'i'n vektorlardi' tu'siremiz. Bunnan keyin bul vektorlarga perpendikulyar ha'm olardi' ten'dey ekige bo'letug'i'n si'zi'qlardi' ju'rgizemiz. Maydani' en' kishi bolg'an tap usi'nday jollar menen ali'ng'an ko'p mu'yeshlik Brillyuennin' birinshi zonasi' boli'p tabi'ladi'.

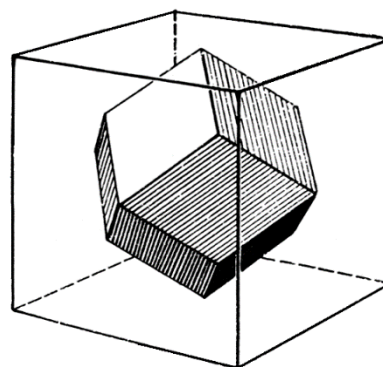


1.14 d su'wret. Bir o'lsheмли kristalli'q pa'njere menen keri pa'njere. Uzi'nli'g'i $2\pi/a$ bolg'an $\mathbf{A}$ vektori' keri pa'njerenin' bazislik vektori', al $\mathbf{A}$ ha'm $-\mathbf{A}$ vektorlari' koordinata basi'nan tu'sirilgen en' qi'sqa vektorlar boli'p tabi'ladi'. Usi' vektorlarga perpendikulyar ha'm usi' vektorlardi' ten'dey ekige bo'letug'i'n si'zi'qlar Brillyuennin' birinshi zonasi'ni'n' shegaralari' boli'p tabi'ladi'. Bul shegaralarda $k = \pm\pi/a$.



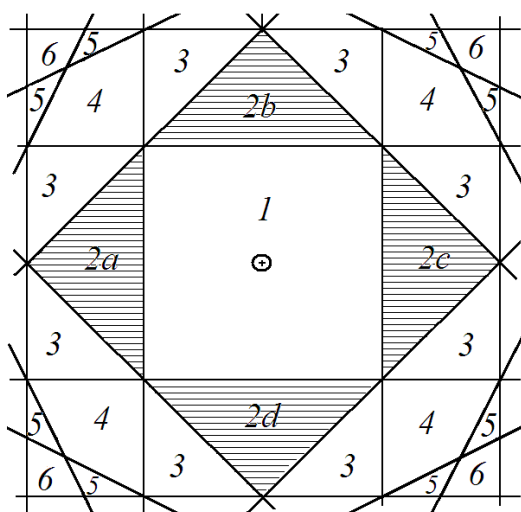
1.14 i su'wret.

KOK kristaldi'n' primitivlik bazislik vektorlari'.



1.14 f su'wret.

KOK kristallardag'i' Brillyuennin' birinshi zonasi'. Bul zona duri's rombodekaedrdin' formasi'na iye.



1.14 g su'wret.

A'piwayi' kubli'q pa'njerenin' Brillyuen zonalari'.

1 arqali' Brillyuennin' birinshi, 2 arqali' ekinshi, 3 arqali' u'shinshi zonasi' ko'rsetilgen. Basqa sanlar da sa'ykes Brillyuen zonalari'n an'g'artadi'.

Bazistin' strukturali'q faktori'. Biz joqari'da pa'njerenin' ha'r bir tu'yinin noqatli'q shashi'rati'wshi' oray dep esapladi'q. Al a'dette ha'r bir oray menen kristalli'q pa'njerenin' bazisi dep atalatug'i'n bir neshe birdey boli'p joylasqan atom baylani'sli'. Bazistin' ha'r qi'yli' atomlari'nda shashi'rag'an tolqi'nlar atomlardi'n' bir birine sali'sti'rg'anda qalayi'nsha

jaylasqanli'g'i'na baylani'sli' ha'r qi'yli' fazalarda qosi'ladi'. Difrakciyag'a ushi'rag'an $\vec{E}_0(\vec{r}, t)$ nur vektori'ni'n' amplitudasi'na qosi'latug'i'n u'lesti esaplaw joqari'da qarap o'tilgen u'leslerdi qosi'w menen birdey tu'rde a'melge asi'ri'ladi'. Bul jag'dayda summalaw kristalli'q pa'njerenin' barli'q tu'yinleri boyi'nsha emes, al bazistin' barli'q atomlari' boyi'nsha a'melge asi'ri'ladi'.

Meyli bazis bir neshe atomdi' o'z ishine alsin. Sol atomlardi'n' birewinin' nomerin j arqali' belgileymiz. Al $\vec{r}_j = x_j\vec{a} + y_j\vec{b} + z_j\vec{c}$ arqali' oni'n' elementar quti'shani'n' basi'na sali'sti'rg'andag'i' radius-vektori'n, f_i arqali' usi' atomni'n' shashi'rag'an tolqi'nni'n' $\vec{E}_0(\vec{r}, t)$ amplitudag'a qosatug'i'n u'lesin belgileymiz. Bunday jag'dayda $\vec{G} = h\vec{A} + k\vec{B} + l\vec{C}$ shashi'raw vektori' ushi'n difrakciyag'a ushi'rag'an tolqi'ng'a qosi'latug'i'n u'les $\exp(i\vec{r}_j\vec{G})$ ko'beymesine iye ja'ne f_i shamasi'na proporcional boladi':

$$E_j = f_i \cdot \exp(i\vec{r}_j\vec{G}). \quad (1.21)$$

Bazistin' barli'q atomlari'ni'n' u'lesin tabi'w ushi'n j indeksi boyi'nsha summalaw kerek boladi':

$$F(hkl) = \sum_j E_i = \sum_j f_i \cdot \exp(i\vec{r}_j\vec{G}). \quad (1.22)$$

$\vec{G} = h\vec{A} + k\vec{B} + l\vec{C}$ ha'm $\vec{r}_j = x_j\vec{a} + y_j\vec{b} + z_j\vec{c}$ ekenligin ha'm (1.15)-an'latpani' esapqa ali'p to'mendegi an'latpag'a iye bolami'z:

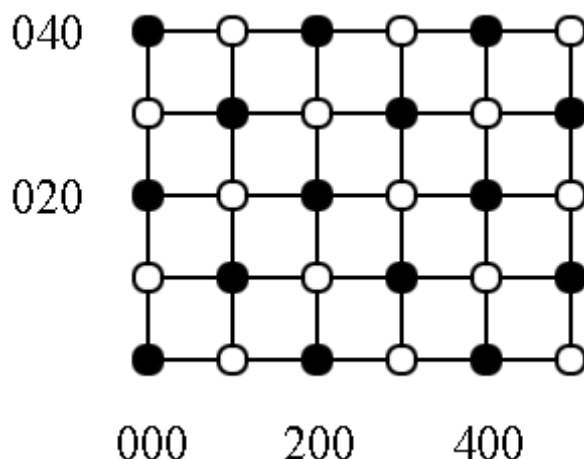
$$F(hkl) = \sum_j f_i \cdot \exp[2\pi i(hx_j + ky_j + lz_j)]. \quad (1.23)$$

$F(hkl)$ shamasi'n berilgen kristaldi'n' bazisinin' strukturali'q faktori' yamasa zatti'n' elementar quti'shasi'ni'n' strukturali'q faktori' dep ataydi'. Bul shama u'sh o'lsheqli kristalli'q pa'njere ta'repinen beriletug'i'n difrakciyali'q maksimumlardi'n' sali'sti'rmali' amplitudasi'n ani'qlaydi'. Berilgen kristall ushi'n $F(hkl)$ shashi'raw vektori'nan g'a'rezli. Keri pa'njerenin' bazi' bir tu'yini ushi'n bul shamani'n' ma'nisi nolge ten' boli'wi' mu'mkin. Bunday jag'dayda bazistin' ha'r qi'yli' atomlari' ta'repinen difrakciyag'a ushi'rag'an tolqi'n'lardi'n' amplitudalari' qosi'ladi' ha'm nolge ten' amplitudani' beredi (yag'ni'y olar bir birin so'ndiredi). Bunday jag'dayda «noqatli'q tu'yinlerden» turatug'i'n kristalli'q pa'njere ku'shli difrakciyani' beriwi kerek (eger shashi'raw vektori' oni'n' keri pa'njeresinin' tu'yinlerinin' birine sa'ykes keletug'i'n bolsa).

Endi KOK kristallar ushi'n strukturali'q faktordi' esaplaymi'z. Eger elementar quti'sha ushi'n 1.1-su'wrette keltirilgen kub qabi'l etiletug'i'n bolsa, onda bazis koordinatalari' 0,0,0 ha'm $\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}$ bolg'an eki atomnan turadi'. Bunday jag'dayda keri pa'njerenin' indeksleri hkl bolg'an tu'yini ushi'n (1.23)-formula ja'rdeminde esaplanadi' ha'm to'mendegidey tu'rge iye boladi':

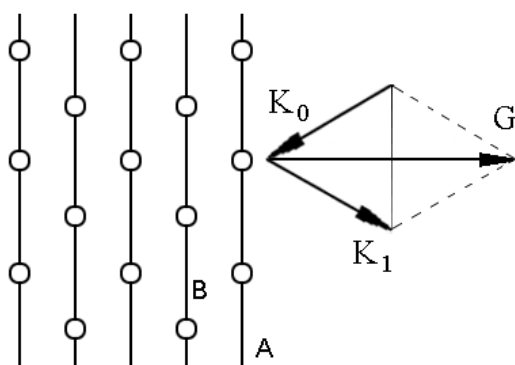
$$F(hkl) = f\{1 + \exp[i\pi(h + k + l)]\}. \quad (1.24)$$

Bul formulada $F(hkl)$ shamasi'ni'n' indekslerdin' summasi' bolg'an $h + k + l$ qosi'ndi'si'nan g'a'rezli ekenligi ko'rinip tur. Eger $h + k + l$ qosi'ndi'si' jup bolsa $F(hkl) = 2$, al taq bolsa $F(hkl) = 0$. Endi strukturali'q faktorlari' nolge ten' emes tu'yinlerdi do'n'gelekler menen belgilep shi'qsa, onda do'n'gelekler keri pa'njerede QOK pa'njerenin' tu'yinlerindey boli'p jaylasadi' (1.15-su'wret).



1.15-su'wret.
KOK kristallardi'g'i' ha'm CsCl tipidagi
strukturalar ushi'n keru pa'njerenin'
tu'yinlerinin' jaylasi'wi'.

1.15-su'wrette boyalmag'an do'n'gelekler menen belgilengen tu'yinler ushi'n difrakciya baqlanbaydi'. Sebebi kubli'q quti'shani'n' orayi'nda jaylasqan atomlarda shashi'rag'an tolqi'nlar kubti'n' to'belerinde shashi'rag'an tolqi'nlar menen qarama-qarsi' fazada boladi'. Bul qubi'li'sti' 1.16-su'wrettin' ja'rdeminde an'sat tu'sindiriwge boladi'. 1.16-su'wrette KOK quti'shani'n' (100) tegisligi sa'wlelendirilgen. Bul tegislik A arqali' belgilengen. Bul tegislikke parallel etip (200) tegisligin ju'rgiziwge boladi' (oni' V arqali' belgiledik). V tegisligindegi atomlar sani' A tegisligindegi atomlar sani'na ten'. Demek (100) tegisligindey tegislikler eki ese ji'yi jaylasqan boli'p shi'g'adi'. V tipidagi tegislikler bolmag'anda A tipidagi tegisliklerde shashi'rag'an tolqi'nlar bir birin ku'sheytken bolar edi. V tipidagi tegisliklerinde de tolqi'nlar shashi'raydi', olardi'n' amplitudalari'ni'n' qosi'ndi'si' A tipidagi tegisliklerde shashi'rag'an tolqi'nlardi'n' amplitudalari'ni'n' qosi'ndi'si'na ten'. Biraq V tipidagi shashi'rag'an tolqi'nlardi'n' fazasi' menen A tipidagi tegisliklerde shashi'rag'an tolqi'nlardi'n' fazalari' qarama-qarsi' boladi' (fazalar ayi'rmasi' π ge ten'). Sonli'qtan A ha'm V tipidagi tegisliklerde jaylasqan atomlarda shashi'rag'an tolqi'nlar bir birin toli'q so'ndiredi. KOK pa'njerege iye kristallardi'n' rentgenogrammalari'nda (110), (200), (112), (220), (130), (222) si'yaqli' indekslerge iye refleksler ori'n aladi'. Demek rentgenogrammada indekslerdin' summasi' jup bolatug'i'n bolsa, onda bul KOK pa'njerenin' belgisi boli'p tabi'ladi'.



1.16-su'wret.
Tolqi'nlardi'n' KOK pa'njerenin' (100)
tegisligi ta'repinen shag'i'li'sti'ri'li'wi'.

Endi xlorli' ceziy tipidagi quri'li'sti' qaraymi'z (1.1-su'wret). Bul quri'li's kubli'q quti'shag'a iye ha'm eki bazisi bar. Birinshisinin' koordinatasi' 000 (Cs ushi'n), ekinshisiniki $\frac{1}{2}\frac{1}{2}\frac{1}{2}$ (Cl ushi'n). (1.23)-formula ja'rdeminde esaplang'an oni'n' strukturali'q faktori' mi'nag'an ten':

$$F(hkl) = f_{Cs} + f_{Cl} \exp[i\pi(h + k + l)]. \quad (1.25)$$

Endi strukturali'q faktor $F(hkl)$ indekslerdin' qosi'ndi'si' jup bolsa da, taq bolsa da nolge ten' bolmaydi'. Haqi'yqati'nda da bul jag'dayda elementar quti'shani'n' orayi'nda ha'm mu'yeshlerinde jaylasqan atomlar ha'r qi'yli'. Sonli'qtan olar tolqi'nlardi' ha'r qi'yli' etip shashi'ratadi' ($f_{Cs} \neq f_{Cl}$). Strukturali'q faktor f_{Cs} ha'm f_{Cl} shamalari'ni'n' qosi'ndi'si'na yamasa ayi'rmasi'na ten' boladi'. Eger ma'seleni KOK pa'njere ushi'n qarag'ani'mi'zday etip qarasaq (1.16-su'wret), onda A ha'm V tipindegi tegislikler ha'r qi'yli' atomlarg'a iye boladi'. Olar shashi'rag'an tolqi'nlardi'n' amplitudasi'na ha'r qi'yli' u'les qosadi'. Olardi'n' u'leslerinin' qosi'ndi'si' nolge ten' bolmaydi'. Sonli'qtan indekslerdin' summasi' jup bolg'anda ku'shli difrakciyalig' maksimumlar, al taq bolg'anda (xlor menen ceziydin' bergin u'leslerinin' belgileri ha'r qi'yli') a'zzi difrakciyalig' maksimumlar payda boladi'. Keri pa'njeredegi tu'yinlerdin' bir birine sali'sti'rg'andag'i' jaylasi'wlari' boyi'nsha pa'njerenin' da'wirin, al ku'shli ha'm ha'lsiz maksimumlardi'n' izbe-izligi boyi'nsha pa'njerenin' bazislerindegi atomlardi'n' iyelegen ori'nlari'n' ani'qlaydi'.

Endi QOK pa'njerenin' strukturali'q faktori'n esaplaymi'z. Eger elementar quti'sha si'pati'nda kubti' qabi'l etsek, onda bazis 4 atomnan turadi' ha'm keri pa'njerenin' hkl tu'yini ushi'n mi'na formulani'n' ja'rdeminde esaplanadi':

$$F(hkl) = f\{1 + \exp[i\pi(h+k)] + \exp[i\pi(h+l)] + \exp[i\pi(k+l)]\}. \quad (1.26)$$

Bul jag'dayda

$F(hkl) = 4f$, eger barli'q indeksler jup yamasa taq bolsa,

$F(hkl) = 0$, eger indekslerdin' ishinde taq indeksler de, jup indekslerde bar bolsa.

Solay etip birdey jupli'qtag'i' indeksler ushi'n QOK pa'njerenin' strukturali'q faktori' nolge ten' emes, al ha'r qi'yli' jupli'qtag'i' indeksler ushi'n strukturali'q faktor nolge ten'.

Qaptalda oraylasqan kubli'q kristaldi'n' strukturali'q faktorlari' nolge ten' emes tu'yinler ko'lemde oraylasqan kubli'q pa'njereni payda etedi (buni' geometriyalig' jaqtan ko'rsetiw qi'yi'n emes). QOK pa'njerenin' rentgenogrammalari'nda (111), (200), (113), (220), (133), (222) ha'm tap sonday indekslerge iye kristallografiyalig' tegisliklerde difrakciyag'a ushi'ri'g'an tolqi'nlardi'n' refleksleri boladi'. Rentgenogrammada ha'r qi'yli' jupli'qqa iye indekslerge iye shashi'rawlardi'n' (reflekslerdin' yamasa difrakciyalig' daqlardi'n') bolmawi' QOK pa'njerenin' belgisi si'pati'nda qabi'l etiledi.

Bazisler quramali'raq quri'li'sqa iye bolg'anda strukturali'q faktordin' kompleks shamag'a aylani'wi', keri pa'njerenin' bir tu'yininen ekinshi tu'yinine o'tkende bazistegi atomlardi'n' jaylasi'w ni'zamlari' tiykari'nda o'zgeriwi mu'mkin. Solay etip strukturali'q faktor ha'r qi'yli' kristallografiyalig' tegisliklerde shashi'rag'an tolqi'nlardi'n' sali'sti'rmali' intensivligin ani'qlaydi'. Usi'g'an baylani'si' keri ma'seleni de sheshiw mu'mkin, yag'ni'y difrakciyag'a ushi'rag'an tolqi'nlardi'n' intensivligin o'lshew arqali' bazistegi atomlardi'n' iyelegen ori'nlari'n' ani'qlaw. Bul kristaldi'n' strukturasin' rasshifrovkalawg'a (ani'qlawg'a) mu'mkinshilik beredi. Ha'zirgi waqi'tlarg'a shekem bazisleri ju'zlegen, mi'n'lag'an, onnan da ko'p atomlarg'a iye kristallardi'n' quri'li'si' ani'qlandi'

Shashi'rawdi'n' atomli'q faktori'. Ayi'ri'm atomlarda shashi'rag'an tolqi'nlardi'n' amplitudalari'n' biz ha'zirshe qarag'ani'mi'z joq. Ayi'ri'm atomlarda shashi'rag'an tolqi'nni'n' amplitudasi'n beretug'i'n f_j shamasi'n shashi'rawdi'n' atomli'q faktori' dep ataydi'. Shashi'raw amplitudasi'ni'n' ma'nisin eksperimentte ani'qlaydi' yamasa teoriyalig' jollar menen esaplaydi'. Bunday esaplawlardi' ju'rgiziw ushi'n atomdi' zaryadti'n $\rho(\vec{r})$ tu'rindegi zaryadlardi'n' tarqali'wi' dep qaraw kerek. Oni'n' ushi'n atomdi' oyi'mi'zda sheksiz kishi dV ko'lem elementlerine bo'lemiz. Bunnan keyin $\rho(\vec{r})$ shamasi'n ha'm ha'r qi'yli' elementlerde shashi'rag'an tolqi'nlardi'n' fazalar ayi'rmasi'n esapqa ali'p barli'q elementler boyi'nsha to'mendegi formulani'n' ja'rdeminde summani' esaplaymi'z (biz joqari'da bazistin' strukturali'q faktori'n esaplawdi'n' sxemasi' boyi'nsha):

$$f(\mathbf{G}) = \sum_j \rho(\mathbf{r}_j) \exp(i\mathbf{r}_j \mathbf{G}) dV_j = \iiint \rho(\mathbf{r}) \exp(i\mathbf{r} \mathbf{G}) dV. \quad (1.27)$$

f shamasi' elektronlar menen fotonlardi'n' difrakciyasi'nda $|\vec{G}|$ vektori'ni'n' modulinen g'a'rezli. A'dette $|\vec{G}|$ shamasi' o'sse f tin' ma'nisi kemeyedi. f shamasi' u'lken nomerge iye atomlarda u'lken. Qara berse f shamasi' $|\vec{G}|$ ni'n' o'siwi menen u'lken o'lshemlerge iye atomlarda tezirek kemeyedi. Sebebi $|\vec{G}|$ ni'n' o'siwi menen atomni'n' ha'r qi'yli' bo'limleri ha'r qi'yli' fazada shashi'ratadi'. Elektronlari'ni'n' sanlari' bir birine jaqi'n atomlar ushi'n f shamalari'ni'n' ma'nisleri bir birine jaqi'n. Atomli'q faktor tek $|\vec{G}|$ dan g'a'rezli bolsa, onda onday atom sferali'q simmetriyag'a iye degen so'z. Difrakciyalig' eksperimentler o'tkerilgende f funkciyasi'ni'n' shamasi'n spravoshniklerde keltirilgen kestelerden aladi'.

Ma'seleler:

1-ma'sele. (1.14)-formula ja'rdeminde ani'qlang'an keru pa'njere vektori' $\vec{A}$ vektori'ni'n' $\vec{c}$ ha'm $\vec{b}$ vektorlari'na perpendikulyar ekenligin, al usi' $\vec{A}$ vektori'ni'n' modulini' $2\pi/d$ shamasi'na ten' ekenligin ko'rsetin'iz. Bul jerde d arqali' $\vec{c}$ ha'm $\vec{b}$ vektorlari' jatatug'i'n kristallografiyalig' tegislikler ushi'n tegislikler arasi'ndag'i' kashi'qli'q belgilengen.

Sheshimi. $\vec{a}$, $\vec{b}$ ha'm $\vec{c}$ vektorlari'nda sog'i'lg'an parallelipedtin' ko'leminin' olardi'n' aralas ko'beymesine, ekinshiden parallelipedtin' ultani'ni'n' (yag'ni'y $\vec{c}$ ha'm $\vec{b}$ vektorlari'ni'n' vektorli'q ko'beymesinin' module) biyikligine (yag'ni'y biz izlep ati'rg'an tegislikler arasi'ndag'i' qashi'qli'qqa) ko'beymesine ten' ekenligin eske tu'siremiz. Bul qatnastan d shamasi'ni'n' ma'nisinin' (1.14)-an'latpa boyi'nsha esaplang'an $\vec{A}$ vektori'ni'n' module ten' ekenligi kelip shi'g'adi'.

2-ma'sele. Kubli'q pa'njerege iye kristallarda $[hkl]$ bag'i'ti'ni'n' Miller indeksleri (hkl) bolg'an kristallografiyalig' tegisliklerge perpendikulyar ekenligin ha'm usi' tegislikten koordinatalar basi'na shekemgi qashi'qli'qti'n' $d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$ formulasi'ni'n' ja'rdeminde esaplanatug'i'nli'g'i'n ko'rsetin'iz. Basqa sistemalarg'a kiriwshi kristallar ushi'n bul formulani'n' duri's na'tiyjelerdi bermeytug'i'nli'g'i'n an'g'arami'z ha'm d_{hkl} shamalari'ni'n' ma'nislerin esaplaw ushi'n keru pa'njerenin' vektori'ni'n' uzi'nli'g'i'n esaplaw za'ru'rli'gi payda boladi'.

3-ma'sele. Parametrleri a ha'm s bolg'an ($a < c$) tetragonallig' pa'njere ushi'n keru pa'njerenin' vektorlari'n sog'i'n'i'z. Brillyuennin' birinshi zonasi'ni'n' su'wretin sali'n'i'z. Indeksleri (hkl) bolg'an kristallografiyalig' tegislikler semeystvosi' ushi'n tegislikler arasi'ndag'i' qashi'qli'q ushi'n $d_{hkl} = |\vec{G}(hkl)|/2\pi$ shamalari'n ani'qlan'i'z.

4-ma'sele. Parametrleri a ha'm s bolg'an ($a < c$) geksagonallig' pa'njere ushi'n keru pa'njerenin' vektorlari'n sog'i'n'i'z. Brillyuennin' birinshi zonasi'ni'n' su'wretin sali'n'i'z. Indeksleri (hkl) bolg'an kristallografiyalig' tegislikler semeystvosi' ushi'n tegislikler arasi'ndag'i' qashi'qli'q ushi'n $d_{hkl} = |\vec{G}(hkl)|/2\pi$ shamalari'n ani'qlan'i'z.

5-ma'sele. Keru pa'njerenin' 000, 110, 200 tu'yinleri arqali' o'tetug'i'n tegisliktegi KOK kristallar ushi'n Brillyuennin' birinshi zonasi'ni'n' kese-kesiminin' su'wretin sali'n'i'z.

2-bap. Kristallig' pa'njerenin' defektlari

Atomlari' qatan' tu'rde da'wirli jaylasqan kristallardi' ideal kristallar dep ataymi'z. Barli'q ideal kristallar idealli'q quri'li'sqa iye bolmaydi'. Quri'li'sti'n' idealli'qtan awi'tqi'wi'n

quri'li's defektlari dep ataw qabi'l etilgen. Quri'li's defektlarin dinamikali'q ha'm statikali'q dep ayi'radi'. Dinamikali'q defektlerge ji'lli'li'q terbelislerinin' aqi'betinde yamasa kristallar arqali' elektromagnit tolqi'nlari' o'tkende pa'njerelerdin' mayi'si'wlari'n jatqaradi'. Bul defektler atomlardi'n' ten' salmaqli'q awhallari'nan awi'si'wi' menen baylani'sli'. Sonli'qtan bunday defektler ha'tte ideal kristallarda da boladi'. Biz to'mende qaraytug'i'n statikali'q defektler kristalli'q pa'njeredegi atomlardi'n' jaylasi'wlari'ndag'i' buzi'li'wlar menen baylani'sli'. Mi'sali' pa'njerenin' tu'yininde atomni'n' bolmawi' yamasa basqa tu'rdegi atom menen almasi'wi' ori'n aladi'. Soni'n' menen birge atomlar kristalda toparlasi'p irirek defektti payda etiwu mu'mkin.

Statikali'q defektlerdi sol defektlerdin' formalari' tiykari'nda 4 toparg'a bo'ledi:

- 1). Noqatli'q defektler, mi'sali' pa'njerenin' tu'yininde atomni'n' bolmawi';
- 2). Si'zi'qli'q defektler bolg'an dislokაციyalar. Bunday defektlerde da'wirliktin' buzi'li'wi' bir si'zi'qti'n' boyi'nda ori'n aladi';
- 3). Betlik defektler. Bunday defektlerge kristaldi'n' beti yamasa polikristaldi'n' da'neshelerinin' betleri kiredi;
- 4). Ko'lemlik defektler bolg'an quwi'sli'qlar, mikrojarlari'qlar, basqa fazani'n' kishkene qaldi'qlari'ni'n' yamasa zarodi'shlari'ni'n' boli'wi' ha'm basqalar.

Kristallardi'n' ko'plegen fizikali'q qa'siyetleri ha'r qi'yli' toparlardag'i' defektlerge baylani'sli' ku'shli o'zgeredi. Mi'sali' materialdi'n' bekkemligi menen plastikli'gi si'zi'qli', betlik ha'm ko'lemlik defektlerge baylani'sli'. Elektr qarsi'li'g'i' tiykari'nan noqatli'q defektlerge baylani'sli'. Diffuziya koefficienti, ji'lli'li'q o'tkizgishlik, kristallardi'n' ren'i si'yaqli' qa'siyetler de noqatli'q defektlerge baylani'sli'.

Noqatli'q defektler

Noqatli'q defektler en' mayda defektler boli'p, olar a'dette bir atomni'n' a'tirapi'nda ori'n alg'an normal emes situაციyalar menen baylani'sli' (bir atomni'n' orni'nda bolmawi', bir atomni'n' orni'n ekinshi atomni'n' iyelewi yamasa «arti'q» atomni'n' payda boli'wi'). 2.1-su'wrette sxema tu'rinde ko'rsetilgen ha'r qi'yli' noqatli'q defektlerdi qaraymi'z

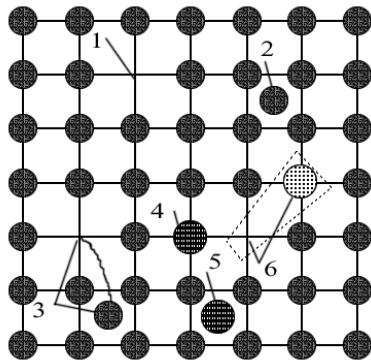
Vakansiya. Atom kristalli'q pa'njerenin' bazi' bir tu'yininde bolmawi' mu'mkin (2.1 (1)-su'wretti qaran'i'z). Usi'nday bos ori'n vakansiya dep ataladi'. Vakansiya kristallizaciya processinde jiyirek payda boladi', bir tu'yin tosi'nnan bos qaladi'. Eger eritpedegi kelesi atom baska atom ushi'n joldi' jabatug'i'n bolsa tu'yinnin' bos qali'wi' mu'mkin. Vakansiyalardi' Shotki defekti dep te ataydi'.

Tu'yinler arasi'ndag'i' atom. Atom kristalli'q pa'njerenin' tu'yininde emes, al atomlar arasi'nda – tu'yinler arasi'nda jaylasi'wi' mu'mkin (2.1 (2)-su'wret). Bunday defektti tu'yinler arasi'ndag'i' atom dep ataydi'. Tu'yinler arasi'ndag'i' atom da tiykari'nan vakansiyalar si'yaqli' kristallizaciya processinde payda boladi'. Atomlardi'n' biri tosi'nnan ji'lli'li'q qozg'ali'slari'ni'n' sebebini qon'si'las atomlardi'n' ortasi'na tu'sip qaladi'. Eger tu'yinlerdin' ortasi'na tu'sip qalg'an atomni'n' orni'n basqa atom iyelep qoyg'an bolsa, onda tu'yinler arasi'ndag'i' atom sol jag'dayda noqatli'q defekt tu'rinde qali'p qoyadi'.

Frenkel boyi'nsha defekt. Vakansiya menen tu'yinler arasi'ndag'i' atom ko'pshilik jag'daylarda jubi' menen payda boladi' (2.1 (3)-su'wretti qaran'i'z). Bunday jag'dayda tu'yinde turg'an atom tu'yinnin' ortasi'na sekirip o'tedi. Sali'sti'rmali' joqari' temperaturalarlag'i' ji'lli'li'q qozg'ali'slari' bunday sekirip o'tiwidin' tiykarg'i' sebei boli'p tabi'ladi'. Soni'n' menen birge bunday sekirip o'tiwlerdi si'rttan ushi'p kelgen bo'leksheler de a'melge asi'ra aladi' (radiaciya'li'q defekt). Defektlerdin' usi'nday jubi'n Frenkel boyi'nsha defektler dep ataydi'.

Qosi'mta atom. Atomlardi'n' biri qosi'mtani'n' (kristalg'a kirgizilgen qosi'mta) atomi' menen almasqan boli'wi' mu'mkin (2.1 (4)-su'wretti qaran'i'z). Bunday jag'dayda

almasti'ri'wshi' qosi'mta atom dep atali'wshi' defekt payda boladi'. Qosi'mta atom tuyinler arasi'na kirip jaylasa aladi' (2.1 (5)-su'wret). Bunday defektti endirilgen qosi'msha atom dep ataymi'z. Bunday endirilgen atomlar a'dette endirilgen zatti'n' atomlari' kristaldi'n' atomlari'nan kishi bolg'an, tu'yinler ortalari'nda bunday atomlar ushi'n ori'nlari' bolg'an jag'daylarda ju'zege keledi. Vodorod, bor, uglerod atomlari' ko'pshilik jag'daylarda endirilgen qosi'msha atomlardi'n' ori'nlari'n iyeleydi. Eger qosi'mtalardi'n' atomlari'ni'n' o'lshemleri kristaldi'n' atomlari'ni'n' o'lshemlerinen u'lken bolsa, endirilgen atomlar kristaldi'n' atomlari'n almasti'radi'.



2.1-su'wret.

Noqatli'q defektlar din' tipleri: 1 - vakansiya; 2 - tu'yinler arasi'ndag'i' atom; 3 - Frenkel boyi'nsha defekt; 4 - almasti'ri'wshi' qosi'mta atomi'; 5 - endirilgen qosi'mta atomi'; 6 - u'lken valentlikke iye almasti'ri'wshi' atom.

Ko'pshilik jag'daylarda valentligi menen ayri'latug'i'n qosi'mta atomlari' vakansiyalardi'n' payda boli'wi'na ali'p keledi. Bunday jag'day *KCl* kristallari'na *Ca* atomlari'n kirgizgende ori'n aladi'. Bunday jag'dayda kristal neytralli'g'i'n saqlaydi' ha'm eki valentli kalciya atomi' bir kaliy atomi'ni'n' ornin' almasti'radi', al kaliy atomi' turatug'i'n ori'n bos ori'ng'a aylanadi' (2.1 (6)-su'wretti qaran'i'z).

Noqatli'q defekttin' energiyasi' ha'm oni'n' payda boli'w itimalli'g'i'. Noqatli'q defekttin' payda boli'wi' ushi'n E_V energiyasi' talap etiledi: vakansiya jag'dayi'nda atomdi' kristaldi'n' betine shi'g'ari'w ushi'n kerek bolatug'i'n energiya; endirilgen atomda kristaldi'n' betinen atomdi' tu'yinler arasi'na jaylasti'ri'w ushi'n kerek bolatug'i'n energiya. Bul energiyani'n' mug'dari' shama menen 1 eV shamasi'n quraydi'.

Noqatli'q defekttin' payda boli'w itimalli'g'i' Bolcman formulasi'ni'n' ja'rdeminde esaplanadi':

$$P = \frac{N_d}{N_{at}} = \exp(-E_V/kT). \quad (2.1)$$

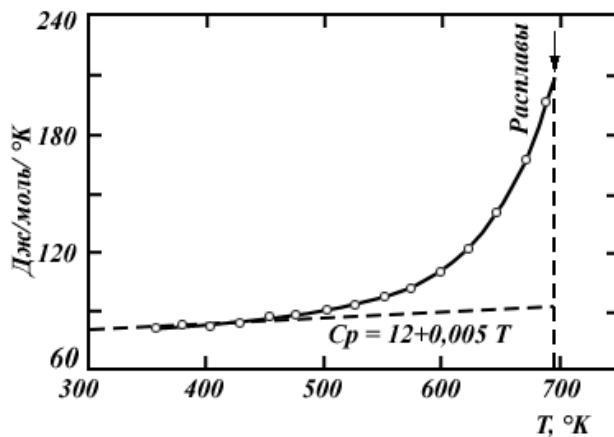
Bul formula boyi'nsha esaplang'an itimalli'qti'n' ma'nisinin' qanday bolatug'i'nli'g'i'n ani'qlaymi'z. Meyli $E_V = 1$ eV, $T = 1000$ K bolsin. Bunday jag'dayda $P \approx 10^{-5}$. To'menirek temperaturalarda defektlar din' ti'g'i'zli'g'i' eksponencialli'q ni'zam boyi'nsha kemeyedi ha'm o'jire temperaturalari'nan kishi temperaturalarda ju'da' kishi shamag'a aylanadi'. Biraq to'mengi temperaturalarda da noqatli'q defektlar din' koncentraciyasi'n joqari' etiwge boladi'. Oni'n' ushi'n kristaldi' joqari' temperaturalarg'a shekem qi'zdi'rami'z ha'm bunnan keyin keskin tu'rde salqi'nlatami'z (yag'ni'y kristaldi' shi'ni'qti'rami'z, taplaymi'z). Bunday jag'dayda noqatli'q defektlar din' koncentraciyasi' joqari' temperaturalardag'i' koncentraciyag'a sa'ykes keledi.

Frenkel boyi'nsha defektlar de defektlar jubi'n (vakansiya menen tu'yinler arasi'ndag'i' atom) payda etiw ushi'n za'ru'rli bolg'an energiyani'n' ma'nisin E_{Fr} arqali' belgileydi. Oni'n' san shamasi' atomdi' kristaldi'n' betine shi'g'ari'w ushi'n kerek bolg'an energiya menen kristaldi'n' betinen tu'yinler ortasi'na atomdi' ji'li'sti'ri'w ushi'n kerek bolg'an energiyani'n' qosi'ndi'si'nan turadi'. Usi'nday defektlar din' sani'ni'n' to'mendegidey formulani'n' ja'rdeminde ani'qlanatug'i'nli'g'i'n ko'rsetiwge boladi':

$$N_{Fr} = (N_A N_M)^2 \exp(-E_{Fr}/2kT). \quad (2.2)$$

Bul an'latpada N_A menen N_M arqali' kristaldag'i' tu'yinler menen tu'yinler arasi'ndag'i' ori'nlar sanlari' belgilengen.

Temperaturani'n' joqari'lawi' menen defektlerdin' ten' salmaqli'q sani' joqari'laydi' ha'm olardi'n' jan'adan payda boli'wi' ushi'n qosi'msha energiya talap etiledi. Sonli'qtan ayi'ri'm kristallarda balqi'w (eriw) temperaturasi'na jaqi'n temperaturalarda qi'zdi'ri'wdi'n' bari'si'nda defektlerdin' sani' azmaz ko'beyedi. Usi'ni'n' saldari'nan ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'ni'n' kristalli'q pa'njerenin' terbelislerine baylani'sli' bolg'an mollik ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'ni'n' ma'nisine shekemgi o'siw effekti baqlanadi'. Bul jag'day 2.2-su'wrette keltirilgen.



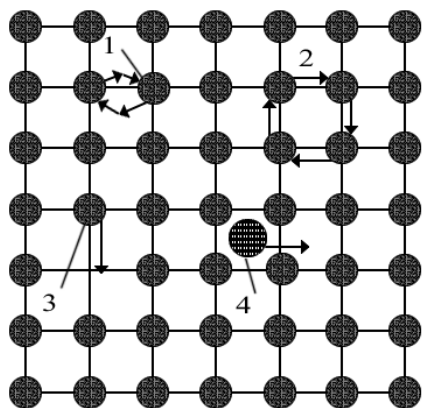
2.2-su'wret.
Balqi'w (eriw) temperaturasi' jani'nda
noqatli'q defektlerdin' payda
boli'wi'ni'n' ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'na
qosatug'i'n u'lesi.

Noqatli'q defektlerdin' diffuziyag'a ta'siri. Noqatli'q defektler kristallardag'i' diffuziyani'n' tezligine ha'm dielektrik kristallardi'n' elektr o'tkizgishligine en' u'lken ta'sir etedi. Da'slep kristallardag'i' diffuziyani'n' mu'mkin bolg'an barli'q mexanizmlerin ko'rip shi'g'i'wg'a toqtaymi'z.

Kristallardi'n' atomlar bir ori'nnan ekinshi ori'ng'a ko'ship o'te aladi' (sekirip o'te aladi', atlap o'te aladi'). Usi'nday ko'ship o'tiwlerdin' variantlari' 2.3-su'wrette keltirilgen. Eki yamasa to'rt atom bir biri menen ori'n almasti'ra aladi' (2.3 (1, 2)-su'wretler). Atomg'a en' an'sati' vakansiyag'a ko'ship o'tiw boli'p tabi'ladi' (2.3 (3)-su'wret). Tu'yinler arasi'nda turg'an atomg'a da (eger oni'n' o'lshemleri u'lken bolmasa) bir ori'nnan ekinshi ori'ng'a ko'ship o'tiw de qi'yi'n emes (2.3 (4)-su'wret). Sonli'qtan qatti' denelerdeg'i' diffuziyani'n' tiykarg'i' mexanizmi mi'nalar boli'p tabi'ladi':

Vakansiyali'q mexanizm. Bul mexanizm vakansiyalardi'n' a'tirapi'nda atomlardi'n' qaytadan toparlasi'wi' menen baylani'sli' (2.3 (3)-su'wret);

Tu'yinler arali'q mexanizm. Bul jag'day tu'yinler arasi'nda sali'sti'rmali' mayda atomlardi'n' ko'shewleri menen baylani'sli' (2.3 (4)-su'wret).



2.3-su'wret.

Kristallardag'i diffuziyani'n en' ko'p tarqalg'an mexanizmleri: 1 – qon'si'las atomlardi'n bir biri menen ori'n almasti'ri'wi'; 2 – bir neshe qon'si'las atomlardi'n bir biri menen ori'n almasti'ri'wi'; 3 – atomni'n vakansiyag'a sekirip o'tiwi; 4 – tu'yinler arasi'nda turg'an atomlardi'n qon'i'si' tu'yinler arasi'na sekirip o'tiwi.

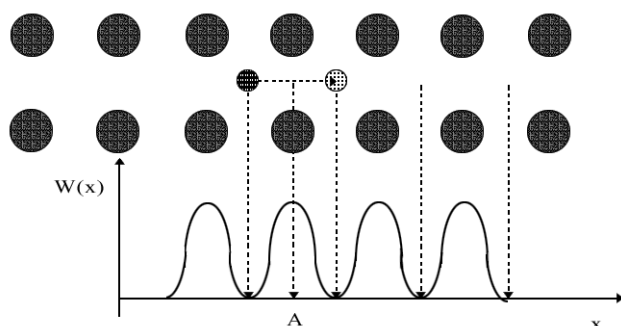
Barli'q jag'daylarda da atomlar potentsialli'q barer arqali' o'tedi. Potentsialli'q barerdin' payda boli'wi' atomlar bir birine jaqi'nlag'anda payda bolatug'i'n kvantli'q iytirilis ku'shleri menen baylani'sli'. Tu'yinler arasi'nda turg'an atomni'n qon'si'las tu'yinlerdin' arasi'na ko'ship o'tiwin tallaw ushi'n en' a'piwayi' jag'daydi' qarap o'temiz. 2.4-su'wrette tu'yinler arasi'nda turg'an atomni'n energiyasi'ni'n x koordinatasi'nan g'a'rezligi ko'rsetilgen. Usi'nday ko'shiw ushi'n za'ru'rli bolg'an energiyani'n shamasi' aktivaciya energiyasi' dep ataladi' ha'm E_a arqali' belgilenedi. Aktivaciya energiyasi'ni'n ma'nisi a'dette ji'lli'li'q energiyasi'ni'n ($\approx kT$) ortasha ma'nisinen a'dewir u'lken. Bunday waqi'yani'n itimalli'g'i ju'da' kishi ha'm Bolcman formulasi' menen beriledi:

$$P = P_0 \exp(-E_a / kT) \quad (2.3)$$

Sonli'qtan kristallardag'i atomlar uzaq waqi'tlar dawami'nda o'zlerinin' ten' salmaqli'q awhallari' a'tirapi'nda bazi' bir v jiyiligi menen terbeledi ha'm ji'lli'li'q terbelislerinin' energiyasi' tosi'nnan aktivaciya energiyasi'nan u'lken bolg'an jag'daylarda jan'a ori'nlarg'a sekirip (ko'ship) o'te aladi'. Usi'nday ko'ship o'tiwlerdin' jiyiligin f arqali' belgileymiz ha'm bul shama bi'layi'nsha ani'qlanadi':

$$f = vP. \quad (2.4)$$

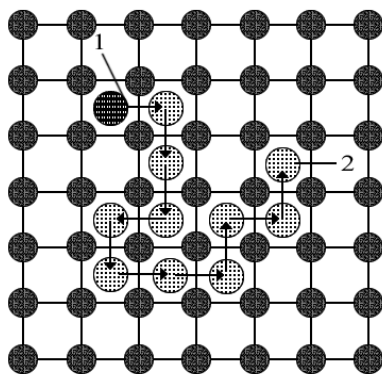
Solay etip qatti' denelerdeg'i atom siyrek bolatug'i'n sekiriwler joli' menen bir ori'nnan a qashiqli'g'i'ndag'i' ekinshi ori'ng'a f jiyiligi menen ko'shedi. Bul jag'day 2.5-su'wrette keltirilgen.



2.4-su'wret.

Tu'yinler arasi'nda turg'an atomni'n energiyasi'ni'n x koordinatasi'nan g'a'rezligi. Atomni'n energiyasi' tu'yinler arasi'nda minimalli'q ma'nisine, al A jag'daylari'nda maksimalli'q ma'nisine iye.

Joqari'da keltirilgen modeldin' ja'rdemi menen parametri a bolg'an a'piwayi' kubli'q pa'njere ushi'n tu'yinler arasi'nda turg'an atomlardi'n diffuziya koeffitsientin esaplaymi'z. Meyli berilgen tu'yinler arasi'ndag'i' ori'nnan qon'si'las sonday ori'ng'a ko'shiwdin' jiyiligi f shamasina ten' bolsi'n.



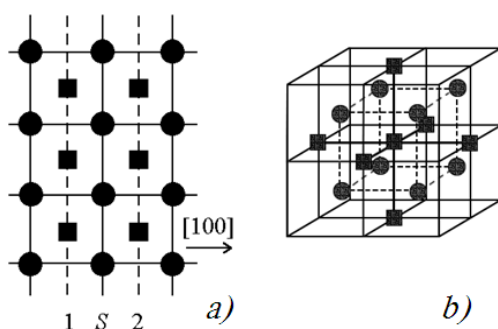
2.5-su'wret.

A'piwayi' (primitivlik) kubli'q pa'njeredegi tu'yinlar arasi'nda turg'an atomni'n' diffuziyasi'ni'n' sxema tu'rindegi su'wreti.

Fiktin' diffuziya ni'zami'n eske tu'siremiz. Bul ni'zam S maydani'nan o'tip ati'rg'an atomlar sani'ni'n' ag'i'mi' dN/dt shamasi'n ha'm koncentraciyalar gradienti dC/dx shamasi'n bir biri menen baylani'sti'radi':

$$\frac{dN}{dt} = -DS \left(\frac{dC}{dx} \right). \quad (2.5)$$

D parametri diffuziya koeffitsienti dep ataladi'. Oni'n' ma'nisi diffuziyag'a ushi'raytug'i'n atomg'a ha'm usi' atomlar diffuziyag'a ushi'raytug'i'n zatqa baylani'sli'. Kristaldag'i' $[100]$ bag'i'ti'n, og'an perpendikulyar ha'm pa'njerenin' tu'yinlari arqali' o'tiwshi S tegislikti (2.6 a su'wrette do'n'gelekler menen belgilengen), usi' tegisliktin' on' ha'm shep ta'replerinde turg'an ja'ne 1 ha'm 2 arqali' belgilengen, S tegisligine parallel bolg'an en' jaqi'n eki tegislikti qaraymi'z (kvadratlar menen belgilengen). 1 ha'm 2 tegisliklari arasi'ndag'i' qashi'qli'q (bul kashi'qli'q qon'si'las tu'yinlar arasi'ndag'i' ori'nlar arasi'ndag'i' qashi'qli'qqa ten') a shamasina ten' («ko'ship o'tiw uzi'nli'g'i'»). Meyli 1 tegisliginin' S tu'yinlar arasi'ndag'i' N_1 atom bolsi'n, 2 tegisliginin' tap sonday ushastkasi'nda N_2 atom jaylasqan dep esaplayi'q (2.6 a su'wretti qaran'i'z).



Ris. 2.6.

Kubli'q primitivlik pa'njeredegi tu'yinlar menen tu'yinlar arasi'ndag'i' ori'nlarini' jaylasil'wlarini' (a). Usi' pa'njerege jaqi'n jaylasqan tu'yinlar arasi'ndag'i' ori'nlar (b).

Endi x noqatlari'ndag'i' diffuziya ni'zami'na kiriwshi tu'yinlar arasi'ndag'i' atomlari'n sa'ykes koncentraciyalari' bolg'an C_1 ha'm C_2 shamalari'ni'n' ma'nislerin de esaplaw mu'mkin.

$$C_1 = N_1 / \Delta V = N_1 / (Sa); \quad C_2 = N_2 / \Delta V = N_2 / (Sa). \quad (2.6)$$

ten'liklerinin' ori'nlanatug'i'ni' o'z-o'zinen tu'sinikli. Δt waqiti'ti' ishinde S beti arqali' shep ta'repten on' ta'repke qaray kesip o'tetug'i'n atomlar sani' ΔN_1 shamasini' esaplaymi'z. Birinshi tegisliktegi ha'r bir atom en' jaqi'n jaylasqan alt'i' ori'nni'n' birewine ko'ship o'te

aladi' (2.6 b su'wretke qaran'i'z). Olardi'n' tek birewi g'ana saylap ali'ng'an orayli'q tegislikti kesip o'tedi. Bunday jag'dayda

$$\Delta N_1 = (1/6)f N_1 \Delta t \quad (2.7)$$

Δt waqi'ti' ishinde S beti arqali' o'tetug'i'n ΔN_2 atomlar sani'n da tap sonday jollar menen esaplaymi'z:

$$\Delta N_2 = (1/6)f N_2 \Delta t \quad (2.8)$$

Tegislik arqali' o'tetug'i'n atomlardi'n' uli'wmali'q sani' mi'nag'an ten' boladi':

$$\Delta N = \Delta N_1 - \Delta N_2 = (1/6)f(N_1 - N_2)\Delta t = (1/6)f\Delta t(C_1 - C_2)Sa \quad (2.9)$$

$C_1 - C_2 = -(dC/dx)a$ ekenligin esapqa alsaq to'mendegige iye bolami'z:

$$\Delta N / \Delta t = -(1/6)f((dC/dx)a)Sa \quad (2.10)$$

(2.10) menen (2.5) ti sali'sti'ri'p diffuziya koefficientin alami'z:

$$D = fa^2 / 6 \quad (2.11)$$

Tap usi'nday sxema tiykari'nda 2.3-su'wrette keltirilgen basqa da jag'daylar ushi'n diffuziya koefficientin esaplaw mu'mkin. Sol su'wrettegi 1- ha'm 2- jag'daylardag'i' aktivaciya energiyasi'ni'n' ma'nisleri 3- ha'm 4-jag'daylardag'i' aktivaciya energiyasi'ni'n' ma'nislerinen u'lken boladi'. Atomlar vakansiyanini'n' a'tirapi'nda ori'nlari'n almasti'rg'an jag'dayi'ndag'i' aktivaciya energiyasi'ni'n' ma'nisi onnan da u'lken.

2.3-su'wrette keltirilgen diffuziyalardi'n' barli'g'i' ushi'n da diffuziya koefficienti menen temperatura arasi'nda to'mendegidey eksponencialli'q baylani's ori'n aladi':

$$D = D_0 \exp(-E_a / kT) \quad (2.12)$$

D_0 menen E_a parametrlarinin' ma'nisleri ha'r bir jup ushi'n (diffuziyalani'wshi' element – diffuziya qubi'li'si' ju'retug'i'n zat) ushi'n eksperimentte o'z aldi'na ani'qlanadi'. Na'tiyjeler 2.1-kestede berilgen.

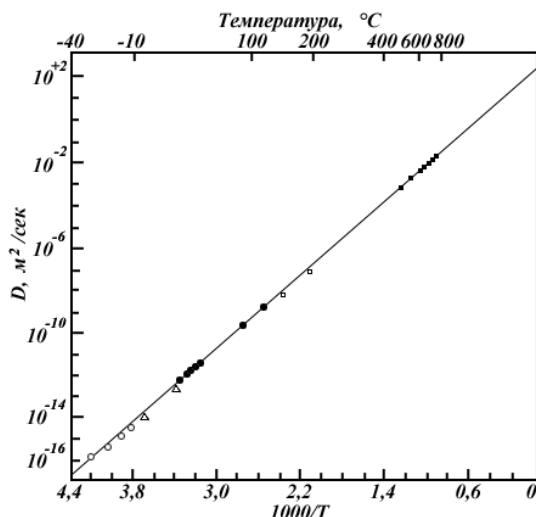
2.1-keste.

Bazi' bir diffuziyalani'wshi' element – diffuziya qubi'li'si' ju'retug'i'n zat ushi'n D_0 ha'm E_a parametrleri

Elementi'	$D_0, m^2/s$	E_a, eV
Ge ishindeg'i Ge	$7,8 \cdot 10^{-4}$	3,0
Ge ishindeg'i As	$6,0 \cdot 10^{-4}$	2,5
Ge ishindeg'i P	$2,0 \cdot 10^{-4}$	2,5
Ge ishindeg'i In	$6,0 \cdot 10^{-6}$	2,5
Ge ishindeg'i B	$4,0 \cdot 10^{-4}$	4,5
Al ishindeg'i Cu	$2,3 \cdot 10^{-4}$	1,45

Cu ishindeg'i Cu	$2,0 \cdot 10^{-5}$	2,05
Cu ishindeg'i Zn	$3,4 \cdot 10^{-5}$	1,98
Fe (KOK temir) ishindeg'i C	$2,0 \cdot 10^{-5}$	0,9
U ishindeg'i U	$1,8 \cdot 10^{-7}$	1,20

2.7-su'wrette uglerodti'n' KOK temirdeg'i diffuziyasi' koefficientinin' temperaturadan g'a' rezlig'i keltirilgen. Bul su'wrette 2.12-an'latpani'n' da'l ori'nlanatug'i'nli'g'i' ko'rinip tur.



2.7-su'wret.

Uglerodti'n' KOK temirdeg'i diffuziyasi' koefficientinin' temperaturadan g'a' rezlig'i.

Joqari'da ko'rip o'tilgen modeldin' ja'rdeminde atomni'n' $t = \frac{N}{t_1} = N/f$ waqi'ti' arali'g'i'nda ju'rip o'tetug'i'n ortasha joli' bolg'an $\langle x^2 \rangle$ shamasini'n' ma'nisin esaplaw mu'mkin. Bul jerde $t_1 = 1/f$ arqali' birinen son' biri bolatug'i'n eki ko'shiw arasi'ndag'i' ortasha waqi't belgilengen. Buni'n' ushi'n $\langle x^2 \rangle$ shamasin buri'ng'i' ko'shiwlerden pu'tkilley g'a'rezsiz dep esaplaymi'z. Bunday jag'dayda

$$\langle x^2 \rangle = a^2 N / 3 = a^2 f t / 3 = a^2 D t \quad (2.13)$$

formulasi'n alami'z. Bul formula D shamasin eksperimentte ani'qlaw ushi'n paydalani'ladi'.

Qatti' denelerdeg'i diffuziyani' ha'zirgi waqi'tlari' «tamg'a sali'ng'an» atomlar usi'li'n paydalani'p effektivli tu'rde u'yrenedi. Bunday izertlewlerde zatlaridin' betine radioaktivli «tamg'a sali'ng'an» atomlar «oti'rg'i'zi'ladi'». Bunnan keyin ali'ng'an u'lgi berilgen temperaturada «tamag'a sali'ng'an» atomlardin' 0,3-1 mm teren'likke o'tetug'i'nday waqi't ishinde uslap turi'ladi'. Bunnan keyin u'lginin' aktivlig'i o'lshenedi. Bul qatlam i'sqi'lap tegislew joli' menen joq etilgennen keyin aktivlik qaytadan o'lshenedi. Bunday operaciylardi' bir neshe ret qaytalaydi'. Usi'nday jollar menen «tamg'a sali'ng'an» atomlardin' o'tiwinin' ortasha teren'ligi ha'm berilgen temperaturadag'i' D diffuziya koefficientin esaplaydi'. Ha'r qi'yli' temperaturalarda ta'jiriybeler seriyasi'n o'tkeriw joli' menen (2.12)-formuladag'i' D_0 menen E_a parametrlarinin' ma'nisleri ani'qlanadi'.

(2.3)- ha'm (2.4)-formulalar ja'ne 1.1-kestedeg'i mag'li'wmatlar ja'rdeminde ha'r qi'yli' temperaturadag'i' atomlardin' ko'shiw jiyiliklerin bahalaw mu'mkin. Mi'sali' alfa-temirde 1800 K temperaturada uglerod atomi' 1 sekundta 10^{11} ret ko'shedi. O'jire temperaturasi'nda bolsa onlag'an sekundta 1 ret ko'shedi. Solay etip diffuziya sezilerliktey ori'ndi' balqi'w temperaturasi'na jaqi'n temperaturalarda iye bola aladi' eken. Nikeldin' yamasa xramnni'n' o'jire temperaturalarinda temirde derlik o'tpeytug'i'nli'g'in belgili. Biraq 1000-1300 K temperaturalarda bul process a'dewir tezleniwdi. Soni'n' ushi'n temirde islengen buyi'mlardin' betine qozg'awshi' nikel yamasa xrom qatlami' joqari' temperaturalarda

diffuziyani' ja'rdeminde payda etedi eken. Yari'm o'tkizgishke ha'r qanday aralaspalari' kirgiziw (legirovanie poluprovodnika, yari'm o'tkizgishti legiruy) ushi'n qi'sqa waqitlar ishinde qi'zdi'ri'wlar integralli'q sxemalardi' ali'w ushi'n qollani'ladi': shan'landi'ri'w joli' menen yari'm o'tkizgishtin' betinin' belgili bir ushastkalari'na tu'sirilgen aralaspalardi' (legirlewshi aralaspalardi') bir neshe ju'z gradusqa qi'zdi'ri'w joli' menen diffuziyalaydi' ha'm oni' legirleydi. Na'tiyjede kristalda p ha'm n tipindegi yari'm o'tkizgishlerdin' quramali' oblastlari' payda boladi'.

Defektlerdin' ori'n almasti'ri'wi'ni'n' esabi'nan ju'retug'i'n diffuziya zatlardag'i' defektlerdin' sani'ni'n' kem-kemnen o'zgeriwinin' basli' mexanizmi boli'p. (2.1)-formula boyi'nsha zatti'n' balqi'w temperaturasi'nan a'dewir to'men temperaturalarda defektlerdin' payda boli'w itimalli'g'i' ju'da' kishi. Biraq defektlerdin' sani' a'dette ko'p ese u'lken boladi'. Sebebi olar joqari' temperturalarda payda boladi': kristaldi'n' o'siw bari'si'nda yamasa joqari' temperaturadan shi'ni'qti'ri'w bari'si'nda. Defektlerdin' ti'g'i'zli'g'i' kem-kemnen kishireydi. Bul qubi'li's tu'yinler arasi'nda turg'an atomlardi'n' vakansiyalarg'a o'tiwinin' (buni' defektlerdin' rekombinaciyasi' dep ataydi') yamasa defektlerdin' kristaldi'n' betine yamasa kristaldag'i' da' nesheler arasi'ndag'i' shegarag'a o'tiwinin' saldari'nan ju'zege keledi. Ayi'ri'm jag'daylarda noqatli'q defektler bolg'an qosi'mta toparlasadi' ha'm jan'a kristalli'q faza oblastlari'n payda etedi. Bul processlerdin' barli'g'i' da defektlerdin' emleniwi dep ataladi'.

Noqatli'q defektlerdin' elektr o'tkizgishlikke ta'siri. Eger zonali'q teoriya tiykari'nda esaplawlar o'tkerilse haqi'yqi'y kristallardi'n' elektr o'tkizgishligi ideal kristal-dielektriktin' elektr o'tkizgishliginen a'dewir joqari' boli'p shi'g'adi'. Bul jag'day to'mendegidey eki sebepke baylani'sli':

Birinshiden donorli'q ha'm akceptorli'q qosi'mtalar dielektriktin' elektr o'tkizgishligin joqari'latadi' (tap yari'm o'tkizgishlerdegi si'yaqli').

Ekinshiden ionli'q kristallardi'g'i' vakansiyalardi'n' tusi'nan ionlardi'n' zaryadti' ali'p ju'riwinin' jen'illeniwi menen baylani'sli'. Bul jag'day sxema tu'rinde 2.3-su'wrette keltirilgen. Eger 3 vakansiyada on' zaryadlang'an ionni'n' turi'wi' kerek bolg'an bolsa ha'm ol $\vec{E}$ elektr maydani'nda jaylasqan bolsa, onda bul vakansiyag'a on' zaryadlang'an ionni'n' $\vec{E}$ nin' bag'i'ti'nda sekirip o'tiwinin' itimalli'g'i' $\vec{E}$ ge qarama-qarsi' bag'i'tta sekirip o'tiwinin' itimalli'g'i'nan joqari' boladi'. On' zaryadlang'an ionlar ortasha si'rtqi' elektr maydani'ni'n' bag'i'ti'nda qozg'aladi' ha'm elektr o'tkizgishlikke ta'sir etedi. Tap sol si'yaqli' teris zaryadlang'an iong'a $\vec{E}$ bag'i'ti'nda qozg'alg'ang'a qarag'anda $\vec{E}$ nin' keru bag'i'ti'nda qozg'alg'an uti'mli'raq. Soni'n' ushi'n teris zaryadlang'an ionlar $\vec{E}$ nin' bagi'ti'na qarama-qarsi' bag'i'tta qozg'aladi' ha'm elektr o'tkizgishlikke o'zinin' u'lesin qosadi'. Eki jag'dayda da vakansiya kristal boyi'nsha ori'n almasti'ri'p zaryadti'n' ko'shiwin tamiyinleydi. Biraq haqi'yqati'nda zaryadti' ionlar tasi'ydi' ha'm olar (on' ha'm teris zaryadlang'an ionlar) vakansiyalardi'n' a'tirapi'nda ha'r qi'yli' boli'p toparlasadi'. Bunday jag'daylarda zaryadti' ko'shiriwdin' vakansiyali'q mexanizmi haqqi'nda ga'p etedi (biz to'mende yari'm o'tkizgishlerdin' elektr o'tkizgishliginin' tesikleshik mexanizma haqqi'nda ga'p etemiz). Bunday mexanizm boyi'nsha zaryadlardi' ko'shiriw ushi'n a'dewir kishi potentsialli'q barerden o'tiwdi talap etedi. Al elektrondi' ionnan iong'a o'tkeriw ushi'n u'lken potentsialli'q barerden o'tiw kerek boladi'.

Tu'yinler arasi'nda turg'an ion da (4 arqali' belgilengen, 2.3-su'wretti qaran'i'z) ko'binese si'rttan tu'sirilgen elektr maydani' $\vec{E}$ nin' bag'i'ti'nda ji'li'sadi' (bir ori'nnan ekinshi ori'ng'a sekirip o'tedi).

Noqatli'q defektlerdin' kristallardi'n' ren'ine ta'siri. Qosi'mta atomlar kristallardi'n' ren'in o'zgertedi. Mi'sali' almasti'ri'w qosi'mtalari' (primesi zamesheniya) bolg'an xrom ionlari' Al_2O_3 kristallari'ni'n' qi'zi'l ren'in ta'miyinleydi (rubin kristalli' ali'nadi'), al Al_2O_3 kristallari'na kirgizilgen titan ionlari' olarg'a ko'k ren' beredi (safir kristalli' ali'nadi').

Noqatli'q defektlerdi u'yreniw usi'llari'. Ko'lem birligindegi vakansiyalardi'n' sani'n ani'qlaw ushi'n a'dette to'mendegidey eki na'tiyje sali'sti'ri'li'p ko'riledi: birinshisi rentgenografiyalig'q usi'llardi'n' ja'rdeminde ali'ng'an pa'njere parametrimin' da'l ma'nisi, ekinshisi zatti'n' ti'g'i'zli'g'i'n da'l ani'qlaw (kristaldi'n' massasi'ni'n' ko'lemine qatnasi'ni'n' shamasi'n da'l ani'qlaw). Vakansiyalardi'n' kristalli'q pa'njerenin' parametrimin' azmaz g'ana, biraq kristaldi'n' ko'lemin sezilerliktey o'zgertetug'i'nli'g'i' belgili. Usi'nday jollar menen joqari' emes da'llikte kristaldi'n' ko'lem birligindegi tu'yinler arasi'ndag'i' atomlardi'n' sani'n ani'qlaw mu'mkin. Sebebi tu'yinler arasi'nda jaylasqan atomlar zatti'n' ti'g'i'zli'g'i'n a'dewir u'lkeytedi, al kristalli'q pa'njerenin' parametrimin' shamasi'n az shamag'a o'zgertedi. Eger kristalda vakansiyalar da, tu'yinler arasi'nda jaylasqan atomlar da bar bolatug'i'n bolsa, onda joqari'da bayanlang'an usi'ldi'n' ja'rdeminde kristaldi'n' ko'lem birligindegi vakansiyalar sani' menen tu'yinler arasi'ndag'i' atomlar sani'ni'n' ayi'rmasi'n bahalawg'a boladi'. Al Frenkel boyi'nsha defektlerdin' ti'g'i'zli'g'i'n qarap o'tilgen usi'ldi'n' ja'rdeminde ani'qlaw mu'mkin emes.

Joqari'da qarap o'tilgen elektr qarsi'li'g'i' menen diffuziyani' o'lshevi, soni'n' menen birge ha'r qi'yli' elektromagnit nurlari'ni'n' juti'li'w koefficientlerinin' ma'nisin o'lshevi kristallardag'i' noqatli'q defektlerdi u'yreniwge mu'mkinshilik beredi.

Ma'seleler.

1-ma'sele. Eger vakansiyani'n' payda boli'wi' ushi'n za'ru'rli bolg'an energiyani'n' shamasi' 1 eV qa ten' bolsa 300 K ha'm 900 K temperaturalari'ndag'i' vakansiyalardi'n' ten' salmaqli'q koncentraciyalari'n tabi'n'i'z.

Ko'rsetpe. (2.1)-formuladan paydalani'w kerek.

2-ma'sele. 3 saat dawami'nda 300 K ha'm 1500 K temperaturalarda temirdin' betlik qatlami'na uglerod atomlari'ni'n' qanday teren'likke o'te alatug'i'nli'g'i'n bahalan'i'z. Uglerodti' o'z ishine alatug'i'n ortalig'qti' temirdin' betine tiyib tur dep esaplaw kerek. Diffuziya koefficientinin' ma'nisin 2.1-kestede keltirilgen mag'li'wmatlar boyi'nsha esaplaw talap etiledi. Shi'ni'qti'ri'w menen juwmaqlanatug'i'n tap usi'nday operaciya beti qatti', al o'zegi jumsaq detallardi' ali'w ushi'n qollani'ladi'. KOK temirdin' (ko'lemde oraylasqan kubli'q temirdin') pa'njeresinin' parametri 0,288 nm shamasi'na ten'.

Ko'rsetpe. (2.12)- ha'm (2.13)-formulalardan paydalani'w kerek.

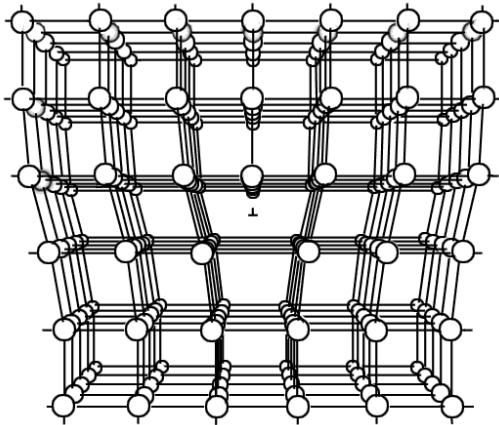
2.2. Dislokაციyalar

Dislokაციyalar dep atalatug'i'n kristalli'q pa'njerenin' si'zi'qli' defektlerin toli'g'i'raq u'yreniw olardi'n' barli'q konstruksiyali'q kristalli'q materiallardin' bekkemligi menen plastikligine u'lken ta'sir etetug'i'nli'g'i'na baylani'sli'. Defektlerdin' usi' tipin esapqa almag'an kristallardi'n' bekkemligi teoriyalari' ha'tte monokristalli'q ha'm polikristalli'q materiallardin' a'melde baqlani'p ju'rgen mexanikalig'q qa'siyetlerin tu'sindirip bere almadi'.

Dislokაციyalardi'n' tipleri. Dislokაციyalardi' shetlik ha'm vintlik dep ekige bo'ledi. Biraq eksperimentlerde baqlani'p ju'rgen dislokაციyalar tek ayi'ri'm jag'daylarda g'ana sol dislokაციyalardi'n' modellik tiplerinin' ekewinin' biri boli'wi' mu'mkin. Sebebi a'dette dislokაციyalar eki tiptin' de elementlerine iye boladi'. Ko'rgizbelilik ushi'n modellik dislokაციyalardi' u'yreniwdi baslaymi'z. A'piwayi'li'q ushi'n a'piwayi' kubli'q pa'njereni qaraymi'z. Ali'ng'an na'tiyjeler azmaz o'zgerisler menen basqa tiptegi pa'njerele ushi'n da duri's boladi'.

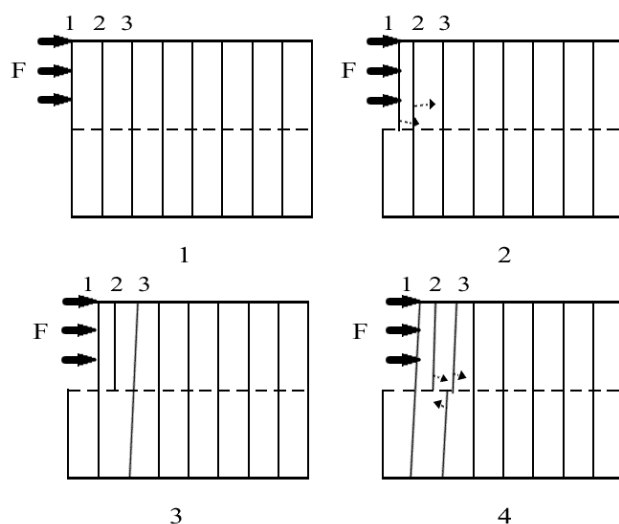
Shetlik dislokაციya ha'm oni'n' a'tirapi'nda atomlardi'n' jaylasi'w sxemasi' 2.8-su'wrette a'piwayi' kubli'q pa'njere mi'sali'nda keltirilgen. Bul su'wrette 100 tipindegi qon'si'las toli'q

tegisliliklar arasi'ndag'i' «yari'm tegislilik» ko'rsetilgan. Bul pu'tin tegisliliklerdin' atomlari' su'wrettin' to'meninde bir biri menen a'dettegidey boli'p baylani'sqan, biraq yari'm tegisliliktin' to'mengi shetinde ju'da' ku'shli deformatsiyalar payda bolg'an. Arti'q bolg'an yari'm tegisliliktin' to'mengi shetin shetlik dislokatsiya si'zi'g'i', al ayi'ri'm jag'daydarda a'piwayi' tu'rde shetlik dislokatsiya dep ataydi'. Usi' jag'dayg'a baylani'sli' dislokatsiyalardi' si'zi'qli' defektlerge jatqaradi'. Bul si'zi'q arti'q yari'm tegisliliktin' sheti boyi'nsha jaylasadi'. dislokatsiyalardi'n' a'tirapi'ndag'i' ku'shli deformatsiyag'a ushi'rag'an oblastti'n' o'lshemleri shama menen kristalli'q pa'njerenin' 2-3 da'wirine ten' boladi'. U'lkenirek qashi'qli'qlarda mayi'si'wdi'n' shamasi' kishi ha'm olardi' serpyimlilik teoriyasi' tiykari'nda ta'riplewge boladi'.

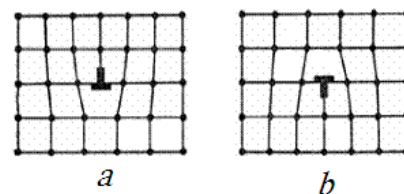


2.8-su'wret.
Shetlik dislokatsiya a'tirapi'ndag'i' atomlardi'n' jaylasi'w sxemasi'.

Shetlik dislokatsiyalar ko'binese kristallardi' 2.9-su'wrette keltirilgendey etip deformatsiyag'anda payda boladi'. Dislokatsiyalar ko'binese ji'lji'w deformatsiyalari'nda ji'lji'w tegislilikleri dep atalatug'i'n ti'g'i'z jaylasqan atomlarga iye tegisliliklerde payda boladi'. Biz a'piwayi' kubli'q pa'njereni ha'm oni'n' $\{100\}$ tegisliligin qaraymi'z. KOK kristallarda $\{110\}$, $\{112\}$ ha'm $\{123\}$ tegisliliklerinin', al QOK kristallardi' $\{111\}$ tegisliliklerinin' ji'lji'w tegislilikleri ekenligin atap o'temiz. Eger kristalg'a $\vec{F}$ ku'shi menen ta'sir etsek (2.9 (1)-su'wretke qaran'i'z), onda (100) tegisliligi punktir menen belgilengen ori'nda «ji'rtiladi'» (2.9 (2)-su'wret), bunnan keyin 1 tegisliliginin' joqarg'i' yari'mi' 2 tegisliliktin' to'mengi yari'mi' menen tutasadi' (2.9 (3)-su'wret). Al 2 tegisliliginin' joqarg'i' yari'mi' «arti'q» tegislilik boli'p qaladi'. Eger kristalg'a ta'sir etiwdi dawam etsek, onda kelesi tegislilik «ji'rtiladi'», bunnan keyin 2 tegisliliginin' joqarg'i' yari'mi' 3 tegisliliginin' to'mengi yari'mi'na qosi'ladi' (2.9 (4)-su'wret). Process tap usi'nday izbe-izlikte dawam etedi. Solay etip kristalda arti'q (100) yari'm tegisliligi payda boladi'. Ol $\vec{F}$ ku'shinin' ta'sirinde ji'lji'w tegisliligi boyi'nsha qon'si' tegisliliklerdin' «ji'rtili'wi'ni'n» esabi'nan qozg'ala aladi'. Jan'a tegisliliktin' ji'rtili'wi' dislokatsiya si'zi'g'i'ni'n' qasi'nda bolatug'i'nli'g'i'n an'g'ari'wi'mi'z sha'rt. Sebebi kristalli'q pa'njerenin' mayi'si'wi' tap sol ori'nda maksimalli'q ma'niske iye (2.8-su'wret).



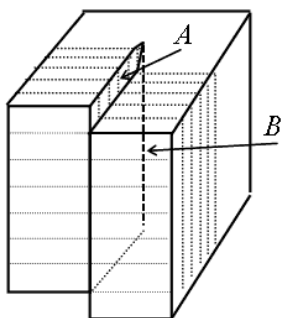
2.9-su'wret. Kristaldi'n' ji'lji'w deformaciyasi'ni'n' bari'si'nda shetlik dislokaciyani'n' payda boli'wi'ni'n' ha'm qozg'ali'wi'ni'n' sxemasi'.



2.9- a ha'm b su'wretler.
On' ha'm teris belgige iye dislokaciyalar
(on' ha'm teris dislokaciyalar).

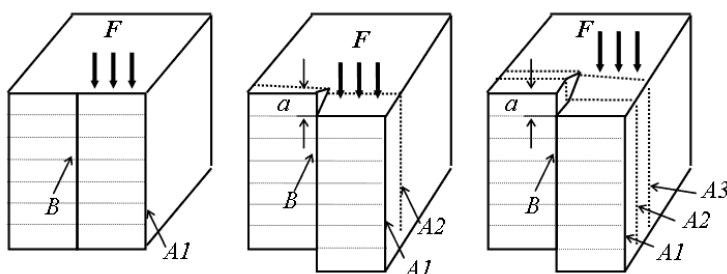
Shetlik dislokaciylardi' sha'rtli tu'rde on' ha'm teris shetlik dislokaciylalar dep ekige bo'ledi. On' belgige iye dislokaciya (2.9 a su'wret) arti'q yari'm tegislik joqari'da jaylasqan. Bunday jag'dayda kristaldi'n' joqarg'i' bo'leginde qi'si'wshi' kernew, al to'meninde sozi'wshi' kernew ori'n aladi'. Teris dislokaciya (2.9 b su'wret) jag'dayi'nda kristaldi'n' joqari' bo'leginde sozi'wshi' kernew, al to'mengi bo'leginde qi'si'wshi' kernew ori'n aladi'. Su'wrette on' ha'm teris dislokaciylardi'n' belgileniwlari de keltirilgen. Eki dislokaciyanin' bir birinen tek 180° qa ayi'rmasi'ni'n' bar ekenligin an'g'ari'w qi'yi'n emes. Sonli'qtan tek bir dislokaciya bar jag'dayda oni'n' belgisi haqqi'nda ga'p etiwidin' keregi joq. Eger dislokaciyanin' qasi'nda basqa dislokaciya jaylasqan bolsa, onda dislokaciylardi'n' belgisin ayti'w za'ru'rliqi payda boladi'. Dislokaciylalar arasi'ndag'i' serpinli ta'sirlesiw ku'shleri dislokaciyanin' belgisine baylani'sli': birdey belgige iye dislokaciylalar bir biri menen iytirisedi, al ha'r qi'yli' belgige iye bir biri menen tarti'sadi'.

Vintlik dislokaciya. A'piwayi' kubli'q kristal ushi'n vintlik dislokaciya sxema tu'rinde 2.10-su'wrette keltirilgen. Bul su'wrette A tegisliginin' shep ta'repinde jaylasqan atomlar o'zlerinin' ori'nlarini'nda qalg'an, al on' ta'repindegi atomlar on' ta'reptegige sali'sti'rg'anda to'menge qaray bir tegisliklar arasi'ndag'i' qashi'qli'qqa ji'lji'g'an. Usi'ni'n' saldari'nan B si'zi'g'i'ni'n' a'tirapi'nda ku'shli deformaciya payda boladi'. A yari'm tegisliginin' ha'm qalg'an yari'm tegisliktin' shegarasi' arqali' o'tiwshi B si'zi'g'i'n vintlik dislokaciya dep ataydi'. 2.10-su'wrette ko'rinip turg'ani'nday gorizont bag'i'ti'ndag'i' deformaciyalang'an (001) tipindegi tegislik boyi'nsha B si'zi'g'i'n bir ret aylani'p shi'qsa kristalli'q pa'njerenin' 1 da'wirine joqari'g'a ko'teriliwge, al B si'zi'g'i'ni'n' do'gereginde bir neshe ret aylani'p shi'qsa pa'njerenin' bir neshe da'wirine ko'teriliwge bolati'g'i'nli'g'i'n ko'remiz. Ko'teriliw vintlik baspaldaq yamasa vintlik avtojol menen ko'teriliwge usaydi'. Usi'nnan vintlik dislokaciya atamasi' kelip shi'qqan. Vintlik dislokaciya barli'q (010) tegisliklari bo'leklengen bolmay shi'g'atug'i'nli'g'i'n an'g'arami'z. Sebebi olardi'n' barli'g'i' da ko'sheri B bolg'an bir quramali' vintlik betke aylang'an. 2.10-su'wrette keltirilgen bet B si'zi'g'i'ni'n' a'tirapi'nda saat tilinin' bag'i'ti'na qarama-qarsi' bag'i'tta qozg'alg'anda ko'teriliwdi ta'miyinleydi (eger joqari'dan qarasaq). Eger B si'zi'g'i'ni'n' a'tirapi'nda saat tilinin' qozg'ali'w bag'i'ti'nda qozg'alg'anda da joqari'g'a ko'teriliwdi ta'miyinleytug'i'n betti quri'w mu'mkin (buni'n' ushi'n 2.10-su'wrette keltirilgen kristaldi'n' on' ta'repin to'menge emes, al joqari'g'a qaray ji'lji'ti'w kerek). Sonli'qtan vintlik dislokaciylalar on' vintlik ha'm teris vintlik bola aladi'.



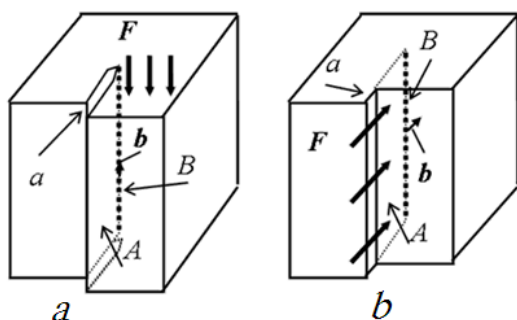
2.10-su'wret.
Vintlik dislokaciyaning a'tirapi'nda
atomliq tegisliklarning joylashi'wi'ni'n
sxemasi'.

Vintlik dislokaciya kristaldi' 2.11-su'wrette ko'rsetilgandey etip deformaciyalag'anda payda boladi'. A'piwayi' kubliq pa'njeredegi {100} tipidagi tegislikni qaraymi'z. Eger kristalg'a $\vec{F}$ ku'shi menen ta'sir jasasaq (2.11 a su'wret), onda A1 tegisligi strelka menen belgilengen ori'nda B si'zi'g'i' boyi'nsha «ji'rti'ladi'». Bunnan keyin A1 din' to'mengi ha'm joqarg'i' yari'mlari' pa'njerenin' 1 da'wirine ji'lji'w menen birigedi (2.11 b su'wret). Eger kristalg'a ta'sir etiwadi dawam ete bersek, onda kelesi tegislik «ji'rti'ladi'», bunnan keyin A2 tegisliginin' to'mengi ha'm joqarg'i' bo'limlari' ji'lji'w menen baylani'sadi' (2.11 v su'wret). Process tap usi'nday izbe-izlikte dawam etedi. Solay etip kristalda vintlik dislokaciya payda boli'p, ol kristallg'a ta'sir etiwadin' aqib'etinde tegisliklarning qon'si' yari'mlari'ni'n «ji'rti'li'wi'» ha'm «birigiwlerinin'» sebebinen ji'lji'w tegisligi boyi'nsha qozg'aladi'. Jan'a tegisliktin' «ji'rti'li'wi'» tek dislokaciya si'zi'g'i'ni'n' qasi'nda ju'zege keletug'i'nli'g'in an'g'arami'z. Sebebi sol ori'nda kristalli'q pa'njerenin' mayi'si'wi' en' u'lken ma'niske iye boladi' (2.11-su'wretke qaran'i'z).



2.11-su'wret.
Kristaldi'n' ji'lji'w
deformaciyasi'ndagi' vintlik
dislokaciyaning payda boli'wi'
ha'm ji'lji'wi'.

Byurgers vektori'. Vintlik dislokaciyaning ali'w ushi'n kristaldi'n' u'stinen to'mendegidey modellik operaciya ju'rgizemiz (2.12 a su'wretti qaran'i'z). Kristalda pa'njerenin' tu'yinlari arasi'nan o'tetug'i'n (100) tegisliginde A yari'm tegisligi boyi'nsha qi'yali'mi'zda kesim kesemiz. Bunnan keyin kesimnin' on' ta'repidagi atomlarning bir tegisliklari arasi'ndagi' qashiqli'qqa to'menge qaray ji'lji'tami'z ha'm A orqali' o'tiwshi baylani'slar menen baylani'sti'rami'z. Kristaldi'n' «shep» ta'repine sali'sti'rg'anda «on'» ta'repinin' awi'si'w vektori' B vintlik dislokaciyaning Byurgers vektori' boli'p tabi'ladi'. Oni' $\vec{b}$ orqali' belgileyemiz. Vintlik dislokaciyaning Byurgers vektori'ni'n' usi' dislokaciyaning o'zine parallel ekanligi ko'rinib tur.



Ris. 2.12.

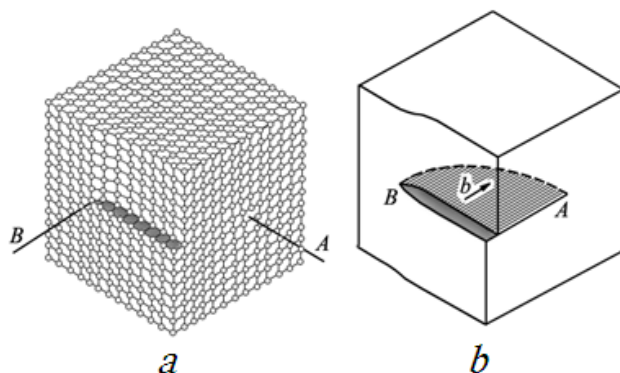
Vintlik ha'm shetlik dislokatsiyalardagi kristalning atomlarini awisiwi'ni'ni sxemasi.

$\vec{b}$ orqali Byurgers vektori belgilengen.

Tap sonday jollar menen shetlik dislokatsiyani da ali'wg'a boladi. Buni'n ushi'n kristalning «on» ta'repin A beti boyinsha «bizden arman qaray» jiljitiw kerek ha'm B dislokatsiyasi si'zi'g'innan basqa orinlardagi baylanislardi biriktiriw kerek boladi (2.12 a su'wret). Kristalning bul bo'liminin awisiw vektori Byurgers vektori boli'p tabiladi. Shetlik dislokatsiyani'n Byurgers vektorni'n dislokatsiyani'n o'zine perpendikulyar ekenligi ko'rinip tur.

Aralas tiptegi dislokatsiyalar. 2.13-su'wrette A ha'm B noqatlari'n tutastiriwshi aralas tiptegi qiyshiq si'ziqli dislokatsiyag'a misal keltirilgen. A noqati'nda atomlarning jaylasishi shetlik, al B noqati'nda vintlik dislokatsiyag'a saykes keledi. Bunday dislokatsiya $\vec{b}$ bag'itida ta'sir etetug'in $\vec{F}$ ku'shinin ta'sirinde ju'retug'in bir tekli emes jiljiw deformatsiyasini'n aqibetinde payda boladi (2.13-su'wretti qaran'iz). Ta'sir etiwdi dawam etsek A - B dislokatsiyasi jiljiydi ha'm shtrixlang'an oblastni'n maydani u'lkeyedi. Tap usi'nday aralas tiptegi quramali dislokatsiyalar kristallarda jiyi ushi'rasadi.

Dislokatsiyalarning ti'gi'zli'gi. Dislokatsiyalarning baqlaw usillari. Dislokatsiyalarning ti'gi'zli'gi kristalning ishinde aling'an maydani bir birlik bolgan betti kesip o'tetug'in dislokatsiyalarning sani'na ten'. Bul shama kristalning ko'leminin bir birligindagi barliq dislokatsiyalarning uzi'zli'g'ina ten'. Dislokatsiyalarning ti'gi'zli'qlarini'n jiyi ushi'rasatug'in ma'nisleri ha'm dislokatsiyalarning usi'nday ti'gi'zli'qlarini u'yreniw ushi'n qollanilatug'in usillar 2.2-kestede berilgen.



2.13-su'wret.

Aralas tiptegi qiyshiq si'ziqli dislokatsiya.

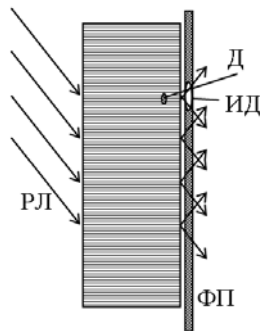
2.2-keste.

Dislokatsiyalarning ti'gi'zli'qlarini'n ma'nisleri ha'm olarning baqlaw usillari

Dislokatsiyalarning u'yreniw usili	U'lginin' kali'nli'gi, mkm	Dislokatsiyalarning su'wretinin' ken'ligi, mkm	Dislokatsiyalarning maksimalliq ti'gi'zli'gi (1 sm ² maydandagi)
Elektron mikroskopiyasi	10 ⁻⁰ -10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ¹¹ -10 ¹²

Rentgen topografiyasi' (kristall orqali o'tiwshi tolqi'nlardag'i')	10^2-10^3	5	10^4-10^5
Rentgen topografiyasi' (kristaldi'n' betinen shashi'rag'an tolqi'nlardag'i')	2-50	2	10^6-10^7
Optikali'q mikroskopiya (oyi'p nag'i'slaw oy'i'qlari' boyi'nsha)	qa'legen qali'n'li'qtag'i' u'lgi	0,3-0,5	$10^{-6}-10^{-7}$

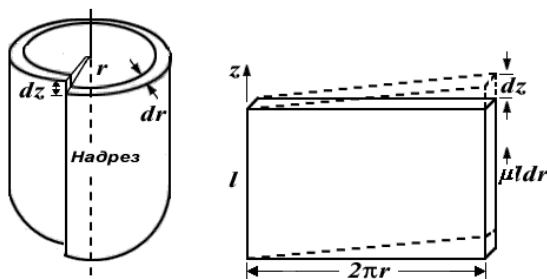
Elektron mikroskoplari'ni'n' ja'rdeminde qa'legen ti'g'i'zli'qtag'i' dislokatsiyalardi' baqlaw mu'mkin. Quri'li'si' jetkilikli da'rejede jetilisken kristallardag'i' dislokatsiyalardi' rentgen topografiyasi'ni'n' ja'rdeminde baqlaydi'. Dislokatsiyalardi' baqlaytug'i'n usi'llardi'n' barli'g'i' da dislokatsiyalardi'n' o'zlerin «ko'rmeydi», al dislokatsiya a'tirapi'ndag'i' kristalli'q pa'njerenin' mayi'si'wi'n «ko'redi».



2.14-su'wret.

Rentgen topografiyasi' ja'rdeminde monokristaldag'i' dislokatsiyani'n' su'wretin payda etiw sxemasi' (kristall orqali' o'tiwshi tolqi'nlardag'i' rentgen topografiyasi').

Dislokatsiyalardi'n' energiyasi'. Dislokatsiyag'a usi' dislokatsiya payda etken kristalli'q pa'njeresinin' mayi'si'w energiyasi' baylani'sli'. Bul energiyani'n' shamasini'n' dislokatsiyadan qashi'qlasqan tutas ortalig' jaqi'nlasii'wi'n (priblijenie) ha'm dislokatsiyalarg'a jaqi'n qashi'qli'qlardag'i' bir biri menen ta'sirlasiwshi atomlar modelin qollani'p esaplawg'a boladi'.



2.15-su'wret.

Vintlik dislokatsiya jani'ndag'i' kristaldi'n' deformatsiyali'ni'wi'.

Bunday esaplawdi' vintlik dislokatsiyalar ushi'n ori'nlag'an an'sat. Kristaldi' tutas izotrop ortalig' dep esaplaymi'z. 2.15-su'wrette vintlik dislokatsiya jani'ndag'i' serpimli deformatsiyalar kartinasi' ko'rsetilgen. Bunday jag'dayda dislokatsiyani'n' a'tirapi'ndag'i' ken'islikti ishki radiusi' r ha'm si'rtqi' radiusi' $r + dr$ bolg'an juqa cilindrlik qatlamlarg'a

bo'lemiz. Yari'm tegislikte ha'r bir qatlam kesilgen ha'm Byurgers vektori' b shamasina ji'li'si'w menen baylani'sqan. Bunday jag'dayda ha'r bir qatlam $\varepsilon = b/2\pi r$ shamasina ji'lji'w menen deformaciyalang'an dep esaplay alami'z (ko'rsetpelilik ushi'n 2.15-su'wrette ha'r bir cilindrni burawg'a ha'm payda bolg'an ji'lji'w deformaciyasi'ni'n' shamasin ani'qlawg'a boladi'). Ji'lji'w deformaciyasi'ni'n' energiyasi'ni'n' ti'g'i'zli'g'i'n sali'sti'rmali' deformaciya ε ha'm ji'lji'w moduli μ arqali' to'mendegi formulani'n' ja'rdeminde tabi'wg'a boladi':

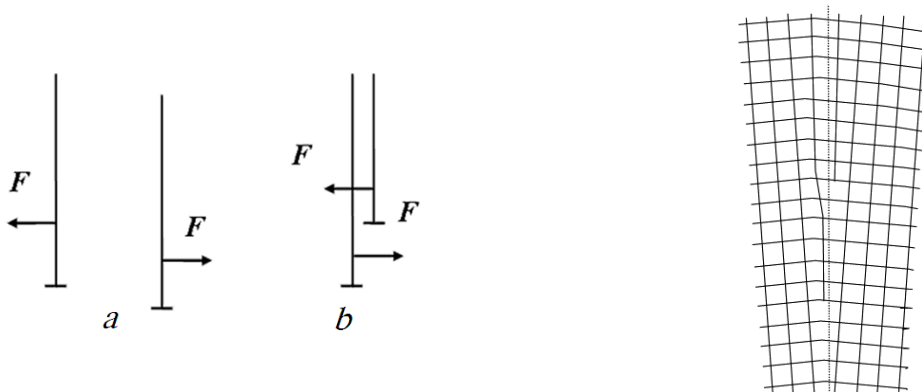
$$w = \mu \varepsilon^2 / 2 = (\mu/2)(b/2\pi r)^2 \quad (2.14)$$

Eger bul formulani' ha'r bir cilindrni' ko'lemine ko'beytsek ha'm r din' mu'mkin bolg'an ma'nisleri boyi'nsha integrallasaq, onda uzi'nli'g'i' l ge ten' vintlik dislokaciyanin' energiyasi'n bahalaw mu'mkin.

$$U = (b^2 l \mu / 4\pi) \ln(R_0 / r_0) \quad (2.15)$$

Bul formulada r_0 di shama menen pa'njerenin' da'wirine ten' dep esaplawg'a boladi'. R_0 bolsa dislokaciylar arasi'ndag'i' ortasha qashi'qli'q. Oni'n' ma'nisi pa'njere da'wirinin' ma'nisinen shama menen 100-200 ese u'lken. (2.15)-formulada u'lken da'llik talap etilmeydi. Sebebi R_0/r_0 qatnasi' logarifm ishinde tur ha'm biz na'tiyjeni tek energiyani'n' ma'nisin bahalaw ushi'n isledik. Joqari'dag'i' (2.15)-formulada dislokaciyanin' «yadrosi'ni'n'» energiyasi' esapqa ali'nbag'an. «Yadro» da bolsa kristalli'q pa'njere ku'shli mayi'sqan. Oni'n' energiyasi'n esaplaw ushi'n sanli' usi'llar talap etiledi. (2.14)-formulag'a a'melde jiyi ushi'rasatug'i'n $b = 2,5 \cdot 10^{-10} \text{ m}$; $\mu = 10^{11} \text{ N/m}^2$; $r_0 = 5 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ ha'm $R_0 = 200 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ ma'nislerin qoyi'p uzi'nli'q birligine sa'ykes keletug'i'n vintlik dislokaciyanin' energiyasi'ni'n' $\frac{U}{l} = 4 \cdot 10^{-9} \text{ Dj/m}$, al ha'r bir atom arasi'ndag'i' qashi'qli'q ushi'n (yag'ni'y ha'r bir atom ushi'n) $\frac{U}{b} = 10^{-18} \text{ Dj/atom}$ shamasina ten' bolatug'i'nli'g'i'n ko'remiz. Bul u'lken shama ha'm atomlardi'n' ji'lli'li'q terbelislerinin' energiyasi'nan a'dewir u'lken. Sonli'qtan dislokaciya ji'lli'li'q qozg'ali'slari'ni'n' ta'sirinde payda bola almaydi'. Dislokaciylardi' payda etiw ushi'n ten' salmaqli' emes processler (mi'sali' kristallardi' deformaciyalaw) kerek.

Dislokaciylardi'n' bir biri menen ta'sirlesiw. Dislokaciya deformaciylar maydani'n payda etedi ha'm usi' maydan arqali' basqa dislokaciylarg'a ta'sir etedi. Mi'sali' 2.16 (a) su'wrette ko'rsetilgen dislokaciylar bir birin iyteriwi, al 2.16 (b) su'wrettegi bir biri menen tarti'si'wi' kerek. Dislokaciylardi'n' uzi'nli'q birliginin' mexanikali'q kernewler maydani', basqa dislokaciylar menen ta'sir etisiw ku'shinin' ma'nisin esaplaw mu'mkin. Biraq bul esaplawlar a'dewir quramali'. Sonli'qtan biz olardi' tallamaymi'z.



2.16-su'wret.

Bir biri menen iytirisetug'i'n (a) ha'm tarti'satug'i'n (b) jag'daylardag'i' eki shetlik dislokaciyanin' jaylasi'wi'.

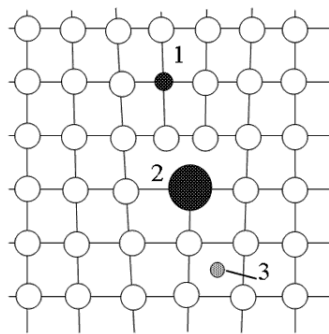
2.17-su'wret.

Kristalli'q pa'njereleri azmaz buri'lg'an eki monokristal arasi'ndag'i' bo'lip turi'wshi' bettegi (punktir si'zi'q) dislokaciya.

2.16 (b) ha'm 2.17-su'wretlerde keltirilgen dislokaciya monokristallardi'n' o'siw processinde payda bolatug'i'n kristalli'q pa'njereleri bir birinen azmaz buri'lg'an eki monokristaldi' bir birinen ayi'ri'p turatug'i'n betlerde payda boladi'. Esaplawlar dislokaciya tap usi'nday boli'p jaylasqanda eki kristallik arasi'ndag'i' bettin' bir birligine sa'ykes keletug'i'n energiyani'n' minimum ma'nisine ten' bolatug'i'nli'g'i'n ko'rsetedi.

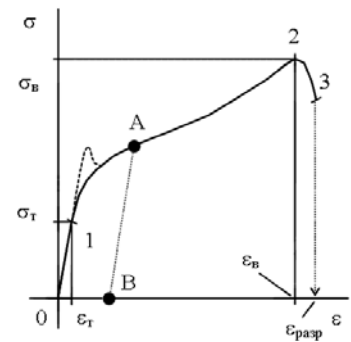
Dislokaciya menen noqatli'q defektlerdin' bir biri menen ta'sirlesiw.

Dislokaciya, a'sirese shetlik dislokaciya kristalli'q pa'njerenin' ku'shli qi'si'lg'an ha'm sozi'lg'an ushastkalari'n payda etedi. (2.18-su'wretti qaran'i'z). Sozi'lg'an ori'nlarda almasti'ri'wshi' iri qosi'mta atomlardi'n', al qi'si'lg'an ori'nlarda almasti'ri'wshi' mayda atomlardi'n' jaylasi'wi' energiyali'q jaqtan uti'mli'. Tu'yinler arasi'na endirilgen iri atomlardi'n' sozi'lg'an ori'nlarda, al qi'si'lg'an ori'nlarda tu'yinler arasi'na endirilgen mayda atomlardi'n' jaylasi'wi' uti'mli'. usi'nday jag'dayda dislokaciyalardi'n' a'tirapi'nda qosi'mta atomlardi'n' ji'ynag'i' payda boli'p, oni' «dislokaciyanin' posti'ni» dep ataydi'. Bul dislokaciya a'tirapi'ndag'i' lokalli'q deformaciyalardi' ha'm dislokaciyanin' energiyasi'n kemeytedi. Plastikali'q deformaciya «posti'ni» bar dislokaciyalardi' ji'li'sti'ri'w «posti'ni» joq dislokaciyalardi' ji'li'sti'rg'annan qi'yi'ni'raq boladi'. Sebebi birinshi dislokaciya energiyasi' joqari'raq bolg'an ori'ng'a ko'shedi. Ayi'ri'm noqatli'q defektleri yamasa olardi'n' ji'ynaqlari' dislokaciyalardi' turg'an orni'na bekitedi dep esaplaydi'. Elektro mikroskopi'nda dislokaciyalardi'n' a'tirapi'ndag'i' iri ji'ynaqlar baqlanadi'. To'mende keltirilgen mi'salda bekkemlik teorii'si'ndag'i' «ag'i'w tisi» («zub tekushesti») biz aytqan jag'daydi' ani'q tu'sindiredi.



Ris. 2.18.

Noqatli'q defektlerdin' dislokaciyalardi'n' jani'nda jaylasi'wi' energiyali'q jaqtan uti'mli': almasti'ri'w qosi'mtasi' bolg'an kishirek atom (1), amlasti'ri'w qosi'mtasi' bolg'an irirek atom (2), endirilgen atom (3).



Ris. 2.19.

U'lgini sozg'anda σ kernewinin' sali'sti'rmali' uzari'w ϵ shamasin'nan g'a'rezligi.

Dislokaciyalardi'n' qasi'ndag'i' sozi'lg'an kristalli'q pa'njerege iye ushastkalar diffuziyanin' o'tiwi ushi'n jen'illestirilgen kanallar boli'p tabi'ladi'. Dislokaciyalardi'n' ti'g'i'zli'g'i' joqari' bolg'an deformaciyalang'an materiallarda deformaciyanibag'an materiallarga sali'sti'rg'anda diffuziyanin' tezirek ju'retug'i'nli'g'i' belgili.

Noqatli'q defektler «arti'q» yari'm tegisliktin' shengarasi'na jetip ko'p jag'daylarda jog'aladi' (2.18-su'wretti qaran'i'z). Usi'ni'n' saldari'nan bul «yari'm tegisliktin'» shetinin' formalari' o'zgeredi. Dislokaciya qozg'alg'anda noqatli'q defektlerdi, soni'n' ishinde vakansiyalardi' payda etedi dep esaplaydi'. Bul vakansiya arti'q tegisliktin' shetlerinde payda boladi'. Bunday processlerde dislokaciya si'zi'g'i' jan'a ori'ng'a ji'li'sadi'

(«en'bekleydi»). Dislokაციyalardi'n' «en'beklewi» (perepolzanie) dep atalatug'i'n bunday process jiyi ushi'rasadi'.

Kristallardi'n' plastiklik (elastik) deformაციyasi' ha'm dislokაციyalar. Detalg'a berilgen o'lishemlerdi ha'm formani' beriw ushi'n ko'p materiallardi' texnologiyali'q qayta islew processinde qayti'msi'z tu'rde deformაციyalaydi'. Qayti'msi'z deformაციyalar Guk ni'zami' ori'nlanbaytug'i'n jag'daylarda baqlanadi'. Bul jag'daylarda detallardag'i' kernewlerdin' ma'nisleri sali'sti'rmali' deformაციyadan quramali' tu'rdegi si'zi'qli' emes g'a'rezlikke iye.

Polikristalli'q u'lgini sozi'w processin qaraymi'z. U'lgiler a'dette uzi'n cilindr formasi'na iye boladi'. Olardi' bekitiw ushi'n ushlari'n juqartadi'. Bul process to'mendegidey tu'rde xarakterlenedi:

a) mexanikalik'q kernew σ menen (ta'sir etetug'i'n ku'shtin' u'lginin' kese-kesiminin' maydani'na qatnasi'), a,

b) u'lginin' sali'sti'rmali' uzayi'wi' ε menen:

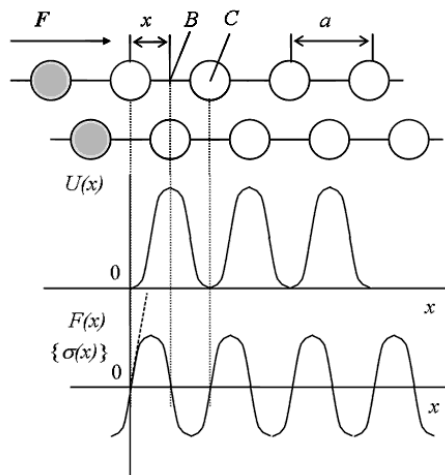
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{l - l_0}{l_0}. \quad (2.16)$$

Bul an'latpada l arqali' σ kernewi ta'sir etkendegi u'lginin' uzi'nli'g'i', l_0 arqali' u'lginin' da'slepki uzi'nli'g'i' belgilengen. 2.19-su'wrette u'lgini sozg'anda mexanikalik'q kernew σ menen sali'sti'rmali' uzayi'w ε shamasini' arasi'ndag'i' baylani's ko'rsetilgen. Iymeklik o'zine ta'n u'sh ushastkag'a iye. 0-1 ushastkasi' serpimli qayti'mli' deformაციyag'a sa'ykes keledi. Bul ushastkada Guk ni'zami' ori'nlanadi'. 1-2 ushastkasi' qayti'mli' emes plastikali'q deformაციyag'a tiyisli; eger A noqati'nda deformაციyalawdi' toqtatsa (buni'n' ushi'n $\sigma = 0$ etiw kerek), onda u'lginin' xali' B noqati'na sa'ykes keledi. 2-3 ushastkasi' u'lginin' qi'yrawi'na sa'ykes keledi. 1 noqati'ni'n' jani'nda iymeklik ko'p jag'daylarda «ag'i'w tisi» ne iye boladi' (2.19-su'wrettegi punktir si'zi'q). Oni'n' payda boli'wi' dislokაციyalardi'n' a'tirapi'nda toparlasqan noqatli'q defektler menen baylani'sli'. Bunday ori'nlarda dislokაციyalardi' orni'nan ji'lji'ti'w qi'yi'ni'raq. Sebebi jan'a ori'nda oni'n' energiyasi'ni'n' joqari'lawi' kerek.

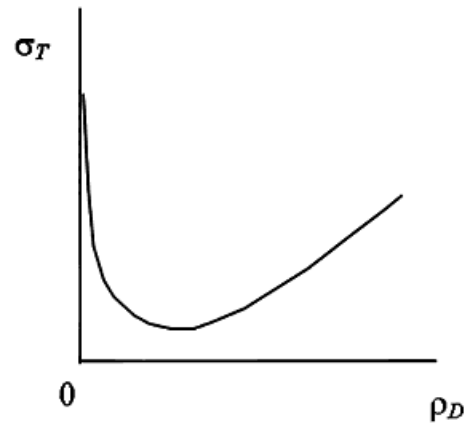
1 noqati'na sa'ykes keliwshi σ shamasini' aqqi'shli'q shegi σ_τ dep ataydi', al 2 noqati'na sa'ykes keliwshi kernewdi bekkemlik shegi dep atap, oni' σ_B arqali' belgileydi.

Dislokაციyalardi' esapqa almay kristalli'q denelerdin' bekkemlik shegin esaplasa (bekkemliktin' teoriyalik'q shegi) haqi'yqi'y ma'nislerinen 100-1000 ese u'lken bolg'an shamalar ali'nadi'. Biz modellik kristalli'q pa'njere ushi'n ji'lji'w deformაციyasi'ndag'i' aqqi'shli'q shegin esaplawg'a ti'ri'sami'z.

Eksperimentler plastikali'q deformაციyani'n' ji'lji'w tegislikleri dep atalatug'i'n tegislikler boyi'nsha ju'retug'i'nli'g'i'n ko'rsetedi. Bunday tegislikler atomlar ti'g'i'z jaylasqan tegislikler boli'p tabi'ladi'. Bunday tegislikke mi'sal 2.20-su'wrette keltirilgen. Eger joqari'dag'i' tegislikke tangensialli'q ku'sh tu'sirilse atomlar ori'nlarini'nan ji'lji'ydi' ha'm shamasini' tu'sirilgen ku'shtin' shamasini'na ten' serpimlilik ku'shi payda boladi'. Deformაციya energiyasi'ni'n' ma'nisi usi' ku'shtin' ma'nisi menen baylani'sli'. Deformაციyani'n' energiyasi' joqari'dag'i' tegisliktegi atomlari' to'mengi tegisliktegi atomlardi'n' u'stinde jaylasqang'a shekem (yag'ni'y 2.20-su'wrettegi B noqati'nda) joqari'laydi'. Bunnan keyingi ji'li'si'wlarda atomlarg'a S awhali'na «tu'siw» uti'mli' boladi'. Solay etip joqari'da jaylasqan tegislik jan'a ori'ng'a ji'li'si'p o'te aladi'. Eger plastikali'q deformაციyadan keyin monokristallardi'n' betin abaylap tegislese sonday ji'li'si'wlardi'n' izlerin «baspaldaqlar» tu'rinde ko'riwge boladi'.



2.20-su'wret. Atomlardi'n' joqari'da joylasqan tegisliginin' to'mende joylasqan tegisligine sali'sti'rg'andag'i' ji'li'wi'ni'n' esabi'nan ju'retug'i'n' deformatsiyani'n' sxemasi'.



2.21-su'wret. Aqqi'shli'q sheginin' dislokatsiyalardi'n' ti'g'i'zli'g'i'nan sxema tu'rindagi g'a'rezligi.

Joqarg'i' tegislikni to'mengi tegislikke sali'sti'rg'anda ji'li'sti'ri'w ushi'n za'ru'rli bolg'an ku'shtin' ma'nisin bahalawg'a boladi'. (2.20-su'wretti qaran'i'z). Buni'n' ushi'n mexanikali'q kernew ha'm oni'n' menen baylani'sli' bolg'an potentsial energiyadan paydalanami'z. 2.20-su'wrette usi' ku'sh ha'm oni'n' menen baylani'sli' potentsialli'q energiyani'n' x koordinatsiyasi'nan g'a'rezligi keltirilgan. $\sigma_c(x)$ g'a'rezligin da'wiri a g'a ha'm amplitudasi' $\mu a / (2\pi d)$ bolg'an sinusoida menen ta'riplewge boladi'. Bul an'latpada d orqali' tegisliklar arasi'ndagi' qashi'qli'q belgilengen. Bul sinusoidani'n' amplitudasi'ni'n' ma'nisin biz esaplaydi'q. Buni'n' ushi'n x ti'n' kishi ma'nislarida sinusoidani'n' qi'yali'g'i'ni'n' tangensi $\mu \varepsilon = \mu (\frac{x}{d})$ shamasina ten' boli'wi' kerakligin paydalandi'q (2.20-su'wretti qaran'i'z). Bunday jag'dayda $\sigma_c(x)$ ushi'n to'mendegidey formula ali'nadi':

$$\sigma_c(x) = \{\mu a / (2\pi d)\} \sin(2\pi x / a) \quad (2.17)$$

$x = a/4$ bolg'an jag'dayda $\sigma_c(x)$ shamasi' o'zini'n' maksimalli'q ma'nisine iye boladi'. (2.17)-formula ja'rdeminde ori'nlang'an esaplaw $\sigma_c(x)$ ushi'n ta'jiriybede ali'ng'an ma'nisinen ju'zlegen - on mi'n'day ese u'lken ma'nis beradi. Bunday ku'shli ayi'rmani'n' sebebi mi'nadan ibarat: joqari'dagi' tegislikte joylasqan atomlardi'n' barli'g'i'ni'n' to'mengi tegislikte joylasqan atomlarga sali'sti'rg'anda bir waqi'tta ji'li'sadi' dep esaplaydi'q. Bul duri's emes. Sebebi joqari'dagi' yari'm tegislikni'n' 1 atomlar arasi'ndagi' qashi'qli'qqa ji'li'wi' dislokatsiyani'n' ji'li'wi' menen de a'melge asadi' (bul 2.9-su'wrette ko'rsetilgan). Bunday ji'li'w ushi'n a'dewir kishi ku'sh kerak boladi'. Sebebi endi ji'li'wda barli'q atomli'q baylani'slardi'n' bir waqi'ttag'i' u'ziliwi ori'n almaydi', al dislokatsiyani'n' qasi'ndagi' baylani'slar g'ana u'ziledi.

Plastikali'q deformatsiyani'n' dislokatsiyali'q mexanizmi ta'jiriybelerde baqlanatug'i'n' ag'i'w sheginin' ma'nislarin (σ_T ha'm σ_B shamarini'n), 2.19-su'wretteg'i' 1-2 ushastkasi'ndagi' $\sigma(\varepsilon)$ g'a'rezligini'n' o'siwini de tu'sindire aladi'. Deformatsiyada da'slep a'zzi berkingen dislokatsiyalar, al keyin ku'shlirek berkingen dislokatsiyalar qozg'ala baslaydi'. Soni'n' menen birge deformatsiyani'n' bari'si'nda dislokatsiyalardi'n' sani' ha'm basqa da defektler ko'be'yyedi.

Materialdi'n' ag'i'w shegi usi' materialdag'i' dislokatsiyalardi'n' ti'g'i'zli'g'i'nan ju'da' ku'shli g'a'rezli. 2.21-su'wrette usi'nday g'a'rezlik ko'rsetilgan. Dislokatsiyalardi'n' ti'g'i'zli'g'i' (ρ_D) kishi bolg'anda ag'i'w shegi σ_T shamasini'n' u'lken bolatug'i'nli'g'i', al ρ_D

ni'n' shamasi' u'lken bolg'anda ag'i'w sheginin' kishi bolatug'i'nli'g'i' ko'rinip tur. U'lken ρ_D shamasin'da σ_T ti'n' u'lkeyiwin dislokaciyalardi'n' bir biri menen ha'm kristalli'q pa'njerenin' basqa da defektleri menen ta'sir etisiwinin' na'tiyjesi boli'p tabi'ladi'.

Materiallardin' bekkemligin joqari'lati'w jollari'. Ha'zirgi waqitlari' bekkemlik shegin $0,01\mu$ ge shekem jetkeriwge mu'mkinshilik beretug'i'n materiallardin' bekkemligin joqari'latatug'i'n ko'p sanli' usi'llar bar. Olardi'n' ko'pshiligi dislokaciyalardi'n' qozg'ali'wi'na mu'mkinshilik bermeytug'i'n qosi'msha tosqi'nli'qlardi' kirgiziw menen baylani'sli'. Usi'nday tosqi'nli'qlarg'a mi'sal retinde kristalli'q pa'njerenin' to'mendegidey defektlerin ko'rsetemiz:

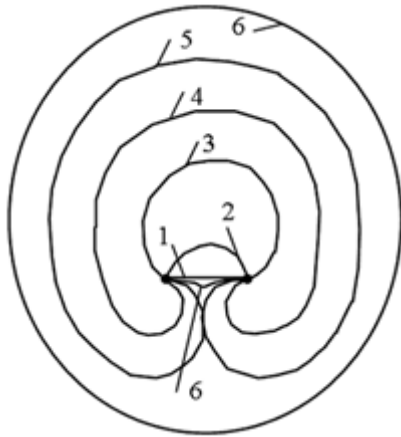
- 1) basqa fazani'n' ayri'li'p shi'g'i'wi' (bul haqqi'nda to'menirekte ga'p etiledi);
- 2) noqatli'q defektler ha'm olardi'n' toparlari' (dara jag'dayda joqari'da ga'p etilgen «dislokaciya postini»);
- 3) dislokaciya lardi'n' qozg'ali'wi'n qi'yi'nlasti'ratug'i'n dislokaciya lardi'n' o'zlerinin' ko'p boli'wi' (dislokaciya lardi'n' bir biri menen ta'sirlesiwleri olardi'n' qozg'ali'wi'na kesent beredi);
- 4) atomlardi'n' ornalasi'wi'ndag'i' jaqi'nnan ta'rtiptin' ori'n ali'wi' (bul haqqi'nda to'mende ken'irek ga'p etemiz).

Qo'pshilik quymalarda jaqi'nnan ta'rtip dep atalatug'i'n qubi'li's baqlanadi'. Bunday ta'rtipte bir sorttag'i' atom o'zin basqa sorttag'i' atomlardi'n' qorshap turi'wi'na ti'ri'sadi'. Usi'nday jollar menen quymani'n' kishi energiyag'a iye boli'wi' ta'miyinlenedi. dislokaciya lardi'n' qozg'ali'w bari'si'nda atomlar arasi'ndag'i' energiyali'q jaqtan uti'mli' baylani'slar u'ziledi ha'm energiyali'q jaqtan uti'mli' emes baylani'slar qa'liplesedi. Buni'n' ushi'n u'lken energiya talap etiledi, al bul o'z gezeginde dislokaciya lardi' ji'lji'ti'w ushi'n za'ru'rli bolg'an ku'shlerdin' o'siwine, aqi'rg'i' esapta kristalli'q materialdin' bekkemliginin' arti'wi'na ali'p keledi.

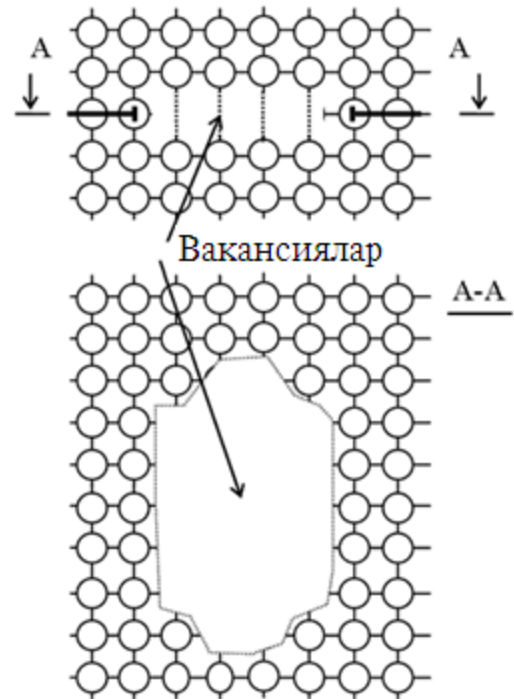
Joqari'da keltirilgen usi'llar bekkemlikti a'dewir joqari'latatug'i'n bolsa da, a'dette materialdin' plastikli'g'in ku'shli to'menletedi.

Kristaldin' bekkemligi dislokaciya lardi'n' ti'g'i'zli'g'i' kishi bolg'an jag'daylarda da ori'n aladi'. Bunday jag'daylarda kristallardi'n' dislokaciya lardi' mexanizm menen deformaciya lani'wi' qi'yi'nshi'li'q penen ju'zege keledi (dislokaciya lardi' az bolg'anli'qtan).

Dislokaciya lardi'n' payda boli'wi'. Joqari'da ayti'li'p o'tilgenindey, dislokaciya lardi' tiykari'nan kristallardi'n' plastiklik deformaciya lani'ni'n' na'tiyjesinde payda boladi'. Plastikali'q deformaciya dag'i' dislokaciya lardi'n' payda boli'w istoshniklerinin' birin Frank-Rid istoshnigi (deregi) dep ataydi'. Ol 2.22-su'wrette ko'rsetilgen. Meyli dislokaciya 1 A ha'm B noqatlari'nda bekitilgen bolsi'n. Bunday noqatlardi'n' orni'n basqa o'lshemlerge iye atomlardi'n' ji'ynaqlari', basqa faza oblastlari' ha'm basqalar boli'wi' mu'mkin. Si'rttan mexanikali'q kernew tu'sirilgende dislokaciya ji'lji'ydi' ha'm 2, 3, 4 awhallari'nan izbe-iz o'tedi. En' aqi'ri'nda 5-awhalda dislokaciya lardi'n' shep ha'm on' ta'replerdegi yari'm ilmekleri bir biri menen tiyisedi, do'n'gelek formag'a iye (6) dislokaciya lardi'q ilmekti payda etedi. Bul ilmek bolsa mexanikali'q kernewdin' ta'sirinde 1 formasi'na keledi. Bunnan keyin process qaytalanadi' ha'm kelesi dislokaciya payda boladi'.



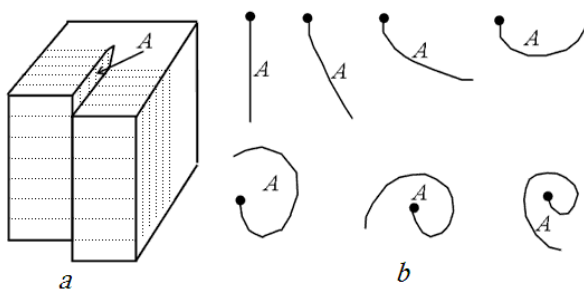
2.22-su'wret.
Dislokaciyalardi'n' Frank-Rid istoshnigi
(deregi)



2.23-su'wret. Aralas tiptegi
dislokaciyalarg'a ekvivalent bolg'an tuyi'q
si'zi'q tu'rindagi vakansiyalardi'n' disk
ta'rizli ji'ynag'i' (toparlasi'wi').

Kristallardi' salqi'nlatqanda vakansiyalardi'n' disk ta'rizli ji'ynaqlari' payda bolg'anda da tuyi'qlang'an dislokaciya payda boladi'. Bul jag'day 2.23-su'wrette keltirilgen.

Dislokaciya ha'm kristallardi'n' o'siwi. Vintlik dislokaciya kristallardi'n' (balqi'g'an suyi'q fazadan, eritpeden ha'm puwlardan) o'siwin jen'illestiredi. Sebebi vintlik dislokaciya'ga baylani'sli' kristaldi'n' betinde payda bolg'an tekshe 2.24-su'wrette A orqali' ko'rsetilgen kristaldi'n' betine atomlardi'n' kelip oti'ri'wi'n jen'illestiredi. Tekshenin' asti'nda ko'p sanli' baylani'slar bar. Sonli'qtan atomlardi'n' tekshenin' asti'na kelip kristalg'a birigiwi tegis betke kelip kristal menen birigiwine qarag'anda a'dewir uti'mli'.



2.24-su'wret.
Vintlik dislokaciya'n' kristaldi'n' o'siwin
jen'illestiriwi (a) ha'm A tekshesinin'
asti'ndag'i' oblastqa atomlar kelip
kristalg'a qosi'lg'anda dislokaciya'n'
formasi'ni'n' o'zgeriwini'n' izbe-izligi (b).

Jetkilikli da'rejede jetiliskan kristallardi'n' betinde sonday teksheler ji'yi baqlanadi'. Ma'sele.

Vakansiyalardi'n' tuwri' si'zi'g'i'na ha'm vakansiyalardi'n' bir qatlamdag'i' disk ta'rizli topari'na sa'ykes keletug'i'n' dislokaciya jubi'ni'n' su'wretin sali'n'i'z.

Betlik ha'm ko'lemlik defektlar

Betlik ha'm ko'lemlik defektler ko'p sanli' atomlardan turatug'i'n sali'sti'rmali' iri defektler boli'p tabi'ladi'. Betlik defektler jag'dayi'nda atomlardi'n' da'wirli jaylasi'wlari' ku'shli buzi'lg'an oblastlar (yag'ni'y betlik defektler) qali'n'li'g'i' 1-2 atomli'q tegislikler arasi'ndag'i' qashi'qli'qqa ten' kristaldi'n' betine tu'sirilgen normalg'a perpendikulyar bag'i'tlang'an bazi' bir bet formasi'na iye boladi'. Ko'lemlik defektler jag'dayi'nda atomlardi'n' jaylasi'wi'ndag'i' da'wirlik buzi'lg'an oblastlar bazi' bir denenin' (mi'sali' ellipsoidti'n') formasi'na iye boladi'. Oni'n' barli'q o'lshe'mleri atomlar arasi'ndag'i' qashi'qtan bir neshe ese u'lken.

Betlik defektler. Kristaldi'n' betinin' o'zi betlik defektke mi'sal bola aladi'. Kristaldi'n' betinin' qasi'nda atomlardi'n' da'wirli jaylasi'wi' belgili bir da'rejede buzi'latug'i'nli'g'i' belgili. Usi'ni'n' saldari'nan betlik qatlam kernewlik halda turadi', na'tiyjede bet bazi' bir energiyag'a iye boladi' (suyi'qli'qti'n' betinin' bet kerimi energiyasi'na iye bolatug'i'nli'g'i'nday). Qa'legen sistema si'yaqli' kristaldi'n' da'energiyani'n' minimumi'na qaray umti'li'wi' kristaldi'n' betinin' minimallasi'wi'na ali'p keledi. Tap sol sebeplerge baylani'sli' ko'pshilik jag'daylarda kristallar do'n'es ko'p mu'yeshlikler formasi'na iye boladi'.

Biraq betlik defektler kristallardi'n' ishinde de boladi'. Kristallardi'n' ko'pshiligi bir biri menen baylani'spag'an bir neshe kristalliziciyalani'w orayi'nda o'se baslaydi'. Sonli'qtan olar kristalli'q pa'njerelerinin' orientაციyalari' bir birine jaqi'n da'neshelerden turadi'. Bul da'neshelerdin' arasi'ndag'i' shegarada atomlardi'n' jaylasi'wlari'ndag'i' da'wirlik so'zsiz buzi'ladi' (2.17-su'wret). Bunday shegaralardi' kishi mu'yeshli shegaralar dep ataydi'.

Shegaralardi'n' basqa da tipi bar. Bul polikristalli'q materiallardag'i' da'nesheler arasi'ndag'i' shegaralar boli'p tabi'ladi'. Bul jag'dayda qon'si'las da'neshelerdin' kristalli'q pa'njereleri arasi'ndag'i' razorientirovka i'qti'yarli' ma'nislerdi qabi'l etedi.

Mayi'sqan kristalli'q pa'njerege iye da'nesheler arasi'ndag'i' shegarada mexanikali'q kernewler toplang'an boladi'. Sonli'qtan qosi'msha mexanikali'q kernewler tu'sirilgende sol oblastlarda kristallardi'n' bo'liniwi, si'ni'wi' yamasa qi'yrawi' baqlanadi'.

Da'nesheler arasi'ndag'i' shegaralar boyi'nsha atomlardi'n' diffuziyasi' tezirek o'tedi (bunday diffuziyani' da'nesheler arali'q diffuziya dep ataydi'). Mi'sal retinde kristaldi'n' atomlari' menen unamli' aqi'betlerge ali'p kelmeytug'i'n reaksiyag'a kirisetug'i'n gaz atomlari'ni'n' diffuziyasi'n ko'rsetiwge boladi'. Usi'ni'n' saldari'nan kristallardan sog'i'lg'an buyi'mlardi'n' korroziyag'a shi'damli'g'i' to'menleydi. Reaksiyalardi'n' o'nimleri (mi'sali' oksidler, nitridler ha'm tag'i' basqalar) da'nesheler arasi'ndag'i' shegaralarda kristalli'q pa'njereni ja'ne de mayi'sti'radi'. Sonli'qtan da'nesheler arasi'ndag'i' shegaralar boylap kristaldi'n' si'ni'w itimalli'g'i' ha'm oni'n' mortli'g'i' joqari'laydi'.

Joqari'da ko'rip o'tilgen betlik defektlerdin' kristallardi'n' mexanikali'q ha'm korroziyalig' qasi'yetine unamsi'z ta'sirlerin kemeytiwdin' ko'p sanli' usi'llari' bar.

Birinshi usi'l en' ko'p tarqalg'an usi'llardi'n' qatari'na kiredi. Bul kristallardi' balqi'w temperaturasi'nan shama menen 2 ese to'men temperaturada uslap turi'w. Bunday jag'dayda atomlardi'n' migraciyasi' ori'n aladi' ha'm da'nesheler arasi'ndag'i' shegaralardag'i' kernewlerdin' ma'nisi kemeyedi. Usi'ni'n' aqi'betinde shegara boylap diffuziyani'n' o'tiwi ki'yi'nlasadi' ha'm kristaldi'n' korroziyalig' bekkemligi artadi'.

Ekinshi usi'l siyrek paydalani'ladi' ha'm qi'mbat turadi'. Bul jag'dayda qon'si'las da'nesheler arasi'ndag'i' razorientaciya mu'yeshleri kishi bolg'an monokristallar paydalani'ladi'. Mi'sali' bunday monokristallardi' gaz turbinalari'ni'n' pa'rigin sog'i'w ushi'n paydalanadi'. Bunday pa'rik joqari' temperaturalarda polikristallardan sog'i'lg'an pa'riklerge sali'sti'rg'anda shi'damli'g'i' a'dewir joqari' boladi'.

Da'nesheler arasi'ndag'i' shegaralar ha'm basqa da defektler kristalli'q denelerdin' ji'lli'li'q o'tkizgishligine ha'm elektr qarsi'li'g'i'na ta'sir etedi. Sebebi bunday defektlerde ji'lli'li'q energiyasi'n tasi'wshi' fononlardi'n', energiya menen zaryad tasi'wshi' elektronlardi'n' qosi'msha shashi'rawi' ori'n aladi'. Betlik defektler a'sirese to'mengi

temperaturalarda ji'lli'li'q o'tkizgishlik penen elektr o'tkizgishlikke u'lken ta'sir ko'rsetedi. Bunday temperaturalarda fotonlar menen elektronlardi'n' erkin ju'riw joli'ni'n' uzi'nli'g'i' kristalli'q da'neshelerdin' o'lshemleri menen barabar boladi'. Bul haqqi'nda to'mende toli'g'i'raq ga'p etiledi.

Ko'lemlik defektler. Ko'lemlik defektlerge kishi (mikro) ko'lemli iyeleytug'i'n' basqa kristalli'q fazalar, gewekler ha'm jari'qlar (san'laqlar) kiredi. Gewekler menen jari'qlardi'n' boli'wi' materiallarg'a ku'shli tu'rde unamsi'z ta'sirin tiygizedi. Sebebi olar kristaldi'n' barli'q fizikali'q qa'siyetlerin o'zgertedi (mayi'sti'radi'), buyi'mlardi'n' bekkemligi menen plastiklin a'dewir to'menletedi.

Kishi (mikro) ko'lemli iyeleytug'i'n' basqa kristalli'q fazalar materiallardi'n' bekkemligin joqari'lati'w ushi'n ken' tu'rde qollani'ladi'.

3. Kristallardi'n' ji'lli'li'q qa'siyetleri

Kristall belgili bir massag'a iye ta'rtpi tu'rde jaylasqan atomlardi'n' sistemasi' boli'p tabi'ladi'. Atomlar arasi'nda belgili bir qashi'qli'qlarda bir birin ten'gerip turatug'i'n' tarti'si'w ha'm iyterisiw ku'shleri ori'n aladi'. Atom ten' salmaqli'q hali'nan awi'ssa oni' o'zinin' ten' salmaqli'q hali'na qaytari'p ali'p keletug'i'n' ku'sh payda boladi'. Bul ku'shtin' shamasi' atomni'n' tipinen, oni'n' a'tirapi'ndag'i' atomlardan ha'm kristaldag'i' atomni'n' awi'si'w bag'i'ti' menen qansha shamag'a awi'sqanli'g'i'nan g'a'rezli. Terbelislerdin' klassikali'q teoriyasi'na sa'ykes N atomnan turatug'i'n' «serpimli baylani'sqan massalar» sistemasi'nda menshikli jiyilikleri ω_i ($i = 1, 2, 3, \dots, N-3, N-4$) bolg'an normal terbelisler boladi'. ω_i jiyiliklerine iye terbelisler bir biri menen baylani'sli' emes. Atomlardi'n' qozg'ali'slari' usi' normal terbelislerdin' superpozitsiyasi' si'pati'nda tabi'ladi'.

Kristallardi'n' ha'm molekulalardi'n' ji'lli'li'q qa'siyetlerinin' klassikali'q teoriyasi'nda da, kvant teoriyasi'nda da kristaldi' ω_i individualli'q menshikli jiyiligine iye bir birinen g'a'rezsiz oscillyatorlardi'n' ji'ynag'i' dep qaraydi'.

Klassikali'q teoriya boyi'nsha T temperaturasi'nda ha'r bir oscillyator ortasha kT energiyasi'na iye boladi'. Barli'q oscillyatorlardi'n' sani' $3N - 3 \approx 3N$. Sonli'qtan kristal $U = 3NkT$ energiyasi'na iye boli'wi' kerek. Kristaldi'n' mollik ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i' $C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V = N_A 3k = 3R$ shamasi'na ten' boladi'. Bul Dyulong ha'm Pti ni'zami' boli'p tabi'ladi'. Bul ni'zam boyi'nsha qa'legen barli'q kristalli'q zatlardi'n' mollik ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i' birdey ha'm 3R shamasi'na ten'. Bul ni'zam sali'sti'rmali' joqari' temperaturalarda (700-2000 K) g'ana jaqsi' ori'nlanadi'. Biraq to'mengi temperaturalarda juwi'q tu'rdegi ni'zamg'a aylanadi'.

Kristallardi'n' ji'lli'li'q qa'siyetlerin Eynshteyn ha'm Debay ta'repinen islep shi'g'i'lg'an kristallardi'n' ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'ni'n' kvant teoriyasi' a'dewir joqari' da'llikte ta'ripleydi. Bul kvantli'q teoriyani'n' tiykari'nda ji'lli'li'q nurlani'wi' teoriyasi'ndag'i' elektromagnit terbelislerdin' energiyasi'ni'n' kvantlang'anli'g'i' si'yaqli' atomlardi'n' terbelis energiyasi'ni'n' kvantlani'wi' haqqi'ndag'i' boljaw jatadi'.

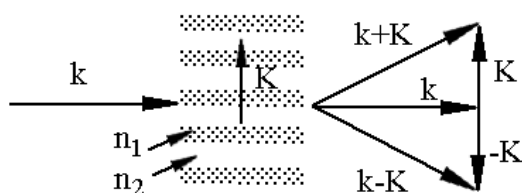
Kvant teoriyasi'na sa'ykes ha'r bir normal terbelistin' energiyasi' jeke oscillyatoridi'n' energiyasi' si'yaqli' kvantlanadi'. $\hbar\omega$ energiyasi'n oscillyatoridi'n' terbelislerinin' energiyasi'ni'n' kvanti' (porciyasi') dep esaplaydi'. Al kvantti'n' o'zin fonon dep ataw, oni' energiyasi' $E = \hbar\omega$, impulsi $\vec{p} = \hbar\vec{k}$ shamasi'na ten' bo'lekshe dep qaraw qabi'l etilgen. Normal terbelislerdin' bir birinen g'a'rezsizligin paydalani'p oni' Boze gazi' teoriyasi'n ta'riplew ushi'n qollanadi'. Al Boze gazi' teoriyasi' fononlardi' Boze bo'leksheleri dep qaraydi'. Biz to'mende kristaldi'n' terbelislerinin' kvant teoriyasi'ni'n' ta'jiriybelerde baqlani'p ju'rgen ko'plegen qubi'li'slardi' ha'm ni'zamli'qlardi', solardi'n' ishinde ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i' menen ji'lli'li'q o'tkizgishliktin' temperaturadan g'a'rezligin duri's tu'sinderetug'i'nli'g'i'n ko'remiz. Bul teoriya fononli'q teoriya dep te ataladi' ha'm ol zatlar ta'repinen nurlar menen bo'lekshelerdin' shashi'rati'li'wi'n, energiya menen zaryadti'n' ali'p

beriliwine baylani'sli' processlerdi jaqsi' tu'sindire aladi'. Ko'pshilik ma'selelerdi sheshiwde fotonlardi'n' xarakteristikalarini' biliw ju'da' a'hmiyetli. Al fotonlardi'n' xarakteristikalarini' eksperimentlerde u'yreniwge boladi'.

Fononlardi' eksperimentte u'yreniw usi'llari'

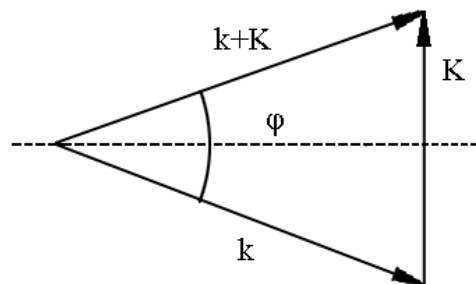
Bir fononni'n' energiyasi' menen impulsin ani'qlawg'a mu'mkinshilik beretug'i'n fononlardi' u'yreniw usi'llari'n qarap o'temiz. Bul usi'llar fononni'n' kristalg'a kelip tu'siwshi bo'leksheler menen (neytronlar, elektronlar, fononlar yamasa fotonlar) ta'sir etisiwine tiykarlang'an. Bunday ta'jiriybelerde kristalg'a kelip tu'siwshi ha'm kristalda shashi'rag'an bo'lekshelerdin' energiyalari' menen impulslari' o'lshenedi. Bunnan keyin saqlani'w ni'zamlari' tiykari'nda (energiya menen impulstin' saqlani'w ni'zamlari' tiykari'nda) fononlardi'n' energiyalari' menen impulslari' bir birinen g'a'rezsiz ani'qlanadi'. Fononni'n' foton menen ta'sirlesiwini qarap o'tken an'sati'raq.

Fotonni'n' deformaciyalang'an kristalli'q pa'njere menen ta'sir etisiwi. Meyli energiyasi' $E = \hbar\omega$ bolg'an foton si'ni'w ko'rsetkishi n bolg'an kristal menen ta'sir etisetug'i'n bolsi'n. Eger kristalda energiyasi' $E = \hbar\Omega$, impulsi $\vec{p} = \hbar\vec{K}$ bolg'an fonon bolatug'i'n bolsa, onda fonon menen baylani'sli' bolg'an serpimli tolqi'n kristaldi'n' bir oblasti'n qi'sadi', al ekinshi oblasti'n sozadi'. Bul o'z gezeginde kristaldi'n' ha'r qi'yli' oblastlari'nda si'ni'w ko'rsetkishi n nin' o'zgeriwine ali'p keledi. Na'tiyjede difrakciyalig'q pa'njerege usag'an jag'day payda boladi' (3.1-su'wretti qaran'i'z). Bul difrakciyalig'q pa'njerege kelip tu'sken fotonlar difrakciyag'a ushi'raydi'. 3.1-su'wrette fotonlardi'n' tiykarg'i' shashi'ramag'an tolqi'ni' menen bir qatarda minimum eki difrakciyalig'q tolqi'nni'n' payda bolatug'i'nli'g'i' ko'rinip tur. Fotonni'n' qozg'ali's bag'i'ti'ni'n' o'zgeriwi kristaldi'n' terbeliwine sa'ykes keletug'i'n fononni'n' juti'li'wi' yamasa payda etiliwi (tuwi'li'wi') menen baylani'sli' dep esaplaw qabi'l etilgen. Al fononlar bolsa kristaldi'n' si'ni'w ko'rsetkishi n nin' modulyaciyasi'n ju'zege keltiredi dep esaplaymiz



3.1-su'wret.

Fotonni'n' da'wirli tu'rde deformaciyalang'an kristalli'q pa'njere menen ta'sir etisiwinin' sxemasi'.



3.2-su'wret.

Fotonlar menen fononlardi'n' bir biri menen ta'sirleskendegi vektorlari' arasi'ndag'i' qatnaslar.

Foton menen fononni'n' ta'sirlesiwini vektorlardi'n' ja'rdeminde ko'rsetken qolayli' (3.2-su'wretti qaran'i'z). Energiyasi' $E = \hbar\omega$ ha'm impulsi $\vec{p} = \hbar\vec{k}$ bolg'an foton energiyasi' $E = \hbar\Omega$ ha'm impulsi $\vec{p} = \hbar\vec{K}$ shamalari'na ten' fonondi' payda etkende oni'n' energiyasi' menen impulsi basqa ma'nislerge iye boladi'. Olardi' sa'ykes $E' = \hbar\omega'$ ha'm $\vec{p}' = \hbar\vec{k}'$ arqali' belgileyemiz. Bul shamalar to'mendegi qatnaslar menen baylani'sqan:

$$\hbar\omega' = \hbar\omega + \hbar\Omega \text{ ha'm } \hbar\vec{k}' = \hbar\vec{k} + \hbar\vec{K}. \quad (3.1)$$

Bul an'latpa energiya menen impulstin' saqlani'w ni'zamlari'n an'latadi'.

Fononlardi'n' ha'm fotonlardi'n' tezlikleri ha'r qi'yli' bolg'anli'qtan birdey $k = K$ ushi'n olardi'n' energiyalari' menen impulsleri de ha'r qi'yli' boladi'. Fononlardi'n' tezligin v , al fotonlardi'n' tezligin c arqali' belgileymiz. Haqi'ykati'nda da $\omega = ck$ ha'm $\Omega = vK$. $c \gg v$ bolg'anli'qtan (3.1) ge sa'ykes $\omega = \omega'$ ha'm $k = k'$. Bul foton menen fonon ta'sir etiskende fotonni'n' jiyiligi menen impulsinin' sezilerliktey o'zgermeytug'i'nli'g'i'n bildiredi. 3.2-su'wretke sa'ykes

$$K \approx 2k \sin \left[\frac{\varphi}{2} \right]. \quad (3.2)$$

Endi φ mu'yeshi menen juti'lg'an (tuwi'lg'an) fononni'n' jiyiligi menen fotonni'n' jiyiligin baylani'sti'ratug'i'n formulani' ali'w mu'mkin (bul formula Kompton formulasi'na sa'ykes keledi).

$$\Omega = vK \approx (2n\omega / c) \sin(\varphi/2). \quad (3.3)$$

v/c shamasi'ni'n' kishi ekenligi Ω/ω shamasi'ni'n' kishi bolatug'i'nli'g'i'na ali'p keledi. Na'tiyjede fotonlar fononlarda shashi'rag'anda fotonni'n' jiyiliginin' sali'sti'rmali' o'zgeriwi bolg'an $\Delta\omega/\omega$ shamasi' da ju'da' kishi boli'p, oni' eksperimentte baqlawdi'n' mu'mkinshiligi bolmaydi'.

Jaqti'li'qti'n' fononlardag'i' shashi'rawi'. Jaqti'li'qti'n' fononlardag'i' shashi'rawi'n izertlew ushi'n joqari' monoxromat nurlardi'n' jin'ishke da'stesi qollani'ladi'. A'dette ha'r qi'yli' mu'yeshlerde shashi'rag'an jaqti'li'qti'n' spektri registraciyalanadi'. Usi'nday jollar menen $\vec{k}$ ha'm $\vec{k}'$ vektorlari'ni'n' bag'i'tlari' ani'qlanadi'. Shashi'rag'an jaqti'li'q nurlari'ni'n' spektrinde jiyiligi ω shamasi'na ten' joqari' intensivlikke iye bas si'zi'q penen bir qatarda jiyilik boyi'nsha $\pm \Omega$ shamasi'na ji'li'sqan fononni'n' juti'li'wi'na ha'm tuwi'li'wi'na sa'ykes keletug'i'n si'zi'qlar da ori'n aladi'. Solay etip bir birinen g'a'rezsiz $\vec{k}$ ha'm $\vec{k}'$, ω ha'm ω' shamalari' arasi'ndag'i' baylani'slar ornati'ladi', na'tiyjede $\vec{K}$ ja'ne Ω vektorlari', olar arasi'ndag'i' baylani's ani'qlanadi'. Jaqti'li'q tolqi'nlari' ushi'n $\vec{k}$ ha'm $\vec{k}'$ shamalari' kishi bolg'anli'qtan usi'nday usi'ldi'n' ja'rdeminde kishi $\vec{K}$ g'a ten' (uzi'n tolqi'n uzi'nli'g'i'na iye) fononlardi' izertlew mu'mkinshiligi tuwi'ladi'.

Rentgen nurlari'ni'n' fononlardag'i' shashi'rawi'. Bul usi'l menen tek kishi tolqi'n uzi'nli'g'i'na iye fononlardi' u'yreniwge boladi'. Sebebi rentgen nurlari' ushi'n $|k|$ ni'n' shamasi' Brillyuen zonasi'ni'n' shamasi'na barabar. Ta'jiriybenin' sxemasi' jaqti'li'q tolqi'nlari'ni'n' fononlarda shashi'rawi'n izertlewdin' sxemasi'nday. Monoxromat rentgen nurlari'ni'n' jin'ishke da'stesi paydalani'ladi'. Belgili bir mu'yeshke (mi'sali' φ mu'yeshine) shashi'rag'an rentgen tolqi'nlari'ni'n' spektri registraciyalanadi'. Usi'nday jollar menen $\vec{k}$ ha'm $\vec{k}'$ vektorlari'ni'n' bag'i'tlari' ani'qlanadi'. Shashi'rag'an rentgen nurlari'ni'n' spektrinde jiyiligi ω shamasi'na ten' joqari' intensivlikke iye bas si'zi'q penen bir qatarda jiyilik boyi'nsha $\pm \Omega$ shamasi'na ji'li'sqan fononni'n' juti'li'wi'na ha'm tuwi'li'wi'na sa'ykes keletug'i'n tiykarg'i' si'zi'qqa di'm jaqi'n jaylasqan a'zzi si'zi'qlar payda boladi'. Ko'pshilik jag'daylarda spektrdegi qosi'msha si'zi'qlar tiykarg'i' si'zi'qlar menen birigip ketken boladi'. Usi'g'an baylani'sli' si'zi'qlardi'n' jiyilik boyi'nsha awi'si'wi' kishi bolg'anli'qtan shashi'rag'an rentgen tolqi'nlari'ni'n' jiyiliginin' o'zgeriwin o'lshew og'ada qi'yi'n bolg'an eksperimentalli'q ma'seleler qatari'na kiredi ha'm Ω shamasi'n ani'qlaw da'lligi ju'da' to'men boladi'.

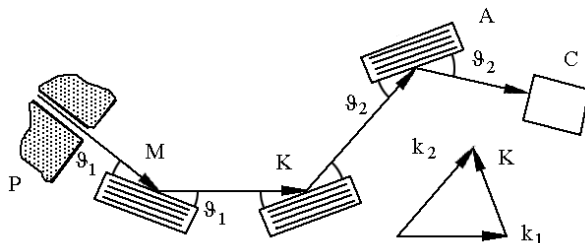
Neytronlardi'n' fononlardag'i' shashi'rawi'. Neytronlardi'n' fononlardag'i' shashi'rawi' usi'li' ha'zirgi waqi'tlardag'i' fononlardi' u'yreniwdin' en' ko'p mag'li'wmatlardi'

beretug'i'n usi'li' boli'p tabi'ladi'. Bunday jag'dayda neytronni'n' tolqi'n vektori' menen energiyasi'ni'n' o'zgerislerin da'l o'lshew mu'mkinshiligi payda boladi'. Neytronlar shashi'rag'anda to'mendegidey qatnaslar ori'nli' boladi':

$$\vec{k}' = \vec{k} + \vec{G} + \vec{K} \text{ ha'm } \frac{(\hbar k')^2}{2M_n} = \frac{(\hbar k)^2}{2M_n} \pm \hbar\Omega. \quad (3.4)$$

Bul qatnaslar energiya menen impulstin' saqlani'w ni'zamlari' boli'p tabi'ladi'. (3.4)-formulada M_n arqali' neytronni'n' massasi', $\vec{G}$ arqali' kerri pa'njere vektori' belgilengen.

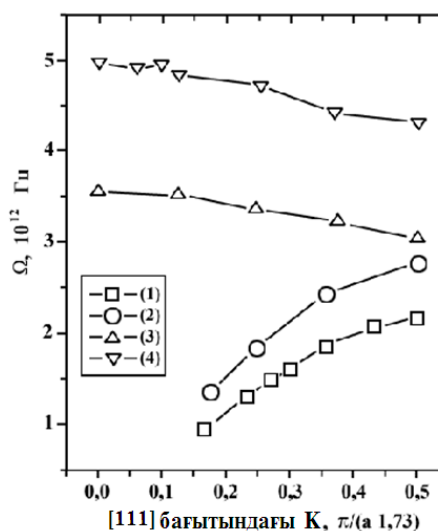
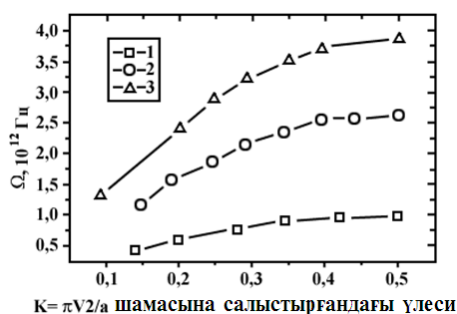
Ekspiriment sxemasi' 3.3-su'wrette keltirilgen. P yadroli'q reaktordan shi'qqan ji'lli'li'q neytronlari'ni'n' da'stesi M monoxromatori'na kelip tu'sedi (monoxromator jetilisen, yag'ni'y defektleri joq monokristaldan sog'i'ladi'). Kristaldan Vulf-Bregg sha'rtine sa'ykes belgili bir tolqi'n uzi'nli'g'i'na iye neytronlar intensivli tu'rde shashi'raydi' (yag'ni'y difrakciyag'a ushi'raydi'). Usi'nday jollar menen neytronlar da'stesin monoxromatlasti'ri'w ha'm $\vec{k}'$ vektori'ni'n' bag'i'ti'n beriw a'melge asi'ri'ladi'. Monoxromat neytronlar da'stesi izertlenip ati'rg'an K u'lgisine kelip tu'sedi. Bul u'lgede shashi'rag'an neytronlar monokristall-analizator A g'a kelip tu'sedi. Kristall-analizator bolsa neytronlardi' Vulf-Bregg sha'rti boyi'nsha C esaplag'i'shi'na qaray shag'i'li'sti'radi'. Analizator di' paydalani'w shashi'rag'an neytronlardi'n' $\vec{k}'$ vektori'ni'n' moduli boyi'nsha (energiyasi' boyi'nsha da) spektrin ali'wg'a mu'mkinshilik beredi ha'm usi'nday jollar menen shashi'rag'an neytronlardi'n' energiyalari' o'lshenedi. Bunnan keyin (3.4)-an'latpa boyi'nsha fononni'n' energiyasi' Ω menen impulsi $\vec{K}$ bir birinen g'a'rezsiz tu'rde ani'qlanadi'. Fononni'n' energiyasi' Ω shamasini'n' impulsi $\vec{K}$ arasi'ndag'i' g'a'rezlikti fononni'n' dispersiyali'q g'a'rezligi dep ataydi'.



3.3-su'wret.

Neytronlar menen ta'sir etisiwdi paydalani'p fononni'n' energiyasi' menen impulsin eksperimentalli'q ani'qlawdi'n' sxemasi'.

Neytronlardi' paydalang'anda ko'p informaciya ali'natug'i'n bolsa da ju'da' ko'p waqi't ha'm quwatli' yadroli'q reaktordi'n' paydalani'li'wi' talap etiledi. Sonli'qtan neytronlardi'n' fononlardag'i' shashi'rawi' quwatli' yadroli'q reaktori' bar ilimiy oraylar da g'ana izertleniledi. Usi'nday usi'ldi'n' ja'rdeminde ali'ng'an jiyi ushi'rasatug'i'n dispersiyali'q g'a'rezlik 3.4-su'wrette keltirilgen.



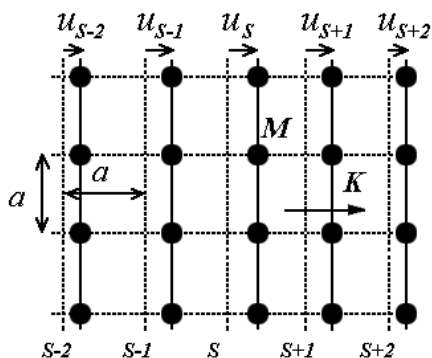
3.4-su'wret. Neytronlardi'n' fononlarda shashi'rawi'n u'yretiwdе ali'ng'an fotonlardi'n' dispersiyali'q g'a'rezligi.

Fononli'q spektrdi u'yreniw ushi'n basqa da bo'lekshelerdi (mi'sali' elektronlardi') paydalani'w mu'mkin. Biraq bunday eksperimentlerdi o'tkeriw quramali' ha'm u'lken g'a'rejetlerdi talap etedi. Mi'sali' elektronlardi' paydalani'w ushi'n u'lken kameralardi'n' ishinde ju'da' joqari' vakuumdi' payda etiw kerek boladi'. Fononli'q spektrlerdi basqa fononlardi' (mi'sali' ultrasesti) paydalani'p u'yreniw mu'mkin. Biraq bul usi'llardi'n' da'lliginin' og'ada to'men ekenligi belgili.

Kristallardag'i' atomlardi'n' terbelisleri

Endi bizler fononlar ushi'n dispersiyali'q g'a'rezlikti teoriyali'q jollar menen ani'qlaw ma'seleasi menen shug'i'llanami'z. Fononlar ushi'n dispersiyali'q g'a'rezlik dep olardi'n' jiyiliklerinin' tolqi'n vektorlari'na g'a'rezligin aytami'z. Uli'wma jag'daylar ushi'n bul ma'seleni sheshiw ju'da' qi'yi'n. Sonli'qtan ma'seleni a'dette sanli' usi'llar ja'rdeminde sheshedi.

Bir o'lshemli jag'day. A'piwayi'li'q ushi'n da'wiri a shamasi'na ten' primitivlik elementar quti'shag'a iye kubli'q kristaldag'i' atomlardi'n' terbelislerin u'yrenemiz. Usi'nday kristaldag'i' [100] bag'i'ti'n ha'm usi' bag'i'tta tarqalatug'i'n tegis boyli'q tolqi'ndi' qarap shi'g'ami'z. Ko'ldenen' tolqi'n'lardi'n' da tap usi'nday jollar menen u'yreniletug'i'nli'g'i'n atap o'temiz. (3.5-su'wretti qaran'i'z).



3.5-su'wret.

[100] bag'i'ti'nda tarqalatug'i'n tegis boyli'q tolqi'ndag'i' bir atomli' kubli'q pa'njerenin' atomlari'ni'n' terbelisleri.

Bunday jag'dayda nomeri s bolg'an (100) tegisliginin' birinde jaylasqan atomlar birdey fazada usi' tegislikke tu'sirilgen normal bag'i'ti'nda (yag'ni'y [100] bag'i'ti'nda) u_s shamasi'na awi'sadi'. Tegislikte jaylasqan atomlardi'n' barli'g'i' da birdey boli'p terbeledi. Usi' tegisliktegi nomeri s bolg'an atomg'a nomeri $s + p$ bolg'an tegislik F_{sp} ku'shi menen ta'sir etedi. Kishi awi'si'wlar ori'n alg'anda (yag'ni'y u_s shamasi' kishi bolg'anda) bul ku'shtin' shamasi' tegisliklerdin' ten' salmaqli'q orni'nan awi'si'wlar ayi'rmasi' bolg'an $u_{s+p} - u_s$ shamasi'na proporcional. Qosi'ndi' ku'sh F_s shamasi' F_{sp} ku'shlerinin' qosi'ndi'si'na ten':

$$F_s = \sum_{p \neq 0} F_{sp} = \sum_{p \neq 0} C_p (u_{s+p} - u_s) \quad (3.5)$$

Massasi' M bolg'an s -nomerli tegislikte jaylasqan atom ushi'n Nyutonni'n' ekinshi ni'zami'n jazami'z:

$$M \frac{d^2 u_s}{dt^2} = \sum_{p \neq 0} C_p (u_{s+p} - u_s) \quad (3.6)$$

u_s funkciyasi'n boyli'q tegis tolqi'n tu'rinde izleyemiz:

$$u_{s+p} = u_0 \exp(-i\omega t + iKx) = u_0 \exp(-i\omega t) \exp(iKa(s + p)) \quad (3.7)$$

(3.7) ni (3.6) g'a qoyg'annan ha'm uli'wmali'q ko'beytiwshilerdi qi'sqartqannan keyin ω^2 ushi'n to'mendegidey an'latpani' alami'z:

$$M\omega^2 = -\sum_{p \neq 0} C_p (\exp(ipKa) - 1) \quad (3.8)$$

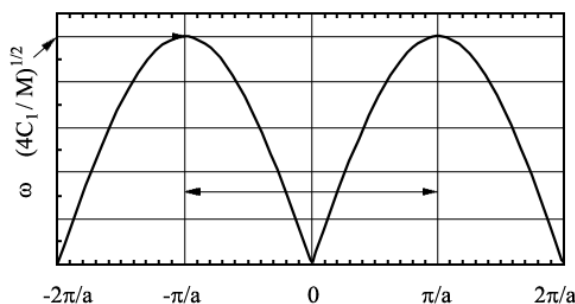
Eger qarap ati'rg'an pa'njeremizdegi ha'm $\cos(a) = [\exp(ia) + \exp(-ia)]/2$ an'latpasi'ndag'i' simmetriyani', onda $C_p = C_{-p}$ ekenligine iye bolami'z ha'm to'mendegidey an'latpa alami'z:

$$\begin{aligned} \omega^2 M &= -\sum_{p > 0} C_p (\exp(ipKa) + \exp(-ipKa) - 2) = \\ &= 2 \sum_{p > 0} C_p (1 - \cos(pKa)). \end{aligned} \quad (3.9)$$

A'dette saylap ali'ng'an atom menen tek en' jaqi'n jaylasqan tegislikler arasi'ndag'i' ta'sir etisiwlerdi qarap shi'g'i'w menen sheklenedi. Bunday jag'dayda $p = \pm 1$ bolg'anda ω^2 ushi'n jazi'lg'an an'latpa a'piwayi'lasadi':

$$\omega^2 = (2 / M) C_1 (1 - \cos(pKa)) = (4C_1 / M) (\sin(Ka / 2))^2 \quad (3.10)$$

$\omega(K)$ g'a rezliginin' grafigi 3.6-su'wrette keltirilgen. $K = \pi/a$ noqati'nda (bul noqat Brillyuennin' birinshi zonasi'ni'n' shegarasi'nda jaylasqan ekenligin eske tu'siremez) $\omega(K)$ dan K boyi'nsha ali'ng'an tuwi'ndi' nolge ten' ekenligi ko'rinip tur. Bul fononni'n' toparli'q tezliginin' (gruppovaya skorost) nolge ten' ekenligine sa'ykes keledi.



3.6-su'wret.

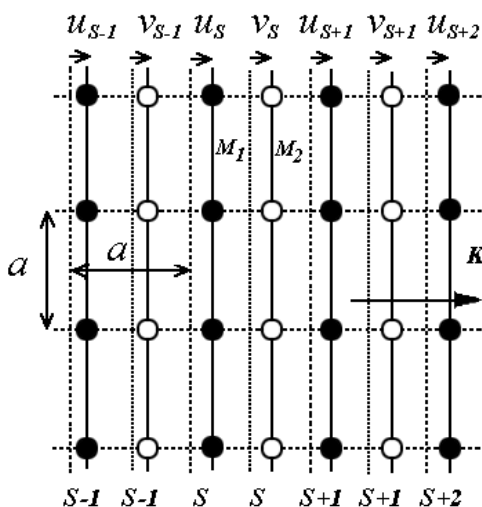
Primitivlik kubli'q pa'njeredegi [100] bag'i'ti'nda tarqalatug'i'n tegis boyli'q tolqi'nni'n' jiyiligi ω ni'n' tolqi'n vektori' K dan g'a'rezligi.

$\omega(K)$ g'a'rezliginin' tap usi'nday o'zgesheligi saylap ali'ng'an atomni'n' tek jaqi'n tegislikler menen ta'sirlesiwini esapqa alatug'i'n (3.9)-an'latpadan da kelip shi'g'adi'. $K = \pi/a$ bolg'an jag'dayda (3.7)-an'latpag'a sa'ykes qon'si'las atomlar qarama-qarsi' fazada terbeledi. Bul jag'day turg'i'n tolqi'ng'a sa'ykes keledi. Qi'zi'g'i' sonnan ibarat, turg'i'n tolqi'nni'n' terbelis amplitudasi' en' u'lken ma'niske jetetug'i'n ori'n atomlar joylasqan ori'nlarg'a sa'ykes keledi. Bul jag'dayda turg'i'n tolqi'nni'n' payda boli'wi' tolqi'nni'n' ha'r bir atomnan shag'i'li'si'wi' ha'm shag'i'li'sqan tolqi'nni'n' interferenciya'li'q ku'sheyiwi menen baylani'sli'. Haqi'ykatida da a qashiqli'g'i'nda joylasqan atomlardan shag'i'li'sqan atomlardi'n' bir birin ku'sheytiw sha'rti $\Delta_{opt} = 2a = \lambda n = \frac{2\pi}{K} (n = 1)$. Bunnan $K = \frac{\pi}{a}$.

U'sh o'lshe'mli pa'njerede fononlar rentgen nurlari' si'yaqli' atomli'q tegisliklerde de shag'i'li'sa aladi'. Interferenciya'li'q ku'sheyiw sha'rti Vulf-Bregg ten'lemesi boli'p tabi'ladi'. Bul sha'rt fononni'n' tolqi'n vektori'ni'n' Brillyuen zonasi'ni'n' shegarasi'na tu'siwi'ne sa'ykes keledi.

(3.7)-formula boyi'nsha atomlardi'n' terbelisin u'yrengende K shamasi'na keri pa'njerenin' vektori'na ten' $2\pi n/a$ shamasi'n qosqanda da atomlardi'n' qozg'ali's ni'zami'ni'n' o'zgermeytug'i'nli'g'i'ni'n' kelip shi'g'atug'i'nli'g'i'n an'sat an'g'ari'wg'a boladi'. Sonli'qtan bir qarap ati'rg'an a'piwayi' jag'dayda atomlardi'n' qozg'ali'slari'n u'yreniw ushi'n $K \leq \pi/a$ sha'rtin qanaatlendi'ratug'i'n K ni'n' ma'nislerin ali'w jetkilikli. U'sh o'lshe'mli ken'islikte bul sha'rtke Brillyuennin' birinshi zonasi'ni'n' ishinde joylasqan K vektorlari'ni'n' ma'nisleri qanaatlendi'radi'.

Bazisi eki atomnan turatug'i'n quti'shani'n' atomlari'ni'n' terbelisi. Tu'sindiriwdi a'piwayi'lasti'ri'w ushi'n da'wiri a g'a ten' primitiv elementar quti'shag'a iye kubli'q kristaldi' qaraymi'z (3.7-su'wret). Meyli atomlardi'n' massalari' M_1 ha'm M_2 shamalari'na ten' bolsi'n.



3.7-su'wret.

Bazisi eki atomnan turatug'i'n kubli'q pa'njeredegi atomlardi'n' [100] bag'i'ti'nda terbeliwi.

Bul kristaldagi' [100] bag'i'ti'n ha'm usi' bag'i'tta tarqalatug'i'n tegis boyli'q tolqi'ndi' qaraymi'z (ko'ldeneni' tolqi'nlar da tap sonday ta'qlette u'yreniledi). Bunday jag'dayda 3.7-

su'wrette qara ren' menen boyalg'an nomeri s bolg'an (100) tegisliginde jaylasqan massasi' M_1 bolg'an barli'q atomlar birdey fazada [100] bag'i'ti'nda [yag'ni'y (100) tegisligine perpendikulyar bag'i'tta] u_s shamasina awi'sadi'. Yag'ni'y tegislik bir pu'tin tutas tegislik si'yaqli' boli'p terbeledi (sebebi tegis tolqi'ndi' qarap ati'rmi'z). Tap sol si'yaqli' massasi' M_2 ge ten' nomeri s bolg'an bir tegislikte jaylasqan boyalmag'an atomlar da (3.7-su'wret) bir fazada usi' tegislikke perpendikulyar bag'i'tta tutasi' menen terbeledi. Qosi'msha ja'ne bir a'piwayi'lasti'ri'wdi' qabi'l etemiz: nomeri s bolg'an tegisliktegi saylap ali'ng'an atomg'a tek eki jaqi'n jaylasqan tegisliklerdegi atomlar g'ana ta'sir etedi dep boljaymi'z.

Atomlar jaylasqan tegisliklerdin' awi'si'wlari'n u_s ha'm v_s arqali' belgileymiz. Awi'si'wlardi' kishi dep esaplaymi'z ha'm sonli'qtan jaqi'n qon'si' atomlar tegislikleri ta'repinen ta'sir etiwshi ku'shtin' shamasin' boyalmag'an atomlar ushi'n $u_{s+1} - v_s$ ha'm $v_s - u_s$, al boyalg'an atomlar ushi'n $u_s - v_{s-1}$ ha'm $v_s - u_s$ ayi'rmalari'na proporcional dep esaplay alami'z.

Nomeri s bolg'an tegislikte jaylasqan «boyalg'an» ha'm «boyalmag'an» atomlar ushi'n Nyutonni'n' ekinshi ni'zami'n bi'layi'nsha jazami'z:

$$\begin{aligned} M_1 \frac{d^2 u_s}{dt^2} &= C((v_{s-1} - u_s) + (v_s - u_s)); \\ M_2 \frac{d^2 v_s}{dt^2} &= C((u_{s+1} - v_s) + (u_s - v_s)). \end{aligned} \quad (3.11)$$

u_s ha'm v_s shamalari'n tegis boyli'q tolqi'nlar tu'rinde izleyviz:

$$u_s = u_o \exp(-i\omega t) \exp(iKas); \quad v_s = v_o \exp(-i\omega t) \exp(iKas) \quad (3.12)$$

(3.12) ni (3.11) ge qoyg'annan keyin u ha'm v shamalari' ushi'n bir tekli si'zi'qli' eki ten'lemeden ibarat sistemani' alami'z:

$$\begin{aligned} -\omega^2 M_1 u &= Cv(1 + \exp(-iKa)) - 2Cu, \\ -\omega^2 M_2 v &= Cu(1 + \exp(iKa)) - 2Cv, \end{aligned} \quad (3.13)$$

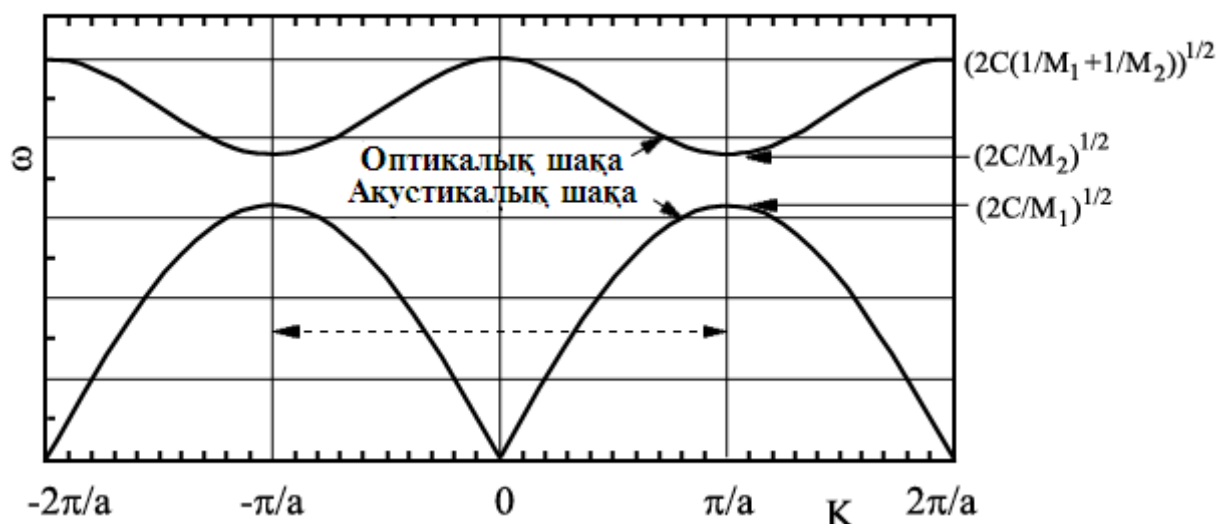
Eger bul ten'lemelerdin' ani'qlawshi'si' (opredeliteli) nolge ten' bolsa, onda olar nollik emes sheshimlerge iye boladi'.

$$\begin{vmatrix} 2C - \omega^2 M_1 & -C(1 + \exp(-iKa)) \\ -C(1 + \exp(iKa)) & 2C - \omega^2 M_2 \end{vmatrix} = 0, \quad (3.14)$$

Ha'zir g'ana ali'ng'an (3.14)-ten'lemeni bi'layi'nsha jaza alami'z:

$$M_1 M_2 \omega^4 - 2C(M_1 + M_2) \omega^2 + 2C^2(1 - \cos(Ka)) = 0 \quad (3.15)$$

I'qti'yarli' K lar ushi'n (3.15)-ten'lemeni sheshiwidin' na'tiyjeleri 3.8-su'wrette keltirilgen.



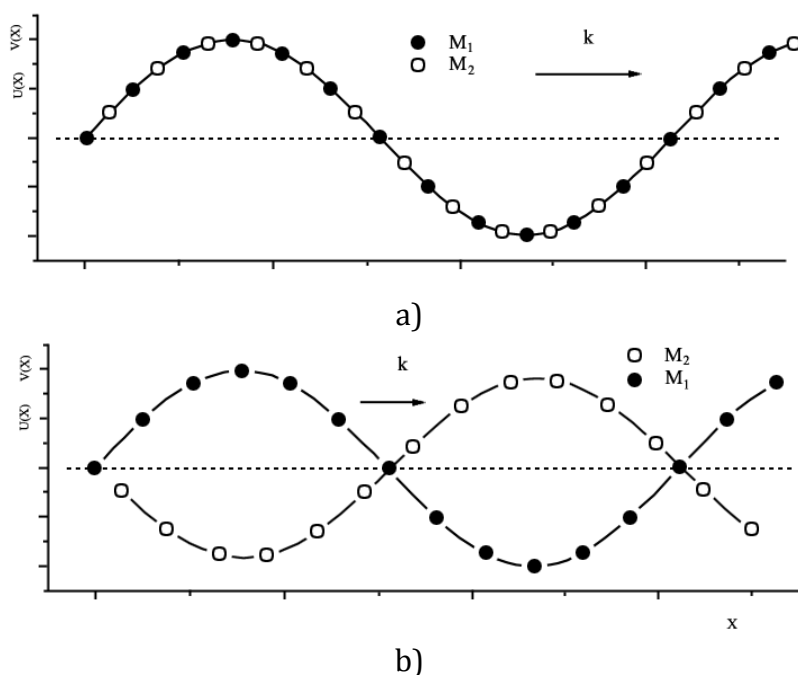
3.8-su'wret. Bazisi eki atomnan turatug'i'n kubli'q pa'njerede [100] bag'i'ti'nda tarqalatug'i'n tegis boyli'q tolqi'nni'n' jiyiligi ω shamasini'n' tolqi'n vektori' K dan g'a'rezligi.

Bul ten'lemenin' 1) kishi K lardag'i' ha'm 2) $K = \pm\pi/a$ bolg'an jag'daylardag'i' sheshimleri u'lken «matodikali'q» qi'zi'g'i'wshi'li'qlardi' payda etedi.

Kishi K larda $\cos(Ka) \approx 1 - (1/2)K^2a^2$. Bunday jag'dayda (3.15)-ten'leme eki tu'birge iye boladi':

$$\omega^2 \approx 2C / (1/M_1 + 1/M_2); \quad \omega^2 \approx CK^2a^2 / 2(M_1 + M_2). \quad (3.16)$$

Birinshi tu'bir fononni'n' dispersiyali'q g'a'rezliginin' $[\omega(K)]$ optikali'q shaqasi'na, al ekinshi tu'bir fononni'n' dispersiyali'q g'a'rezliginin' $[\omega(K)]$ akustikali'q shaqasi'na sa'ykes keledi.



3.9-su'wret.
Atomlardi'n' ko'ldenen' terbelislerindeki atomlardi'n' awi'si'wi'ni'n' akustikali'q (a) ha'm optikali'q tipleri (b).

Optikali'q shaqa ushi'n (3.13) ten atomlardi'n' shama menen qarama-qarsi' fazada terbeletug'i'nli'g'i' kelip shi'g'adi'. Atap aytqanda $K \approx 0$ sha'rti ori'nlang'anda $\frac{u}{v} = -M_1/M_2$

sha'rti ori'nlanadi'. Terbelislerdin' usi'nday tu'rin (3.9 b su'wretke qaran'i'z) eger 1 ha'm 2 atomlari' ha'r qi'yli' elektr zaryadi'na iye bolg'anda o'zgermeli elektr maydani'ni'n ta'sirinde qozdi'ri'w mu'mkin. Usi' sebepke baylani'sli' «optikali'q fonon» tu'sinigi payda bolg'an. Biz qarap ati'rg'an jag'daylarda magnit maydani'ni'n ta'sirin u'yrenbeydi. Sebebi elektrodinamika ni'zamlari'na sa'ykes kishi tezliklerde tolqi'nni'n magnit maydani' zaryadlarga a'zzirek ta'sir etedi.

(3.13)-an'latpadan akustikali'q shaqa ushi'n atomlardi'n' shama menen birdey fazada terbeletug'i'nli'g'i' kelip shi'g'adi'. Atap aytqanda $K \approx 1$ ushi'n $\frac{u}{n} = 1$ qatnasi' ori'nlanadi'. Terbelislerdin' usi'nday tu'rin kristalg'a o'zgermeli serpimli ta'sir etiw arqali' payda etiwge boladi' (3.9 a su'wret). Bul tutas ortalig'ini' uzi'n tolqi'nli' jaqi'nlas'i'wi'ndag'i' atomlardi'n' akustikali'q terbelislerine sa'ykes keledi. Bunday jag'dayda atomlar bir biri menen kelisken xalda shama menen birdey fazada terbeledi. Usi'nnan «akustikali'q fonon» tu'sinigi payda bolg'an.

$K = \pm\pi/a$ bolg'an jag'day a'dewir qi'zi'qli'. Bunday jag'dayda (3.15)-an'latpa ku'shli a'piwayi'lasadi' ha'm ω^2 shamasi' ushi'n $\omega^2 = 2C/M_1$ ha'm $\omega^2 = 2C/M_2$ tu'birleri ali'nadi'. 3.8-su'wrette $K = \pm\pi/a$ sha'rti ori'nlang'anda u'lken tu'birdin' optikali'q shaqag'a, al kishi tu'birdin' akustikali'q shaqag'a tiyisli bolatug'i'nli'g'i' ko'rinip tur.

(3.14)-ten'lemenin' sheshimlerinin' bolmaytug'i'n ω^2 shamasi'ni'n oblasti'ni'n bar ekenligi ko'rinip tur. Demek bunday oblast ushi'n eki atomli' elementar quti'shasi' bar kristalda tolqi'n tarqala almaydi' degen so'z. Teren'irek tallawlar ju'rgizilgende bunday jiyilikler oblastlari'na K ni'n kompleksli ma'nislerinin' sa'ykes keletug'i'nli'g'i'n ko'rsetedi. Bul ortalig'iga tolqi'nni'n amplitudasi'ni'n tez kemeyiwine sa'ykes keledi.

Ko'p atomli' pa'njerenin' atomlari'ni'n terbelislerin eki atomli' jag'day ushi'n joqari'da keltirilgen sxema boyi'nsha u'yreniwge boladi'. Biraq bunday etip ma'seleni sheshiw matematikali'q jaqtan qi'yi'ni'raq. Sebebi ko'p sanli' ten'lemelerden turatug'i'n sistemani' sheshiwge tuwri' keledi. Elementar quti'shasi' r atomg'a iye kristal ushi'n (3.14)-ten'lemenin' boyli'q ha'm ko'ldenen' tolqi'nlari' ushi'n r dana tu'biri ali'nadi'; olardi'n' bir neshelerin $\omega(K)$ g'a rezliginin' akustikali'q shaqasi'na juwap beredi, al kalg'anlari' optikali'q shaqasi'na juwap beredi dep esaplaw qabi'l etilgen. $\omega(K)$ g'a rezliginin' u'sh akustikali'q shaqasi' ha'm $3r - 3$ optikali'q shaqasi', ja'mi boli'p fononli'q spektrdin' $3r$ dana shaqasi' ali'nadi'.

Ma'seleler:

1. Kishi $|\vec{K}| \ll 1/a$ (u'lken tolqi'n uzi'nli'qlari') ha'm atomlardi'n' tek jaqi'n tegislikler menen ta'sir etisetug'i'n jag'dayi'ndag'i' (3.6)-ten'lemenin' tutas ortalig'ig'ini' tolqi'n ten'lemesine aylanatug'i'nli'g'i'n ko'rsetin'iz.

Ko'rsetpe: (3.6)-ten'lemedegi ekinshi ta'rtipli tuwi'ndi' ushi'n shekli ayi'rmalar formulasi'n paydalani'n'iz.

2. $K = \pi/a$ bolg'anda bazisi eki atomnan turatug'i'n kristaldi'n' podreshetkalari'ni'n bir birinen g'a rezsiz qozg'alatug'i'nli'g'i'n ko'rsetin'iz.

Ko'rsetpe: Buni'n' ushi'n $K = \pi/a$ bolg'an jag'daydag'i' akustikali'q ha'm optikali'q shaqalar ushi'n u menen v di'n' qatnaslari'n esaplaw kerek boladi'.

Kristallardi'n' ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'

Kristaldi'n' ishki energiyasi'n esaplaw, bunnan keyin oni'n' ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'n kristaldi'n' ani'qlaw ushi'n normal terbelislerin ha'm Boze-Eynshteyn tarqali'wi'n paydalani'w joli' menen barli'q oscillyatorlardi'n' energiyasi'n biliw menen a'melge asi'ri'latug'i'nli'g'i' tuwrali' joqari'da atap o'tilgen edi. Ma'selenin' ekinshi bo'limi ayri'qsha

qi'yi'nshi'li'qti' payda etpeytug'i'n bolsa da, ma'selenin' birinshi bo'limi matematikali'q ko'z-qarastan ju'da' quramali'. Usi' ku'nleri bunday ma'seleler a'piwayi' molekulalar ushi'n g'ana sheshilmekte. Sonli'qtan oscillyatorlardi'n' menshikli jiyiliklerin esaplawdi'n' a'piwayi'lasti'ri'lg'an usi'llari' qollani'ladi'. Bul usi'llardi'n' ayi'ri'mlari'n biz to'mende qarap shi'g'ami'z.

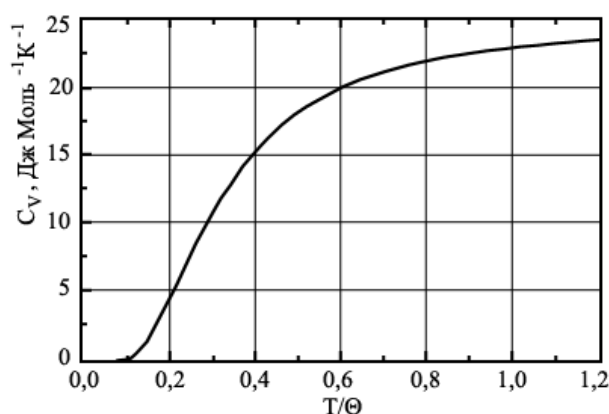
Eynshteyn modeli. Eynshteyn modelinde barli'q atomlar bir birinen g'a'rezsiz terbeledi ha'm barli'q atomlardi'n' terbelis jiyilikleri birdey. Bunday jag'dayda N dana atomg'a iye kristaldi'n' ishki energiyasi'n esaplaw ushi'n tek bir oscillyator kerek boladi'. Bunnan keyin na'tiyjeni oscillyatorlardi'n' sani' bolg'an $3N$ sani'na ko'beytiw kerek. Meyli ha'r bir oscillyator ω jiyiligi menen terbelisin. Bunday oscillyatordi'n' ortasha energiyasi'n Boze-Eynshteyn tarqali'w funkciyasi'n paydalani'wdi'n' ja'rdeminde esaplaymi'z:

$$\langle E \rangle = \langle n \rangle \hbar \omega = \hbar \omega / (\exp(\hbar \omega / kT) - 1). \quad (3.17)$$

Bul formulada $\langle n \rangle = \frac{1}{\exp[\frac{\hbar \omega}{kT}] - 1}$ arqali' oscillyatordagi' «toplang'an» energiya kvantlari'ni'n' ortasha sani' belgilengen. N_A dana atomg'a iye kristaldi'n' energiyasi' $\langle E_{mol} \rangle = 3N_A \langle E \rangle = 3N_A \langle n \rangle \hbar \omega$ tu'rinde esaplanadi'. Al turaqli' ko'lemdegi ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i' energiyani' temperatura boyi'nsha differenciallaw arqali' esaplanadi':

$$\begin{aligned} C_V &= (\partial E / \partial T)_V = \\ &= 3N_A k (\hbar \omega / kT)^2 \exp(\hbar \omega / kT) / (\exp(\hbar \omega / kT) - 1)^2. \end{aligned} \quad (3.18)$$

Model 20-100 K temperaturasi'nan joqari' temperaturalarda (yag'ni'y absolyut nol temperaturag'a ju'da' jaqi'n bolmag'anda) eksperiment penen jaqsi' sa'ykeslik ko'rsetedi. $C_V(T)$ g'a'rezliginin' temperaturadan g'a'rezligi 3.10-su'wrette keltirilgen.



3.10-su'wret.
Oscillyatordi'n' jiyiligi $\omega = k\Theta/\hbar$ bolg'an jag'day ushi'n Eynshteyn modeli tiykari'nda esaplang'an ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i' C_V ni'n' temperaturadan g'a'rezligi.

$\hbar \omega \ll kT$ bolg'anda (bul sha'rt joqari' temperaturalarda ori'n aladi') $C_V \approx 3N_A k = 3R$. Bul Dyulong ha'm Pti ni'zami'na sa'ykes keledi. $\hbar \omega \gg kT$ bolg'anda (bul sha'rt to'mengi temperaturalarda ori'n aladi') ha'm $T \rightarrow 0$ sheginde $C_V \approx 3N_A k \left(\frac{\hbar \omega}{kT}\right)^2 \exp\left[\frac{\hbar \omega}{kT}\right] \rightarrow 0$. Absolyut nolde ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'ni'n' nolge umti'li'wi'n termodinamikani'n' u'shinshi ni'zami' talap etedi. Biraq $C_V(T)$ funkciyasi'ni'n' kishireyiwi eksperimentte baqlang'an jag'dayg'a qarag'anda a'sterek ju'redi (eksperimentte $C_V \sim T^3$ ni'zami' baqlanadi'). Bul atomlardi'n' terbelislerinin' bir birinen g'a'rezsizligi haqqi'ndagi' gipotezani'n' duri's emes ekenligine baylani'sli'. Kristaldi' qurawshi' atomlar bir biri menen ta'sirlesedi, usi'ni'n' na'tiyjesinde kristallarda ha'r qi'yli' uzi'nli'qtag'i' serpimli tolqi'nlar payda boladi'. Bul tolqi'nlar atomlardi'n' bir birine baylani'sli' bolg'an kollektivlik terbelislerine sa'ykes keledi.

Biraq usi'nday kemshiligine qaramastan Eynshteyn modeli o'jire ha'm joqari' temperaturalardag'i' kristallardi'n' ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'n duri's ta'ripleydi. Bul model ayi'ri'm molekulalardi'n' ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'n ta'riplewge, optikali'q fononlardi'n' (olardi'n' jiyiligi tolqi'n vektori'ni'n' ma'nisinen derlik g'a'rezli emes) kristallardi'n' ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'na beretug'i'n u'lesin jaqsi' tu'sindire aladi'.

Atomlardi'n' kollektivlik normal terbelislerin esapqa ali'w to'mengi temperaturalardag'i' kristallardi'n' ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i' ushi'n ali'ng'an an'latpani'n' da'lligin a'dewir joqari'latadi'. Ma'sele sonnan ibarat, akustikali'q kollektivlik terbelislerdin' jiyiligi kishi. kT shamasindag'i' ji'lli'li'q terbelislerinin' energiyasi' olardi' qozdi'ri'w ushi'n jetedi. Bunday terbelisler kishi temperaturalardag'i' ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'na o'zlerinin' u'leslerin qosa aladi'. Al Eynshteyn modeli boyi'nsha barli'q oscillyatorlar sali'sti'rmali' u'lken jiyilik penen terbeledi ha'm qon'si'las energiyali'q qa'ddiler arasi'ndag'i' ayi'rmani'n' shamasi' $\hbar\omega \gg kT$ sharti ori'nlanatug'i'n bolg'anli'qtan oscillyatord'i'n' bir qa'ddinen ekinshi qa'ddige o'tiw itimalli'g'i' ju'da' kishi shamag'a ten' boladi'. Sonli'qtan olardi'n' ishki energiyag'a ha'm ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'na qosatug'i'n u'lesinin' shamasi' ju'da' kem boladi'.

Kristaldi'n' terbelisleri energiyasi'n esaplaw. Joqari'da atap o'tilgenindey, normal terbelislerdin' jiyiliklerinin' spektrin esaplaw ju'da' qi'yi'n ma'seleler qatari'na kiredi. Sonli'qtan kristallardag'i' atomlardi'n' terbelislerinin' energiyasi'n esaplag'anda ha'r qi'yli' a'piwayi'lasti'ri'wlardi' qollanadi'. Fononlardi'n' ruqsat etilgen tolqi'n vektorlari'ni'n' ma'nislerin ko'binese Fermi-gaz teoriyasi'nda Plank tarqali'wi'n keltirip shi'g'ari'w sxemasi' boyi'nsha a'melge asi'radi'. Atap aytqanda o'lishemi L ge ten' kubli'q kristaldi' aladi'. Bunnan keyin kristaldi'n' serpimli terbelislerin ta'ripleytug'i'n tolqi'n funkciyalari'n kompleksli tu'rde izleydi:

$$f(x, y, z, t) = \exp(i\vec{r}\vec{K} - i\alpha t) \quad (3.19)$$

Bunnan keyin kristaldi'n' serpimli terbelislerin ta'ripleytug'i'n $f(x, y, z, t)$ funkciyasi'ni'n' tu'rine da'wirli shegarali'q sha'rtlerdi qoyadi':

$$\begin{aligned} f(x + L, y, z, t) &= f(x, y, z, t); \\ f(x, y + L, z, t) &= f(x, y, z, t); \\ f(x, y, z + L, t) &= f(x, y, z, t), \end{aligned} \quad (3.20)$$

Bul sha'rtler

$$\exp(iLK_x) = 1; \quad \exp(iLK_y) = 1; \quad \exp(iLK_z) = 1; \quad (3.21)$$

sha'rtleri ori'nlang'anda g'ana ori'nlanadi'. Bunday jag'dayda tolqi'n vektori' $\vec{K}$ to'mendegidey diskret ma'nislerge iye boladi':

$$\vec{K} = (2\pi n_1 / L; \quad 2\pi n_2 / L; \quad 2\pi n_3 / L); \quad (3.22)$$

Bul an'latpalarda n_1, n_2 ha'm n_3 arqali' pu'tin sanlar belgilengen.

Bunday jag'dayda $\vec{K}$ vektori'ni'n' ha'r bir ruqsat etilgen ma'nisine K ken'isliginde $V_K = \left(\frac{2\pi}{L}\right)^3 = \frac{(2\pi)^3}{V}$ ko'lemi sa'ykes keledi. Bul an'latpada $V = L^3$ arqali' kristaldi'n' ko'lemi belgilengen. Bunnan keyin jiyiliktin' tolqi'n vektori' $\vec{K}$ shamasinan g'a'rezligi boljap tabi'ladi'. A'dette ko'pshilik jag'daylarda $\omega(\vec{K})$ g'a'rezligin eksperimentte ali'ng'an g'a'rezlik tiykari'nda teoriyalig' jollar menen esaplaydi'. Bunnan keyin $\vec{K}$ vektori'ni'n' ruqsat etilgen

ma'nisleri oblasti'n shekleri ishinde $\omega(\vec{K})$ shamasi' az o'zgeretug'i'n ushastkalg'a bo'ledi. Bul procedura Eynshteyn modelinde paydalani'lg'an formulalardi' paydalani'wdi'n' mu'mkin boli'wi' ushi'n islenedi. Bunnan keyin sanli' usi'llar ja'rdeminde esaplani'p ati'rg'an fizikali'q shamag'a (mi'sali' ishki energiyag'a) barli'q ushastkalardi'n' u'lesleri qosi'p shi'g'i'ladi' (summalanadi').

Sferali'q simmetriya ori'n alatug'i'n jag'daydarda (bunday jag'daylarda ω shamasi' $\vec{K}$ vektori'ni'n' modulinen g'ana g'a'rezli boladi') normal terbelislerdin' jiyilikler boyi'nsha tarqali'wi'n paydalang'an qolayli' (bul tarqali'w ω shamasi'ni'n' qasi'nda $d\omega$ intervali'nda neshe normal terbelistin' bolatug'i'nli'g'i'n ko'rsetedi). $d\omega$ intervali'ndagi' normal terbelislerdin' sani'n dN arqali' belgilesek:

$$dN(\omega) = D(\omega)d\omega. \quad (3.23)$$

$D(\omega)$ ni'n' ja'rdeminde ko'p fizikali'q shamalardi'n' ortasha ma'nislerin tabi'w mu'mkin. Mi'sali':

$$\langle E \rangle = \int E(\omega) D(\omega) d\omega = \int \hbar\omega \langle n(\omega) \rangle D(\omega) d\omega. \quad (3.24)$$

$D(\omega)$ funkciyasi' normirovka sha'rtin qanaatlandi'ri'wi' kerek:

$$3N = \int D(\omega) d\omega. \quad (3.25)$$

Bul normirovka sha'rti normal terbelislerinin' uli'wmali'q sani'ni'n' $3N$ ge ten' boli'wi'ni'n' kerek ekenligin talap etedi.

Bunday jollar menen ma'seleni sheshiwdi Debay modeli mi'sali'nda qarap shi'g'ami'z.

Debay modeli. Debay modeli sheklerinde $\omega = Kv$ formulasi' qabi'l etiledi (v arqali' ses tolqi'nlari'ni'n' tezligi belgilengen). Usi'nday jaqi'nlas'i'wdi' tutas ortalig' jaqi'nlas'i'wi' dep ataydi'. Bunday jaqi'n keliwde fononlardi'n' dispersiyasi' menen dispersiyali'q g'a'rezliktin' optikali'q shaqasi'n esapqa ali'wdi'n' mu'mkinshiliginin' bolmaytug'i'nli'g'i' tu'sinikli. Soni'n' menen bir qatarda qosi'msha tu'rde v tezliginin' ma'nisi retinde ko'ldenen' ha'm boyli'q tolqi'nlardi'n' tezlikleri arasi'ndagi' ortasha ma'nis ali'nadi' (ko'ldenen' ha'm boyli'q tolqi'nlardi'n' tezlikleri arasi'ndagi' ayi'rmani'n' u'lken shama ekenligin atap o'temiz). $\omega(\vec{K})$ g'a'rezliginin' sferali'q simmetriyag'a iye ekenligi ma'seleni sheshiwdi a'dewir an'satlasti'radi'. Shamasi' belgilengen shamadan kishi bolg'an ruqsat etilgen $\vec{K}$ vektorlari'ni'n' sani'n K ken'isliktegi radiusi' $|\vec{K}|$ bolg'an sferani' $\vec{K}$ vektorlari'ni'n' ruqsat etilgen bir ma'nisine sa'ykes keletug'i'n ko'lemine bo'liw arqali' ani'qlanadi':

$$N_K = (4\pi K^3 / 3) / (2\pi / L)^3 = (L / 2\pi)^3 (4\pi\omega^3 / 3v^3) = V\omega^3 / (6v^3\pi^2) \quad (3.26)$$

$D(\omega)$ funkciyasi'n $dN_K = D(\omega)d\omega$ an'latpasi'nan tabi'wg'a boladi'. dN_K shamasi'n da tap sol si'yaqli' jollar menen tabadi'. Buni'n' ushi'n K ken'isliginde $|K|$ shamasi' $[|K|, |K + dK|]$ arali'g'i'nda qatlamni'n' ko'lemin $\left(\frac{2\pi}{L}\right)^3$ shamasi'na bo'ledi. Bunday jag'dayda $V = L^3$ ekenligin esapqa alsaq $D(\omega)$ funkciyasi' ushi'n to'mendegidey an'latpani' alami'z:

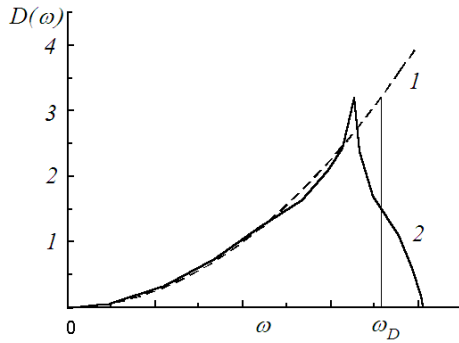
$$D(\omega) = dN_K / d\omega = (4\pi K^2 dK) / ((2\pi / L)^3 d\omega) = V\omega^2 / (2v^3\pi^2) \quad (3.27)$$

Normirovka sha'rtin umi'tpawi'mi'z za'ru'r. Bul sha'rt oscillyatordi'n' sani'ni'n' $3N$ ge ten' boli'wi'n talap etedi. Debay modelinde bolsa K vektori'ni'n' moduline shek qoyadi'. Oni'n' maksimalli'q ma'nisin K_D arqali' belgileymiz. Bunnan keyin bul shamani' (3.26)-

an'latpag'a qoysaq shep ta'repinde oscillyatorlardi'n' uli'wmali'q sani' bolg'an polyarizaciyanin' berilgen tipine sa'ykes keliwshi N ali'w mu'mkinshiligine iye bolami'z. (3.26)-an'latpag'a K_D ha'm $\omega_D = vK_D$ shamalari'n kirgizi'w arqali' to'mendegini alami'z:

$$\begin{aligned}\omega_D &= ((6N^3\pi^2)/V)^{1/3}; \\ K_D &= ((6N\pi^2)/V)^{1/3}.\end{aligned}\quad (3.28)$$

$D(\omega)$ funkciyasi'ni'n' tu'ri 3.11-su'wrette keltirilgen (1-iymeklik).



3.11-su'wret.
Debay modelindeki hallar ti'g'i'zli'g'i' funkciyasi' bolg'an $D(\omega)$ funkciyasi'.

Esaplawlar K_D shamasi'ni'n' ma'nisinin' π/a shamasi'na ju'da' jaqi'n ekenligin ko'rsetedi, al π/a shamasi'ni'n' Brillyuennin' birinshi zonasi'ni'n' shegarasi'na sa'ykes keletug'i'nli'g'i'n bilesiz. ko'remiz. Biraq Debay modeli sheklerinde Brillyuennin' birinshi zonasi'na sa'ykes keliwshi $\vec{K}$ vektorini'n' mu'mkin bolg'an ma'nislerinin' haqi'yqi'y oblasti' og'an sa'ykes kelmeytug'i'n sfera menen almasti'ri'ladi'.

Oscillyatorlardi'n' polyarizaciyanin' u'sh tipine sa'ykes keliwshi ishki energiyani'n' ma'nisi Debay teoriyasi'nda to'mendegi integral tu'rinde esaplanadi':

$$\begin{aligned}E &= 3 \int \hbar \omega n(\omega, T) D(\omega) d\omega = 3 \int_0^{\omega_D} \frac{\hbar \omega}{\exp(\hbar \omega / kT) - 1} \left(\frac{V \omega^2}{2\pi^2 v^3} \right) d\omega = \\ &= \frac{3V\hbar^4 T^4}{2\pi^2 v^3 \hbar^3} \int_0^{\omega_D} \frac{x^3 dx}{\exp(x) - 1}.\end{aligned}\quad (3.29)$$

Bul jerde $x = \frac{\hbar \omega}{kT}$ ha'm $x_D = \frac{\hbar \omega_D}{kT} = \frac{\Theta}{T}$. Bul jerde Θ arqali' Debay temperaturasi' belgilengen. Oni'n' shamasi' mi'nag'an ten':

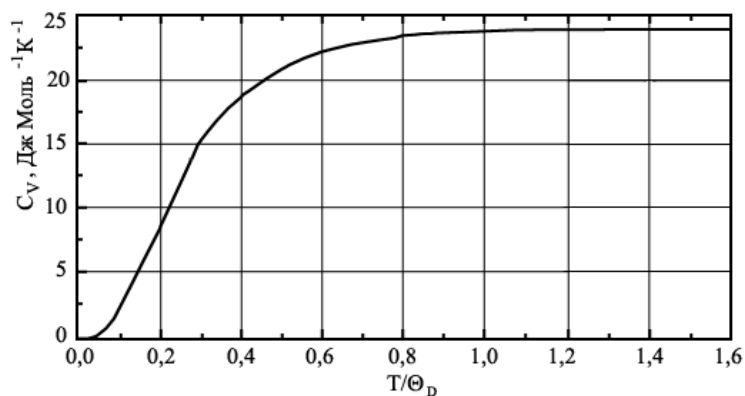
$$\Theta = \omega_D \hbar / k = (v \hbar / k) ((6N^3 \pi^2) / V)^{1/3}.\quad (3.30)$$

(3.29)-integraldi'n' tek sanli' usi'llar menen esaplanatug'i'nli'g'i'n atap o'temiz.

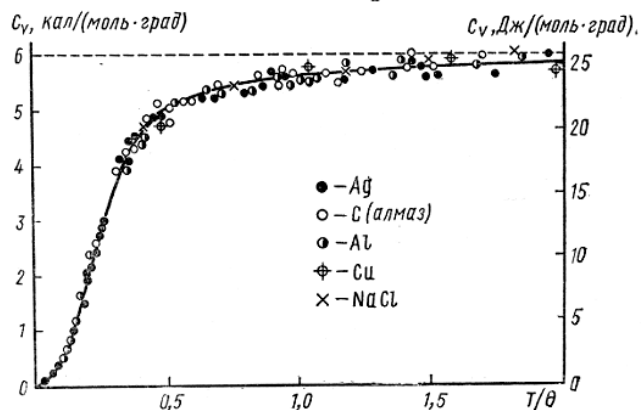
C_V ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'n tabi'w ushi'n (3.29) di' temperatura T boyi'nsha differenciallaw kerek:

$$\begin{aligned}C_V &= \left(\frac{3V\hbar^2}{2\pi^2 v^3 k T^2} \right) \int_0^{\omega_D} \frac{\omega^4 \exp(\hbar \omega / kT)}{(\exp(\hbar \omega / kT) - 1)^2} d\omega = \\ &= \frac{9N\hbar^3 T^3}{\Theta^3} \int_0^{\omega_D} \frac{\exp(x) x^4 dx}{(\exp(x) - 1)^2}.\end{aligned}\quad (3.31)$$

(3.31)-an'latpadagi' integraldi' (3.29)-an'latpa si'yaqli' tek sanli' usi'llardi'n' ja'rdeminde esaplaw mu'mkin. $C_V(T)$ g'a rezligi 3.12-su'wrette keltirilgen.



3.12-su'wret.
Debay modeli boyi'nsha
esaplang'an $C_V(T)$ g'a'rezligi.
Abscissa ko'sheri boyi'nsha
keltirilgen temperatura $\frac{T}{\Theta}$
qoyi'lg'an.



3.12-a su'wret.
Ayi'ri'm zatlardi'n'
eksperimentte ali'ng'an ji'lli'li'q
si'yi'mli'qlari'ni'n'
temperaturadan g'a'rezligi.
Tutas si'zi'q penen Debay modeli
tiykari'nda si'zi'lg'an teoriyali'q
iymeklik belgilengen.

Joqari' temperaturalarda $C_V(T)$ klassikali'q $3R$ ma'nisine umti'ladi' (4-ma'selege qaran'i'z).

To'mengi temperaturalarda $C_V(T) \approx \text{const} \cdot T^3$. Usi' ten'liktin' duri'sli'g'i'n ko'rsetemiz. (3.31)-an'latpada $T \rightarrow 0$ sheginde $x \rightarrow \infty$ ha'm $x_D \rightarrow \infty$ ekenligin itibarg'a alami'z. Bunday jag'dayda (3.31)-integrali'ni'n' shegaralari'n nol menen sheksizlik dep esaplaymi'z. Integraldi'n' o'zi bazi' bir konstantag'a ten' boli'p shi'g'adi'. Solay etip $C_V(T) \approx \text{const} \cdot T^3$ g'a'rezliginin' ori'n alatug'i'nli'g'i' da'lillenedi.

$C_V(T) \approx \text{const} \cdot T^3$ g'a'rezligin (ni'zami'n) to'mendegidey tu'rde ko'rsetpelirek etip ali'w mu'mkin. Temperatura nolge umti'lg'anda (yag'ni'y $T \rightarrow 0$ sha'rti ori'nlang'anda) C_V ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'na tiykarg'i' u'lesti kishi jiyilikke iye akustikali'q terbelisler beredi. Al Debay modeli bolsa kishi jiyilikke iye akustikali'q terbelislerdi ta'ripleydi. Sonli'qtan $kT > \hbar\omega = \hbar v K$. K ken'isliginde usi'nday vektorlardi'n' oblasti' boli'p ko'lemi $(kT)^3$ shamasi'na proporcional bolg'an sfera xi'zmet etedi. Ha'r bir fonon ortasha $(kT)^1$ shamasi'na barabar energiyag'a iye boladi'. Sonli'qtan energiyani'n' qori' (zapasi') normal terbelislerdin' sani'na proporcional ha'm olardi'n' ha'r qaysi'si'ni'n' ortasha energiyasi' $(kT)^4$ shamasi'na ten' boli'p shi'g'adi'. C_V ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'n energiyani'n' temperatura boyi'nsha ali'ng'an tuwi'ndi'si'na ten':

$$C_V(T) = (\partial E / \partial T)_V \approx \text{const} \cdot T^3. \quad (3.32)$$

Solay etip Debay modeli to'mengi temperaturalarda ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i' bolg'an $C_V(T)$ shamasi'n jetkilikli da'rejede duri's ta'ripleydi. Sonli'qtan oni' fononlardi'n' dispersiyali'q g'a'rezliginin' akustikali'q shaqalari'ni'n' to'mengi temperaturalardag'i' ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'na qosatug'i'n u'lesin esaplaw ushi'n jiyi qollanadi'. Soni'n' menen birge Debay modelin nurlardi'n' zatlardag'i' shashi'rawi'n boljaw, neytronlar menen fotonlardi'n' fononlar menen ta'sir etisiwin izertlewlerde de ko'p qollanadi'. Eksperimentalli'q na'tiyjeler

tiykari'nda ha'r bir zat ushi'n ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'ni'n' ma'nisi de, Debay temperaturasi'ni'n' ma'nisi de ani'qlang'an ha'm olar ha'r qi'yli' spravoshniklerde berilgen.

Biz de to'mende ha'r qi'yli' ximiyali'q elementler ha'm bazi' bir birikpeler ushi'n Debay temperaturasi'ni'n' ma'nislerin keste tu'rinde beremiz.

Элемент	θ , К	Элемент	θ , К	Элемент	θ , К
Be	1160	Fe	467	Al	418
Mg	406	Co	445	In	109
Ca	219	Ni	456	Tl	89
La	132	Pd	275	C (алмаз)	1910
Ti	278	NaCl	320	Si	658
Pt	229	KCl	227	Ge	366
V	273	Cu	339	Sn (серое)	212
Nb	252	Ag	225	Sn (белое)	189
Ta	231	Au	165	Pb	94,5
Cr	402	Zn	308	Bi	117
Mo	425	Cd	300	KBr	174
W	(379)	Hg	(60—90)	CaF ₂	474

Fononlardi'n' dispersiyali'q g'a'rezliginin' optikali'q shaqalari'n juwi'q tu'rde approksimaciyalaw ushi'n Eynshteynnin' modelin jiyirek qollanadi' yamasa Debay modeline uqsas bolg'an modellerden paydalanadi'. Bul modellerde tiykari'nan $\omega(\vec{K})$ funkciyasi'ni'n' tu'rin o'zgertiw menen sheklenedi.

Biz endi fononlar haqqi'nda toli'g'i'raq ga'p etemiz.

Biz joqari'da pa'njerenin' normal terbelisinin' energiyasi'ni'n' massasi' terbeliwshi atomlardi'n' massasi'na ten', normal terbelislerdin' jiyiligine ten' jiyilik penen terbeletug'i'n oscillyator'di'n' energiyasi'na ten' ekenligin atap o'tken edik. i-nomerli normal terbelistin' jiyiligin ω_i , al energiyasi'n E_i arqali' belgileyik. 3N normal terbelistin' barli'g'i' da qozg'an kristaldi'n' toli'q energiyasi' $E = \sum_{i=1}^{3N} E_i$ shamasina ten'. Solay etip bir biri menen baylani'sli' terbeletug'i'n N atomnan turatug'i'n kristaldi'n' toli'q energiyasi' (ga'ptin' ji'lli'li'q energiyasi' haqqi'nda ju'rip ati'rg'anli'g'i'n umi'tpaymi'z) 3N dana bir birinen g'a'rezsiz terbeletug'i'n normal si'ziqli' garmonikali'q oscillyator'di'n' energiyasi'na ten'. Bunday mag'anada N dana terbeliwshi atomnan turatug'i'n sistema 3N dana normal oscillyator'ga ekvivalent. Sonli'qtan bunday sistemani'n' ortasha energiyasi'n ani'qlaw ma'selesin normal oscillyatorlardi'n' ortasha energiyasi'n esaplaw ma'sele si'ni menen almasti'ri'w mu'mkin.

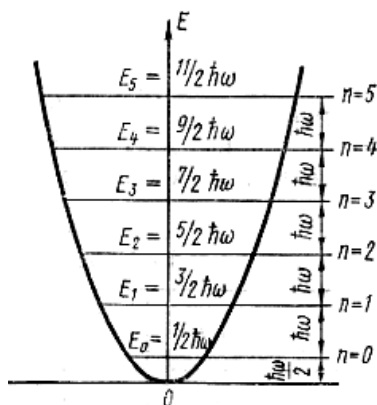
Normal oscillyatorlardi'n' haqi'yqi'y atomlar menen massasi'nan basqa hesh qanday qatnasi'ni'n' joq ekenligin atap o'temiz. Ha'r bir oscillyator pa'njerenin' bir normal terbelisine sa'ykes keledi, al sonday bir normal terbeliske kristaldag'i' barli'q atomlardi'n' tap sonday jiyiliktegi terbelisi sa'ykes keledi.

Kvant oscillyatori'ni'n' energiyasi' to'mendegi formulani'n' ja'rdeminde esaplanadi':

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2}\right) \hbar \omega, (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (3.33)$$

Bul formulada ω arqali' oscillyator'di'n' terbelis jiyiligi, al n arqali' kvant sani' belgilengen.

To'mende keltirilgen su'wrette si'ziqli' garmonikali'q oscillyator'di'n' energiyali'q spektri keltirilgen (3.12-b su'wret). Bul spektr bir birinen $\hbar \omega$ qashiqli'g'i'nda turg'an diskret qa'ddilerdin' ji'ynag'i'nan turadi'.



3.12-b su'wret.

Si'zi'qli' garmonikali'q oscillyatordi'n' energiyali'q spektri. Bul spektr bir birinen $\hbar\omega$ qashi'qli'g'i'nda turg'an diskret qa'ddilerdin' ji'ynag'i'nan turadi'.

Normal terbelislerdin' energiyasi' normal oscillyatordi'n' (garmonikali'q oscillyatordi'n') energiyasi'na ten' bolg'anli'qtan kristalli'q pa'njerenin' normal terbelislerinin' energiyasi' (3.33)-an'latpani'n' ja'rdeminde ani'qlani'wi' kerek. Al oni'n' energiyali'q spektri 3.12 b su'wrette keltirilgen spektrge sa'ykes keliwi sha'rt.

Ji'lli'li'q terbelislerinde kristalli'q pa'njere ta'repinen juti'li'wi' yamasa shi'g'ari'li'wi' mu'mkin bolg'an minimalli'q energiyani'n' ma'nisi (demek normal terbelistin' energiyani'n' bir qa'ddinen ekinshi qa'ddine o'tiwi ushi'n kerek bolatug'i'n minimalli'q energiyani'n' ma'nisi) $\hbar\omega$ shamasina ten' eken. Pa'njerenin' ji'lli'li'q terbelislerinin' energiyasi'ni'n' bul porciyasi'na yamasa energiyasi'ni'n' kvanti'na fonon degen atama berilgen.

Joqari'da ayti'lg'an jag'daylardi' ayqi'nlasti'ri'w ushi'n a'piwayi' sali'sti'ri'w (analogiya) keltiremiz. Meyli absolyut qara denenin' ishindeg'i quwi'sli'q ten' salmaqli' ji'lli'li'q nurlani'wi' menen tolti'ri'lg'an bolsi'n. Kvantli'q ko'z-qarastan bul nurlani'w jaqti'li'qti'n' kvantlari' bolg'an fotonlar gazi' tu'rinde qabi'l etiledi. Fotonlardin' energiyasi' $\varepsilon = \hbar\omega = h\nu$, impulsi $p = \hbar\omega/c = h/\lambda$ shamalari'na ten'. Bul formulalarda c arqali' jaqti'li'qti'n' vakuumdag'i' tezligi, λ arqali' jaqti'li'q tolqi'ni'ni'n' tolqi'n uzi'nli'g'i', ν arqali' jaqti'li'qti'n' jiyiligi belgilengen. Tap sol si'yaqli' kristaldi' tolti'ri'p turatug'i'n serpimli tolqi'nlardi' da pa'njerenin' normal terbelisleri bolg'an fononlardan turatug'i'n gaz si'pati'nda ko'z aldi'mi'zg'a keltiriwimizge boladi'. Bir fononni'n' energiyasi' $\varepsilon_{fonon} = \hbar\omega = h\nu$, al impulsi bolsa $p_{fonon} = \hbar\omega/\nu = h/\lambda$ shamalari'na ten'.

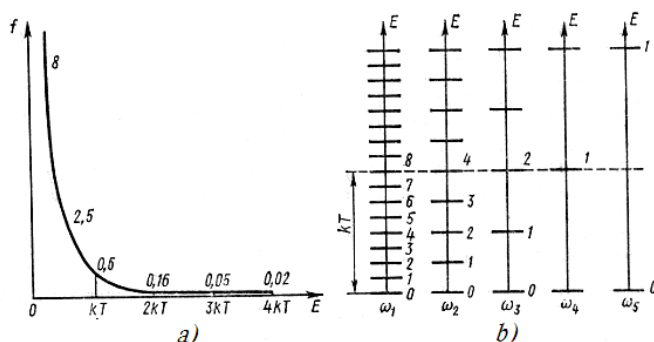
Usi'nday ko'z-qaraslar boyi'nsha qi'zdi'ri'lg'an kristal fonon gazi' menen tolti'ri'lg'an quti'g'a megzes.

Fononlar da fotonlar si'yaqli' Boze-Eynshteyn tarqali'w funkciyasi' menen ta'riplenedi:

$$f(E) = \frac{1}{\exp\left[\frac{\varepsilon_{fonon}}{kT}\right] - 1} = \frac{1}{\exp\left[\frac{\hbar\omega}{kT}\right] - 1}.$$

Qozi'w da'rejesine baylani'sli' normal terbelisler birdey bolg'an bir neshe fonondi' nurlandi'ra aladi'. Mi'sali', eger normal terbelis 3-qa'ddige shekem qozg'an bolsa (3.12-b su'wretti qaran'i'z), onda oni'n' energiyasi' $E_n = \left(3 + \frac{1}{2}\right)\hbar\omega$ shamasina ten' boladi'. Demek ol berilgen normal terbelis qaysi'si'ni'n' energiyasi' $\hbar\omega$ g'a ten' bolg'an u'sh fonondi' payda etti dep esaplaymi'z. Al to'mendegi 3.13 -s su'wrette fononlar ushi'n $f(E)$ tarqali'w funkciyasi'ni'n' grafigi keltirilgen. Bul grafikte berilgen T temperaturada energiyasi' $\hbar\omega \approx kT$ g'a ten' bolg'an barli'q normal terbelislerdin' qozatug'i'nli'g'i' ko'rinip tur. Al energiyasi' $\hbar\omega > kT$ sha'rtin qanaatlendi'ratug'i'n normal terbelisler bunday temperaturalarda derlik qozbaydi'. 3.13-s su'wrette berilgen T temperaturada jiyiligi ω_1 bolg'an terbelisler 8-qa'ddige shekem qozg'an. Demek bul normal terbelis ortasha ha'r qaysi'si'ni'n' energiyasi' $\hbar\omega_1 = kT/8$ ge ten' segiz birdey fonondi' payda etedi eken.

Jiyiligi ω_2 ge ten' bolg'an normal terbelis shama menen 4-qa'ddige shekem, al jiyiligi ω_3 ten' bolg'an normal terbelis 2-qa'ddige shekem qozg'an. Al jiyiligi ω_4 bolg'an normal terbelis 1-qa'ddige shekem qoza aladi'.



33.13 –s su'wret.
fononlar ushi'n $f(E)$ tarqali'w
funkciyasi'ni'n' grafigi keltirilgen. Bul
grafikte berilgen T temperaturada
energiyasi' $\hbar\omega \approx kT$ g'a ten' bolg'an
barli'q normal terbelislerdin'
qozatug'i'nli'g'i' ko'rinip tur.

Ma'seleler:

5. (3.31)-an'latpa tiykari'nda Dyulong ha'm Pti ni'zami'n ha'm joqari' temperaturalar ushi'n ($T \gg \theta$ bolg'an temperaturalar ushi'n) Dyulong ha'm Pti ni'zami'na qosi'mshalar (du'zetiwlər) kirgizin'iz.

Ko'rsetpe. (3.31)-formuladag'i' integral asti'ndag'i' an'latpani' $\hbar\omega/kT$ kishi parametri boyi'nsha qatarg'a jayi'p oni'n' juwi'q ma'nisin esaplaw kerak.

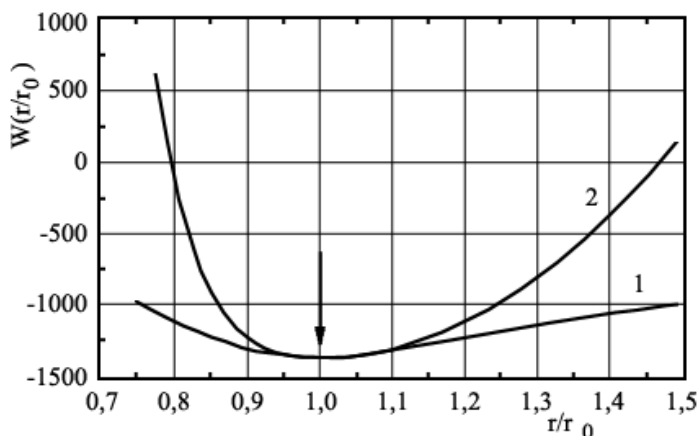
Angarmonikali'q jaqi'nlası'w

Biz joqari'da kristaldi' bir biri menen ta'sir etispeytug'i'n oscillyatorlardi'n' ji'ynag'i' dep qaradi'q. Bunday jag'dayda potentsialli'q energiya oscillyatordi'n' ten' salmaqli'qtan awi'si'wi'ni'n' kvadrati'na proporsional o'sedi, al pa'njerenin' qatti'li'g'i'n ta'ripleytug'i'n parametrlər bolsa oscillyatorlardi'n' ten' salmaqli'q haldan awi'si'wi'ni'n' o'siwine baylani'ssi'z o'zgermey qaladi'. Ma'seleni bunday etip qarawdi' garmonikali'q jaqi'nlası'w dep ataymi'z. Bunday modeller kristaldi'n' ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'n duri's esaplawg'a mu'mkinshilik beredi, biraq fononlardi'n' bir biri menen ta'sirlesiwlerine baylani'sli' bolg'an kristaldi'n' ko'plegen parametrlər (mi'sali' ji'lli'li'q o'tkizgishlikti) esaplawg'a mu'mkinshilik bermeydi. Garmonikali'q modellerdin' fononlardi'n' fononlar menen ta'sirlesiwlerin esapqa almaytug'i'nli'g'i'n an'g'ari'wi'mi'z kerak. Biz to'mende kristaldi'n' serpimlik modullerinin' temperaturag'a g'a rezliginin', ji'lli'li'q ken'eyiwinin' angarmonikali'q qosi'mtalardi' krgiziwdi talap etetug'i'nli'g'i'n ko'remiz. Bul qosi'mtalar oscillyatorlardi'n' energiyasi'ni'n' olardi'n' ten' salmaqli'q awhaldan awi'si'wlari'ni'n' kvadrati'nan g'a rezli emes ekenliginen derek beredi..

Kristallardi'n' ji'lli'li'q ken'eyiwi. Derlik barli'q kristallar (tap sol si'yaqli' suyi'qli'qlardi'n' basi'm ko'pshiligi) temperaturani'n' joqari'lawi' menen ken'eyedi. Eger bul qubi'slardi' teren' tu'rde qaraytug'i'n bolsaq, olardi'n' ta'biyati'ni'n' ju'da' quramali' ekenligine iseniwge boladi'. Ji'lli'li'q ken'eyiwin kristaldi'n' atomlari' arasi'ndag'i' ortasha qashi'qli'qti'n' u'lkeyiwi menen baylani'sli' dep esaplaydi'. Biraq ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'ni'n' sebebi ju'da' ko'p boli'wi' mu'mkin. Soni'n' ishinde potentsial energiyani'n' atomlardi'n' awi'si'wi'ni'n' asimmetriyali'q (yag'ni'y simmetriyani'n' bolmawi'nan) g'a rezliginen ori'n ali'wi' mu'mkin. Biraq soni'n' menen bir qatarda ji'lli'li'q ken'eyiwi temperatura joqari'lag'anda atomlar arasi'ndag'i' ta'sir etiw ku'shinin' o'zgeriwinin', ha'r qi'yli' atomlardi'n' qaytadan toparlası'wi'ni'n', olardi'n' elektronli'q bultlari'ni'n' orientaciyalari'ni'n' o'zgerislerge ushi'rawi'na da, basqa da sebeplerge baylani'sli' boli'wi' itimal. To'mende biz tiykari'nan birinshi sebepti qarap shi'g'ami'z. Oni' a'dette tiykarg'i' sebeplerdin' qatari'na kirgizedi. Al basqa sebeplardi tallaw quramali' matematikali'q proceduralardi' talap etedi.

En' da'slep ji'lli'li'q ken'eyiwin joqari'da atap o'tilgen garmonikali'q jaqi'nlası'wlardi'n' ja'rdeminde ta'riplewdin' mu'mkin emes ekenligin atap o'temiz. Bul jag'dayda atomlardi'

ten' salmaqliq orni'na qaytari'wshi' ku'shtin' shamasi' awi'si'wdi'n' o'zine, al potencial energiya bolsa atomlardi'n' awi'si'wi'ni'n' kvadrati'na proporcional edi.



3.13-su'wret.

Ha'r qanday jaqi'nlas'i'wlardag'i' eki atom arasi'ndag'i' ta'sirlesiwge sa'ykes keliwshi potencial energiya $U(r)$ din' atomlar arasi'ndag'i' kashi'qli'q r ge g'a'rezligi

Eki atom arasi'ndag'i' ta'sirlesiwge sa'ykes keliwshi potencial energiya $U(r)$ shamasi'ni'n' olar arasi'ndag'i' qashi'qli'q r den g'a'rezligin haqi'yqi'y jag'daylar ushi'n (3.13-su'wretteg'i 1-si'zi'q) ha'm garmonikali'q jaqi'nlas'i'w jag'dayi' ushi'n qarayi'q (3.13-su'wretteg'i 2-si'zi'q). Keyingi (garmonikali'q jaqi'nlas'i'wda) jag'dayda atomlardi'n' terbelis amplitudalari'ni'n' o'siwi menen olardi'n' potencial energiyalari'ni'n' minimumi'na sa'ykes keliwshi ten' salmaqli'q ori'nlari' (yag'ni'y olar arasi'ndag'i' qashi'qli'qti'n' ortasha ma'nisi) o'zgermeydi. Demek bunday jag'daylarda ji'lli'li'q ken'eyiwi ori'n almaydi' degen so'z. Al eger haqi'yqatta ori'n alatug'i'n $U(r)$ g'a'rezliginin' temperaturani'n' joqari'lawi' menen o'zgerisin qaraytug'i'n bolsaq, onda energiyani'n' o'siwi menen baqlanatug'i'n oni'n' asimmetriyali'g'i'nan atomlar arasi'ndag'i' ortasha kashi'qli'q o'zgeriske ushi'raydi'. Atomlar arasi'ndag'i' qashi'qli'qti'n' o'siw da'rejesi $U(r)$ g'a'rezliginin' simmetriyali'qtan awi'si'w (shetke ketiw) da'rejesine baylani'sli'. Usi'nday asimmetriyali'qti' esapqa ali'w ushi'n $U(r)$ funkciyasi'n $(r - r_0)$ boyi'nsha $(r - r_0)^2$ shamasi'na sali'sti'rg'anda joqari'raq da'rejege iye qatarg'a jayi'w kerek boladi'. Asimmetriyali'q a'dette $(r - r_0)^3$ ag'zasi' ta'repinen ta'riplenedi.

$$U(r) = U(r_0) + c(r - r_0)^2 + g(r - r_0)^3 + \dots \quad (3.33)$$

Bolcman tarqali'wi' ori'n alatug'i'n Jetkilikli da'rejedegi joqari' temperaturalarda (3.33)-an'latpani' esapqa ali'w to'mendegidey an'latpani'n' ali'ni'wi'na ali'p keledi:

$$\langle r \rangle \approx r_0 + [3gk / (3c^2)]T \quad (3.34)$$

Bul na'tiyje o'jire temperaturalari'na jaqi'n temperaturaldag'i' ji'lli'li'q ken'eyiwinin' emperikali'q ni'zamlari'n esaplawg'a mu'mkinshilik beredi:

$$l(T) = l_0(1 + \alpha(T - T_0)), \quad (3.35)$$

Bul formulada l_0 arqali' denenin' $T = T_0$ temperaturadag'i' uzi'nli'g'i' belgilengen, al $l(T)$ bolsa denenin' berilgen T temperaturasi'ndag'i' uzi'nli'g'i'. α parametrin denenin' si'zi'qli' ji'lli'li'q ken'eyiwi koefficienti yamasa ji'lli'li'q ken'eyiw koefficienti dep ataladi'. Bul koefficienttin' ma'nisi fizikada bi'layi'nsha ani'qlanadi':

$$\alpha = (1/l)(dl/dT), \quad (3.36)$$

α shamasi'ni'n' (koefficientinin') ma'nisin o'lshevi ushi'n bir neshe a'piwayi' ha'm da'l usi'llar islep shi'g'i'lg'an. Olardi'n' ishindeg'i en' ko'p tarqalg'ani' dilatometriya boli'p tabi'ladi'. Bul usi'lda u'lginin' uzi'nli'g'i' ha'r qi'yli' temperaturalarda da'l ani'qlanadi'. Usi' mag'li'wmatlar tiykari'nda ji'lli'li'q ken'eyiw koefficientinin' ma'nisi esaplanadi'. Al rentgenografiyada (rentgenografiyali'q dilatometriya) bolsa ha'r qi'yli' temperaturalardag'i' kristallografiyali'q tegisliklar arasi'nda qashi'qli'qlardi'n' ma'nisi an'sat o'lshenedi. Na'tiyjede $d(T)$ g'arezligi ani'qlanadi'. Al rentgenografiyali'q eksperimentlerdin' optikali'q sxemasi'na baylani'sli' u'lginin' uzi'nli'g'i'n $d(T) = \text{const} \cdot l(T)$ formulasi'na sa'ykes ani'qlaydi'. O'lshevlarda ani'qlang'an $d(T)$ yamasa $l(T)$ g'arezliklari boyi'nsha (3.36)-formulani'n' ja'rdeminde α esaplanadi'.

α shamasi'ni'n' ma'nisi berilgan zattag'i' ha'r ki'yli' temperaturalardag'i' atomlardi'n' terbelislerin ta'riyplewdeg'i gramonikali'q jaqi'nlas'i'wdi'n' da'lligi haqqi'nda, soni'n' menen birge s menen g parametrlari jo'ninde da'l informaciyani' beredi. Bul qatti' deneler teoriyasi' ushi'n ju'da' a'hmiyetli. Soni'n' menen birge zatti'n' quri'li'si'ndag'i' qa'legen o'zgerisler, ta'sirlesiw ku'shlerinin' o'zgerisleri de α ni'n' o'zgeriwine ali'p keledi. Sonli'qtan $\alpha(T)$ shamasi'n o'lshevi fizika menen texnikada materiallardin' sapasi'n menen qurami'n qadag'alaw, ji'lli'li'q penen qayta islew din' en' jaqsi' na'tiyje beretug'i'n variantlari'n ani'qlaw, basqa da ma'selelerdi sheshiw ushi'n ken'nen qollani'ladi'. Bunday izertlewler α shamasi'n fazali'q o'tiwler ori'n almaytug'i'n temperaturani'n' sali'sti'rmali' kishi intervallari'nda (shama mpenen 200-300 K) turaqli' dep esaplawg'a mu'mkinshilik beredi. Usi'ni'n' menen birge α shamasi'ni'n' to'mengi temperaturalar oblasti'nda da (1-100 K) sezilerliktey o'zgeretug'i'nli'g'i'n an'g'arami'z.

Ko'pshilik zatlar ushi'n $T = 200 - 500$ K temperaturalarda α ni'n' ma'nisi $10^{-5} 1/T$ a'tirapi'nda boladi'. Ayi'ri'm zatlar ushi'n (temir-nikel quymalari'nda, invarli'q dep atalatug'i'n quymalarda) α shamasi'ni'n' ma'nisi ju'da' kishi boladi'. Olar $T = 200 - 500$ K temperaturalarda temperaturani'n' o'zgeriwi menen geometriyali'q parametrlarin ju'da' kishi shamalg'a o'zgertetug'i'n (mi'sali' saatlardi'n' mayatniklerin sog'i'w ushi'n) zatlar si'pati'nda texnikada ken'nen qollani'ladi'. Ayi'ri'm zatlardi'n' (tiykari'nan metallardi'n') si'zi'qli' ji'lli'li'q ken'eyiw koefficientlari to'mendegi kestdede berilgen.

O'jire temperaturalari'na jaqi'n temperaturalardag'i' si'zi'qli' ji'lli'li'q ken'eyiw koefficientlari

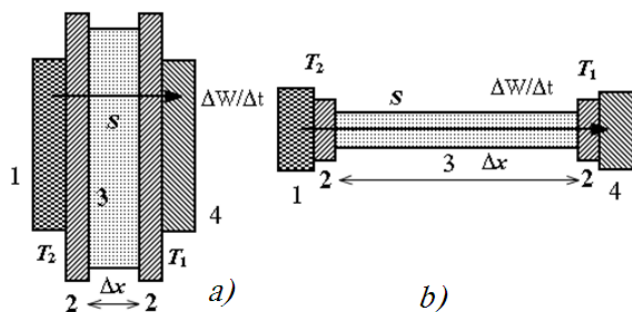
Zatlar	$\alpha \cdot 10^{-6}, \text{grad}^{-1}$	Zatlar	$\alpha \cdot 10^{-6}, \text{grad}^{-1}$
Li	45	Fe	11,7
Na	71	Ni	12,5
K	83	Cr	7,5
Cs	97	Mo	5,2
Cu	17,0	Ta	6,6
Ag	18,9	W	4,6
Au	13,9	Ir	6,5
Ca	22,5	Pd	11,6
Al	23,6	Pt	8,9
Pb	28,8	Cd	32,5
Ge	5,8	B	2

Kristallardi'n' ji'lli'li'q o'tkizgishligi. Denenin' ji'lli'li'q o'tkizgishlik koefficienti dep denenin' betinin' maydani'ni'n' bir birligi arqali' bir waqi't birliginde ha'm temperaturani'n' gradienti bir birlikke ten' bolg'anda o'tetug'i'n ji'lli'li'q energiyasi'ni'n' mug'dari'na aytadi'.

Ji'lli'li'q o'tkizgishlik koefficientin K arqali', bir birlik bet arqali' o'tken ji'lli'li'q energiyasi'n ΔW arqali', temperatura gradientin dT/dx arqali' belgileymiz (3.14-su'wret). Na'tiyjede to'mendegi formulani jazami'z (ani'qlama tiykari'nda):

$$\Delta W = \Delta S \Delta t \frac{dT}{dt} K. \quad (3.37)$$

Bul formula denelerdin' ji'lli'li'q o'tkizgishligin eksperimentte ani'qlag'anda da paydalani'ladi'. Buni'n' ushi'n K ni' esaplaw ushi'n kerek bolatug'i'n barli'q shamalar o'lshevedi. Ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'n o'lsheytug'i'n du'zilislerdin' sxemalari' 3.14-su'wrette keltirilgen.



3.14-su'wret.

Ji'lli'li'q o'tkizgishlikni o'lsheytug'i'n du'zilistin' sxemasi'.

a) kishi ji'lli'li'q o'tkizgishlikke iye u'lgiler ha'm b) u'lken ji'lli'li'q o'tkizgishlikke iye zatlar ushi'n.

Dielektriklerdi izertlegende ali'ng'an eksperimentalli'q mag'li'wmatlar temperatura absolyut nolden u'lkeygende K shamasini'n' u'lkeyetug'i'nli'g'i'n ko'rsetedi.; 3- - 50 K temperaturada K so'zli'g'an tu'rdegi maksimumg'a iye, al temperaturani'n' bunnan keyingi joqari'lawi' menen K ni'n' shamasini' kemeyedi. Sali'sti'rmali' joqari' temperaturalarda (shama menen Debay temperaturalarini'nda) ji'lli'li'q o'tkizgishlik koefficientinin' ma'nisi $1/T$ g'a proporcional kemeyedi.

Bunday g'a'rezlikni teoriyali'q tu'sindiriv to'mendegi jag'dayg'a tiykarlang'an: dielektriklerde ji'lli'li'q fononlar ali'p ju'redi, olar serpimli tolqi'nlar si'pati'nda ideal pa'njerede erkin qozg'aladi' ha'm kristalli'q pa'njerenin' defektleri menen ta'sir etiskende g'ana o'zlerinin' qozg'ali's bag'i'tlari'n o'zgertedi. Bunday defektler qatari'na da'nesheler menen kristalli'q bloklar arasi'ndag'i' shegaralar, kristalli'q pa'njerenin' basqa da defektlerin kirgiziwge boladi'. Soni'n' menen birge kristalli'q pa'njerenin' modulyaciyasi'na ali'p keletug'i'n kristalli'q pa'njerenin' bir tekli emes deformaciyalari' da fononlardi'n' kristal boyi'nsha tarqali'wi'na ta'sirin tiygizedi. Bunday modulyaciyalardi'n' tutqan orni'n ayri'qsha tu'rde ayta'p o'tiwge tuwri' keledi. Sebebi sol modulyaciyalardi'n' ja'rdeminde fononlardi'n' bir biri menen ta'sirlesiw mexanizmleri tu'sindiriledi.

Biz joqari'da kristaldi' bir biri menen ta'sirlespeytug'i'n oscillyatorlardi'n' ji'ynag'i' si'pati'nda qarap o'ttik. Bul jag'day kristaldi'n' ji'lli'li'q qa'siyetlerin tu'sindiriv ushi'n Boze-gaz teoriyasi'n paydalani'wg'a mu'mkinshilik berdi. Eger ten' salmaqli'q orni'nan awi'sqan atomlardi' keyinge qaytari'wshi' ku'shlerdin' shamasini' awi'si'w menen si'zi'qli' tu'rde baylani'sqan bolsa (yag'ni'y kristaldi'n' serpimli konstantalari' atomlardi'n' awi'si'wi'na baylani'sli' emes bolg'an jag'day) tap sonday jaqi'nlasiwdi' paydalani'w mu'mkin. Biraq bunday jaqi'nlasiw (bunday jaqi'nlasiwdi' garmonikali'q jaqi'nlasiw dep ataydi') juwi'q tu'rde ori'nlanadi'. Garmonikali'q jaqi'nlasiw juwi'q tu'rde ori'nlang'anda g'ana eki fonon arasi'ndag'i' ta'sirlesiwidin' fizikali'q mexanizmlerin tu'sindiriv mu'mkin. Si'zi'qli' bir tekli ortali'qlarda serpimli tolqi'nlardi'n' tarqali'w teoriyasi' boyi'nsha fononlardi'n' bir biri menen ta'sir etispewi kerek.

Eki fononni'n' bir biri menen ta'sir etisiwinin' mu'mkinshiligi to'mendegishe tu'sindiriledi. Meyli kristal boyi'nsha fonon tarqalatug'i'n bolsi'n. Ol kristaldi' o'zinin' tolqi'n uzi'nli'g'i' λ shamasina ten' da'wir menen deformaciyalaydi'. Bunday jag'dayda joqari'da

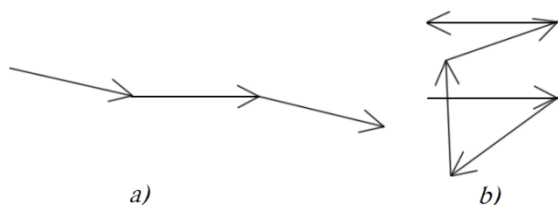
atap o'tilgandey kristalda serpmli turqli'lardi'n' modulyaciyasi' payda boladi'. Bul modulyaciya «difrakciyalig' pa'njere» ni eske tu'siredi. (bunday jag'day 3.1-su'wrette keltirilgen). Ekinshi fonon usi'nday «difrakciyalig' pa'njere» de qozg'ali'p difrakciyag'a ushi'rawi' mu'mkinshiligine iye boladi'. Na'tiyjede ol o'zinin' qozg'ali's bag'i'ti'n o'zgerledi. Buni'n' sebebi o'zine ta'n difrakciyalig' pa'njereni payda etken birinshi fonon boli'p tabi'ladi'. Bunday jag'dayda eki fononni'n' ta'sir etisiwi, soqli'g'i'si'wi' haqqi'nda ga'p etedi. Usi'nday soqli'g'i'si'widi'n' za'ru'rli sha'rti «si'zi'qli' emes effekt» - fonon o'tkende kristalli'q pa'njerenin' serpmli qa'siyetlerinin' o'zgeriwi boli'p tabi'ladi'. Sonli'qtan fononlardi'n' soqli'g'i'si'w processleri kristallardag'i' ta'sir etisiwlerdin' «angarmonikalig' si'zi'qli' emes» qa'siyetlerinin' ko'riniwi boli'p tabi'ladi'.

Fononlardi' bir biri menen siyrek ta'sir etisetug'i'n derlik ideal Boze-gaz dep qaraw ja'rdeminde ji'lli'li'q o'tkizgishlik koefficientin esaplag'anda ideal gaz ushi'n ali'ng'an formulani' paydalani'wg'a imkaniyat beredi:

$$K = C_V \langle v \rangle l_{eff}. \quad (3.38)$$

Bul formulada C_V arqali' turaqli' ko'lemdegi gazdin' bir birlik ko'leminin' ji'lli'li'q si'yimli'g'i' (biz qarap ati'rg'an jag'dayda Boze - gazdin'), $\langle v \rangle$ vrkali' gaz molekulari'ni'n' ortasha tezligi, l_{eff} arqali' gaz molekulasini'n' (biz qarap ati'rg'an jag'dayda bozonlardi'n') erkin ju'riw joli'ni'n' effektivlik uzi'nli'g'i' belgilengen.

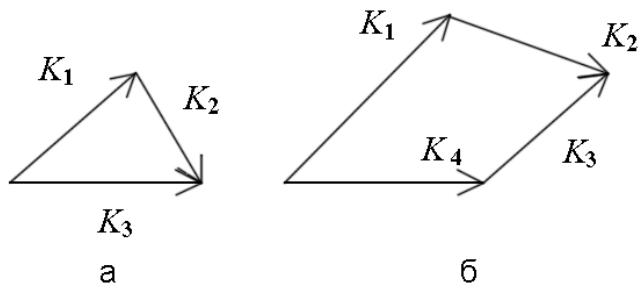
l_{eff} shamasini' ji'lli'li'qti' ali'p ju'riwshilerdin' bir biri menen soqli'g'i'si'w jiyiliginen ha'm en' basli'si' sol soqli'g'i'si'wlardi'n' berilgen tu'rinin' ji'lli'li'q «ali'p ju'riwshilerinin'» energiyani' ali'p ju'riw kartinasi'na qalayi'nsha ta'sir etetug'i'nli'g'i'na baylani'sli'. Energiya tasi'wshi' bo'lekshelerdin' qozg'ali's bag'i'ti'n kishi shamalarg'a o'zgeretug'i'n soqli'g'i'si'wlar energiyani'n' ali'p ju'riliwine ha'm l_{eff} shamasina a'zzi ta'sir etetug'i'nli'g'i' o'z-o'zinen tu'sinikli (3.15 a su'wret). Al ji'lli'li'q ali'p ju'riwshilerinin' bag'i'tlari'ni'n' ku'shli o'zgerisi energiyani'n' ali'p ju'riliwine ha'm l_{eff} shamasina u'lken ta'sir jasaydi' (3.15 b su'wret).



Ris. 3.15.

Soqli'g'i'si'wlardi'n' aqi'betinde qozg'ali's bag'i'ti' kishi mu'yeshlerge (a) ha'm u'lken mu'yeshlerge (b) o'zgeretug'i'n bo'lekshenin' qozg'ali'si'ni'n' sxemasi'.

Energiya menen impulstin' saqlani'w ni'zamlari' ori'nlanatug'i'n fononlardi'n' $\vec{k}_1 + \vec{k}_2 \rightarrow \vec{k}_3$ ha'm $\vec{k}_1 + \vec{k}_2 \rightarrow \vec{k}_3 + \vec{k}_4$ tu'rindagi soqli'g'i'si'wlar da ji'lli'li'q o'tkizgishlik koefficienti K ni'n' ju'da' az o'zgeriwine ali'p keledi (3.16-su'wretti de qaran'i'z). Bunday processlerdi normal processler (yamasa N-processler) dep ataydi'.



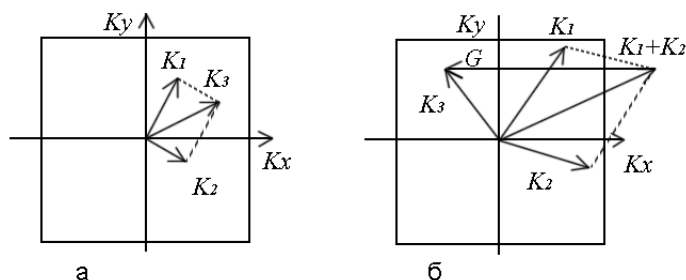
3.16-su'wret.

Energiya menen impulstin' saqlani'w ni'zamlari' ori'nlanatug'i'n fononlardi'n' $\vec{k}_1 + \vec{k}_2 \rightarrow \vec{k}_3$ ha'm $\vec{k}_1 + \vec{k}_2 \rightarrow \vec{k}_3 + \vec{k}_4$ tu'rindagi soqli'g'i'si'wlarini'n' sxemasi'.

Fononlardi'n' soqli'g'i'si'wi'ni'n' normal processlari' degen atama fononlardi'n' imulslari'ni'n' qosi'ndisi' bolg'an $\vec{k}_1 + \vec{k}_2$ shamasini'n' o'zgermey qali'wi' menen

baylani'sli'. Bunday processte soqli'g'i'satug'i'n fononlar kollektivinin' qozg'ali's bag'i'ti' da, usi' process penen baylani'sli' bolg'an ji'lli'li'qti'n' ko'shiw bag'i'ti' da saqlanadi'.

Kristallarda $\vec{k}_1 + \vec{k}_2 \rightarrow \vec{k}_3 + \vec{G}$ tu'rindagi soqli'g'i'si'wlardi'n' da ori'n ali'wi' mu'mkin (3.17-su'wrette keltirilgen). Bul an'latpada $\vec{G}$ arqali' keru pa'njere vektori' belgilengen. Demek $\vec{k}_1 + \vec{k}_2 \rightarrow \vec{k}_3 + \vec{G}$ tu'rindagi soqli'g'i'si'wda keru pa'njere vektori' $\vec{G}$ esapqa ali'nbaytug'i'n bolsa a'dettegi tu'rdegi jazı'wlarda impulstin' saqlanı'w ni'zami' ori'nlanbaydi'..



3.17-su'wret.
I'laqti'ri'w processinin' sxemasi'.

Bunday soqli'g'i'si'wlarda fononlardı'n' qosi'ndi' impulsı bolg'an $\vec{k}_1 + \vec{k}_2$ shaması'ni'n' ma'nisi Brillyuennin' birinshi zonasi'ni'n' shegarası'ni'n' arg'i' tamani'nda jaylasqan boli'wi' kerek ha'm fononlar sisteması'ni'n' impulsine kristalli'q pa'njereden ali'ng'an $\vec{G}$ impulsı qosi'ladi'. Usi'ni'n' na'tiyjesinde payda bolg'an fononni'n' impulsı $\vec{k}_3$ tin' bag'i'ti' fononlardı'n' qosi'ndi' impulsı bolg'an $\vec{k}_1 + \vec{k}_2$ vektori'ni'n' bag'i'ti'nan u'lken ayı'rmag'a iye boladı'. Bir soqli'g'i'si'wdi'n' saldari'nan fononlar sisteması'ni'n' qozg'ali's bag'i'ti' ku'shli o'zgeretug'i'n tap usi'nday processler ha'm usi' processler menen baylani'sli' bolg'an ji'lli'li'q energiyası'ni'n' ko'shiwinin' bag'i'ti'ni'n' o'zgeriwi ji'lli'li'q o'tkizgishlikke u'lken ta'sirin tiygizedi. Bunday processlerdi i'laqti'ri'w processleri (ori's tilinde processi' perenosa) yamasa U-processleri dep ataydı'.

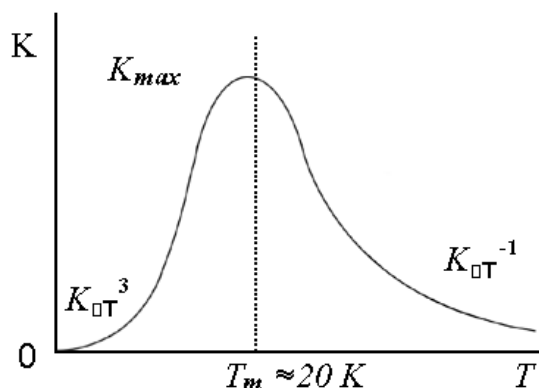
I'laqti'ri'w processlerinin' ju'zege keliwi ushi'n $|\vec{k}_1|$ ha'm $|\vec{k}_2|$ shamaları'ni'n' u'lken, olardı'n' san shaması'ni'n' $|\vec{G}/4|$ shaması'na barabar yamasa onnan u'lken boli'wi' tiyis. Bunday processler jetkilikli da'rejedegi joqari' temperaturalarda ori'n aladı'. Bunday temperaturalarda energiyası' da, tolqi'n vektori' da u'lken bolg'an fonondi' ushi'rati'wdi'n' itimalli'g'i' joqari'.

Ji'lli'li'q o'tkizgishlik koefficientinin' joqari' temperaturalardagi' temperaturadan g'a'rezliginin' shaması'n bahalaymi'z. Bunday jag'dayda C_V shama menen turaqli' ma'niske iye ha'm $|\vec{k}| > |\vec{G}/4|$ sha'rti ori'nlanatug'i'n fononlardı'n' sani' jetkilikli da'rejede u'lken. Bunday jag'dayda erkin ju'riw joli'ni'n' uzi'nli'g'i' joqari'da ayti'lg'an fononlar menen soqli'g'i'si'wdi'n' itimalli'g'i'na keru proporcional. Usi'nday itimalli'q bolsa olardı'n' sani'na yamasa temperatura T g'a proporcional (joqari'da biz fononlardı'n' sani'ni'n' temperaturag'a proporcional ekenligi haqqi'nda ga'p etken edik). Na'tiyjede $K(T) = const/T$ g'a'rezligine iye bolami'z. Bunday g'a'rezlik eksperimentte baqlanadı'.

Ji'lli'li'q o'tkizgishlik koefficientinin' to'mengi temperaturalardagi' temperaturali'q g'a'rezliginin' shaması'n bahalaymi'z. Bul jag'dayda C_V ni'n' shaması' T^3 ke proporcional, al $|\vec{k}| > |\vec{G}/4|$ sha'rti ori'nlanatug'i'n fononlardı'n' sani' ju'da' az, bul sannı'n' ma'nisi $\exp(-|\vec{G}|\hbar v/4kT)$ shaması'na proporcional ha'm $T \rightarrow 0$ sheginde nolge umti'ladi'. Bunday jag'dayda l_{eff} shaması'ni'n' ma'nisi sheksizlikke umti'li'wi' kerek. Biraq l_{eff} shaması'ni'n' sheksizlikke umti'li'wi' ori'n almaydı'. Sebebi fononlardı'n' ha'r qiyli' strukturali'q defektlerde shashi'rawi' o'zinin' ta'sirin tiygizedi. Bunday jag'dayda l_{eff} ni'n' shaması' temperaturadan g'a'rezsiz bolg'an defektlerdin' koncentraciyası' boyi'nsha ani'qlanadı'. Usi'

jag'daylarg'a baylani'sli' l_{eff} shamasi'n temperaturadan g'a'ezli emes, al C_V ni'n' shamasi' T^3 ke proporcional dep esaplay alami'z. Demek ji'lli'li'q o'tkizgishlik koefficienti $K(T)$ temperaturani'n' kubi'na proporcional dep juwmaq shi'g'arami'z. Bul jag'daydi'n' duri'sli'g'i' eksperimentlerde ani'q tasti'yi'qlanadi'.

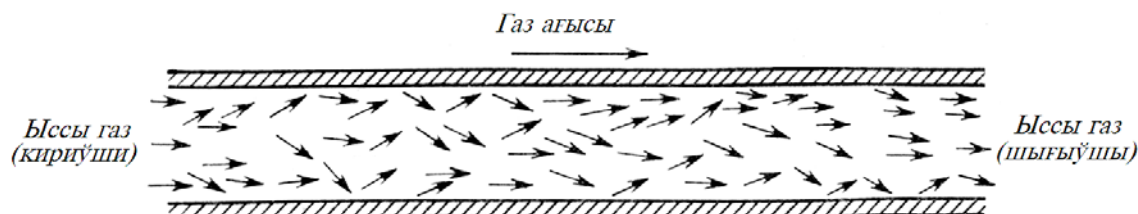
Solay etip ji'lli'li'q o'tkizgishlik koefficienti $K(T)$ ni'n' temperaturadan g'a'ezligin teoriyalı'q jollar menen tu'sindiriw mu'mkin. Bul g'a'ezlik 3.18-su'wrette keltirilgen. Bul su'wrette $K(T)$ ni'n' 20-50 K temperaturada maksimumg'a iye bolatug'i'nli'g'i' ha'm to'mengi temperaturalarda da, joqari' temperaturalarda da kemeyetug'i'nli'g'i' ko'rinip tur.



3.18-su'wret.
Kristalli'q dielektrikler ushi'n ji'lli'li'q o'tkizgishlik koefficientinin' temperaturadan g'a'ezliginin' sxema tu'rinde ko'rsetiliwi.

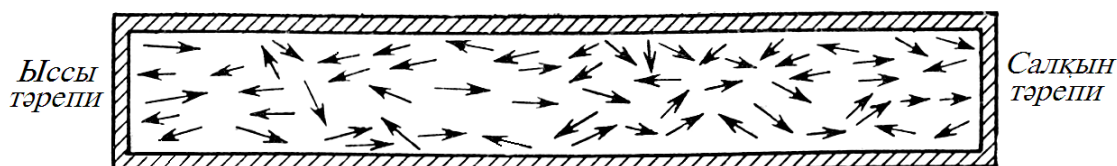
Biz joqari'da fononlardi'n' ji'lli'li'q o'tkizgishlik processine qosatug'i'n u'lesin qarap o'ttik. Al ji'lli'li'q energiyasi'n o'tkizgishler dep atalatug'i'n zatlardag'i' erkin elektronlar da ali'p ju're aladi'. A'dette erkin elektronlar o'tkizgishlerde ji'lli'li'q o'tkizgishlikke fononlarg'a sali'sti'rg'anda a'dewir u'lken u'les qosadi'.

Biz to'mende ko'rgizbelilik maqsetinde fononlar ta'repinen ji'lli'li'qti'n' ali'p ju'riliwi boyi'nsha bir neshe su'wretlerdi keltiremiz (Fn-1 - Fn-4 su'wretler).



Fn-1 su'wret.

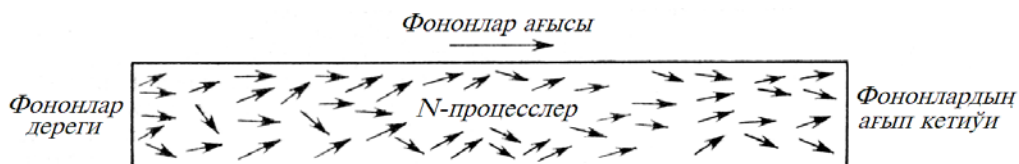
Gaz molekullari'ni'n' uzi'n ha'm ushlari' ashi'q nay arqali' ag'i'wi' (nay diwallari'nda su'ykelis bolmaydi' dep esaplaymi'z). Gaz molekullari'ni'n' bir biri menen serpimli soqli'g'i'si'wlari' toli'q impulsti ha'm ag'i'sti'n' energiyasi'n o'zgertpeydi. Sebebi ha'r bir soqli'g'i'si'wda soqli'g'i'si'wshi' bo'lekshelerdin' massalar orayi'ni'n' tezligi ha'm olardi'n' toli'q energiyasi' o'zgerissiz qaladi'. Sonli'qtan temperaturani'n' gradienti bolmag'an jag'dayda da naydi'n' shep ta'repinen on' ta'repine energiyani'n' ag'i'si' ori'n aladi'. Demek ji'lli'li'q qarsi'li'g'i' nolge ten', al ji'lli'li'q o'tkizgishliktin' shamasi' sheksiz u'lken.



Fn-2 su'wret.

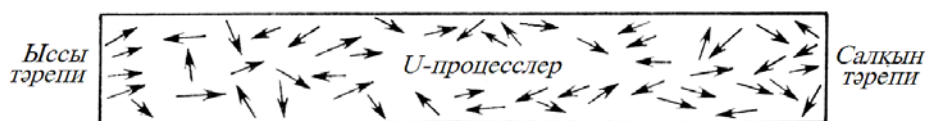
Massani'n' ko'shiwi ori'n almaytug'i'n jag'daydag'i' gazdi'n' ji'lli'li'q o'tkizgishligin a'dettegidey etip ani'qlawdi' illyustraciyalawshi' sxema. Bul jerde naydi'n' eki ushi'n da

jabi'q: molekulalar si'rttan kelip qosi'lmaydi' ha'm shi'g'i'p ta ketpeydi. Soqli'g'i'si'wshi' molekulalardi'n' temperaturalar gradienti bar bolg'an jag'dayda massalar orayi'ni'n' tezligi ortasha tezlikten joqari' bolg'an molekulalar shep ta'repke, al massalar orayi'ni'n' tezligi ortasha tezlikten to'men bolg'an molekulalar shep ta'repke qaray qozg'ali'w tendenciya'si'na iye boladi'. On' ta'repte u'lken bolg'an koncentraciya'ni'n' u'lken emes gradienti massani'n' qosi'ndi' ko'shiwinin' nolge shekem kemeyiwin, al naydi'n' i'ssi' ta'repinen salqi'n ta'repine qaray energiya'ni'n' ko'shiwin ta'miynleydi.



Fn-3 su'wret.

Fononlardi' uzi'n kristaldi'n' bir ushi'nda payda etiw mu'mkin (mi'sali' shep ta'reptegi ushi'n «fononli'q» lampa menen jaqti'landi'rsa). Usi'ni'n' na'tiyjesinde kristaldi'n' shep ta'repinen on' ta'repine qaray fononlar ag'a baslaydi'. Eger kristalda shashi'rawdi'n' tek a'dettegi (normal) processi (yag'ni'y N-process) ori'n alsa (bunday processte $\vec{k}_1 + \vec{k}_2 \rightarrow \vec{k}_3$ yamasa $\vec{k}_1 + \vec{k}_2 \rightarrow \vec{k}_3 + \vec{k}_4$ ten'likleri ori'nlanadi') soqli'g'i'si'wlarda fononlar ag'i'si' toli'q impulsin saqlaydi' ha'm fononlardi'n' bir bo'legi kristaldi'n' barli'q uzi'nli'g'i' boyi'nsha ag'i'p o'tedi. Shep ta'reptegi kristaldi'n' ushi'na kelip jetken fononlardi'n' (principinde) nurlarg'a aylandi'ri'w mu'mkin. Usi'ni'n' na'tiyjesinde fononlardi'n' ag'i'si' tamam boladi' (ori'sshasi' «stok fononov»). Bul jag'dayda da Fn-1 su'wrettegi jag'day ori'n aladi' ha'm ji'lli'li'q qarsi'li'g'i' nolge ten'.



Fn-3 su'wret.

$\vec{k}_1 + \vec{k}_2 \rightarrow \vec{k}_3 + \vec{G}$ ten'ligi ori'n alatug'i'n i'laqti'ri'w processi (U-processler) ori'n alatug'i'n bolsa ha'r bir shashi'raw aktinde fononlardi'n' impulsi ku'shli o'zgeredi. On' ta'repke qaray qozg'ali'wshi' fononlar da'stesi tez i'di'raydi'. Kristaldi'n' ushlari' «derekler» boli'p ta, fononlardi'n' ag'i'si' «jog'alatug'i'n» (stok) ori'n boli'p ta xi'zmet etedi. Temperaturalar gradienti bolg'an jag'dayda energiya'ni'n' ko'shiwi Fn-2 su'wrette ko'rsetilgen jag'daydag'i'day boladi'.

Kristallardi'n' elektrlik qa'siyetleri

Kristalli'q deneler bir birinen elektrlik qa'siyetleri boyi'nsha ku'shli ayri'ladi'. Mi'sali' metallar elektr tog'i'n jaqsi' o'tkeredi. Sonli'qtan olardi' o'tizgishler dep ataydi'. Al ayi'ri'm kristallar elektr tog'i'n pu'tkilley o'tkermeydi. Olardi' izolyatorlar dep ataydi'. Qatti' deneler arasi'nda yari'm o'tkizgishler dep atalatug'i'n zatlar da bar. Olar elektr o'tkizgishligi boyi'nsha ko'pshilik jag'daylarda metallar menen yari'm o'tkizgishlerdin' arasi'n iyeleydi. Elektr o'tkizgishliktin' bunday u'lken ayi'rmasi' kristaldi' payda etiwshi atomlardi'n' elektronlari'ni'n' energiyali'q qa'ddiler boyi'nsha tarqali'wi'na baylani'sli'. Bunday tarqali'wdi'n' tu'rine zatti' qurawshi' atomlardi'n' ken'isliktegi da'wirli' jaylasi'wlari' ku'shli ta'sir jasaydi'. Bul atomlar ken'islikte u'sh o'lshepli da'wirli' potencial payda etedi, al bul potencialdi'n' maydani'nda elektronlar qozg'aladi'. Elektronlardi'n' qozg'ali'si'na kristalli'q

pa'njeredegi olardi'n' difrakciyasi' ku'shli ta'sir etedi. Bunday difrakciyani'n' ni'zamli'qlari' haqqi'nda joqari'da toli'q ayti'li'p o'tildi.

Endi biz elektronlardi'n' kristalli'q pa'njerenin' da'wirli potentsiali'ndag'i' qozg'ali'si'n u'yreniwge o'temiz. Bul qozg'ali's kristallardi'n' elektrlik qa'siyetlerin tu'sindire aladi'. Ayri'qsha di'qqat yari'm o'tkizgishlerdegi processlerdi ko'rip shi'g'i'wg'a arnalg'an. Soni'n' menen birge yari'm o'tkizgishler texnikasi' ushi'n a'hmiyetli bolg'an du'zilislerdin' islew principi'ni qarap o'tiledi.

Qatti' denelerdegi elektronli'q hallar

Qatti' denelerdegi elektronli'q hallardi' qalay esaplaydi'? Kristadag'i' ha'r bir elektron atom yadrolari' ha'm basqa elektronlar ta'repinen do'retilgen quramali' maydanda qozg'aladi'. Bunday jag'dayda kristal ishindegisi elektron ushi'n Shredinger ten'lemesini sheshiw ha'm usi'ni'n' na'tiyjesinde elektronni'n' energiyali'q hallari'ni'n' sistemasi'n' tabi'w sheshiliwi qi'yi'n' bolg'an ma'selelerdin' biri boli'p tabi'ladi'. Bunday ten'lemeni ha'zirgi waqi'tlarga shekem sheshiwdin' mu'mkinshiligi joq. Sonli'qtan usi'nday ma'seleni sheshiw ushi'n a'piwayi'lasti'ratug'i'n' ha'r qi'yli' jaqi'nlasilardan paydalanadi'.

Birinshiden, atomlardi'n' yadrosi' ha'm ishki qabliqlarda jaylasqan elektronlar qabliqlari'n' o'z ishini alatug'i'n' ionlardi'n' tulg'alari' potentsiali'ndag'i' si'rtqi' elektronlardi'n' qozg'ali'si'n g'ana qaraydi'. Bunday jag'dayda ionlardi'n' tulg'alari'ni'n' a'dewir a'zzi potentsiali'ndag'i' elektronlar ushi'n Shredinger ten'lemesi sheshiledi. Ma'sele a'dewir a'piwayi'lasadi'. Biraq usi' usi'ldi'n' ja'rdeminde de elektronni'n' sonday qozg'ali'slari' ushi'n ju'da a'piwayi'lasti'ri'lg'an (tiykari'nan u'sh o'lsheмли emes, al bir o'lsheмли) ma'selelerdi sheshiwdin' sa'ti tu'sti. To'mende da'wirli potentsialdag'i' elektronni'n' bir o'lsheмли qozg'ali'si' haqqi'ndag'i' sheshimnin' (Kronig-Penni modeli) na'tiyjelerin qarap shi'g'ami'z.

Ekinshiden, dara jag'daydardi'n' ken' tarqalg'an to'mendegidey eki tu'rin qaraydi': 1) ku'shli baylani's jaqi'nlasilari' ha'm 2) derlik erkin elektronlar jaqi'nlasilari'.

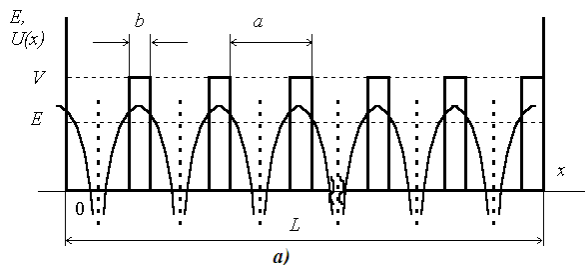
Ku'shli baylani's jaqi'nlasilari'nda elektronni'n' o'zinin' atomi' menen ta'sir etisiw energiyasi' basqa atomlar menen ta'sir etisiw energiyasi'nan ko'p ese u'lken dep esaplanadi'. Basqa so'z benen aytqanda elektronlar o'zlerinin' atomlari' menen ku'shli baylani'sqan, al sol o'zlerinin' atomlari'na basqa atomlar elektromagnit maydanlari' menen a'zzi ta'sir etedi. Biraq sol elektromagnit maydanlari' atomni'n' energiyali'q qa'ddilerin bir neshe qa'ddilerge aji'ratadi'. Usi'nday jollar menen atomni'n' energiya qa'ddileri si'rttan tu'sirilgen magnit maydani'ni'n' ta'sirinde de bir neshe qa'ddilerge aji'raladi'. Bunday qubili'sti' Zeeman effekti dep ataymi'z. Bunday jag'dayda atomlardi'n' bir biri menen ta'sirlesiw izolyatsiyalangan atomni'n' energiyali'q qa'ddilerinin' su'wretin shamali' g'ana o'zgertedi.

Derlik erkin elektronlar jaqi'nlasilari'nda elektronlardi' ion tulg'alari'ni'n' a'zzi potentsiali'nda derlik erkin qozg'aladi' dep esaplaydi'. Al ionlardi'n' tulg'alari'ni'n' a'zzi potentsiali'n kishi tu'rtki (vozmushenie) dep qaraw qabi'l etilgen. Bunday jag'dayda elektronni'n' kinetikalik energiyasi'ni'n' ma'nisi ion menen ta'sirlesiw energiyasi'ni'n' ma'nisinen u'lken boladi'. Bul ilimiy ko'z-qarastan da, metodikalik ko'z-qarastan da en' sa'tli boli'p shi'qqan usi'l ha'zirgi waqi'tlari' ta'jiriyelerde baqlani'p ju'rgen derlik barli'q ni'zamli'qlar menen effektlardi ko'rsetpeli etip tu'sindirmekte.

Biz to'mende ku'shli baylani's jaqi'nlasilari'na da, Kronig-Penni usi'li'na da itibar beremiz. Biraq en' basli' di'qqatti' derlik erkin elektronlar jaqi'nlasilari'na awdaramiz.

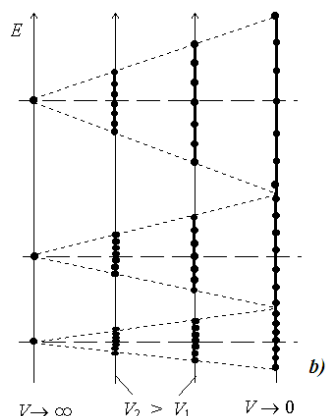
Kronig-Penni usi'li'. Kronig-Penni usi'li'nda a'piwayi' formaga iye da'wirli potentsialdag'i' elektronni'n' bir o'lsheмли qozg'ali'si' u'yreniledi: ken'ligi L ge ten', bir birinen a qashiqli'g'i'nda jaylasqan bir o'lsheмли potentsial shuqi'rlar arasi'nda tuwri' mu'yeshli barerler jaylasqan. Olardi'n' ha'r qaysi'si'ni'n' biyikligi V shamasina, al ken'ligi b shamasina

ten' (4.1-su'wretke qaran'i'z). 4.1-su'wrette tutas jin'ishke si'zi'qlar menen belgilengen ionli'q tulg'alardi'n' haqi'yki'y potentsiali' menen tuwri' mu'yeshli potentsialli'q barerler arasi'nda u'lken ayi'rmani'n' bar ekenligin o'z-o'zinen tu'sinikli. Biraq usi'nday turpayi' model kristalda qozg'alatug'i'n elektronlardi'n' energiyali'q spektrindegi ni'zamli'qlardi' tu'sindirip bere aladi'.



4.1-a su'wret.

Kronig-Penni modelindagi potentsial energiyani'n' tu'ri (a) ha'm energiya shkalasi'ndagi' energiya E nin' potentsial $U(x)$ ti'n' birliklerindeki ruqsat etilgen ma'nislerinin tarqali'wi'ni'n' sxemasi' (b).



4.1-b su'wret.

Kronig-Penni modelindagi potentsial energiyani'n' tu'ri (a) ha'm energiya shkalasi'ndagi' ruqsat etilgen energiya E nin' tarqali'wi'ni'n' sxemasi' (b).

Joqari'da ko'rsetilgendey potentsial shuqi'rdagi' Shredinger ten'lemesini juwi'q tu'rde sheshiw metodlari' ko'pshilikke belgili. Ten'lemenini sheshiw din' na'tiyjesinde elektronni'n' energiyasi' E nin' qa'legen ma'niske emes, al ayi'ri'm ruqsat etilgen ha'm qadag'an etilgen ma'nislerinin' bar bolatug'i'nli'g'i'n ko'riwge boladi' (4.1-su'wretke qaran'i'z). E shkalasi'ndagi' usi' E shamasini'n' ruqsat etilgen ma'nislerinin' bolmaytug'i'n ushastkasi'n qadag'an etilgen energiyali'q zona dep ataydi' (geyde qadag'an etilgen energiyali'q jolaq dep te ataydi'). Al E nin' ruqsat etilgen ma'nisleri jaylasqan zonani' ruqsat etilgen energiyali'q zona dep ataydi' (yamasa ruqsat etilgen energiyali'q jolaq dep ataydi').

4.1-(a) su'wrette keltirilgen potentsialli'q barerlerdin' biyikligi menen ken'ligi o'zgergende elektronlardi'n' qa'ddiler boyi'nsha tarqali'wi'ni'n' o'zgerislerin ani'qlaw qi'zi'qli' ma'selelerdin' biri boli'p tabi'ladi'.

Barerler bolmag'anda ma'sele ken'ligi L bolg'an bir o'lsheimli potentsial shuqi'rdagi' elektronni'n' qozg'ali'si' haqqi'ndagi' ma'selege aylanadi'. Bunday jag'dayda tolqi'n funkciyasi' Ψ ushi'n da'wirli shegarali'q sha'rt saylap ali'nadi'. Elektronni'n' energiyasi'ni'n' ma'nisleri 4.1 (b) su'wrette keltirilgen. Energiyani'n' ruqsat etilgen ma'nisleri shkala boyi'nsha toltiri'lmag'an aytarli'qtay u'lken ori'nlarg'a iye emes.

Eger barerler biyik ha'm ken' bolsa olar arqali' elektronlardi'n' tunnelleniwin esapqa almaw mu'mkin. Bunday jag'dayda ma'sele elektronni'n' ken'ligi $a - b$ bolg'an bir o'lsheimli potentsial shuqi'rdagi' qozg'ali'si' haqqi'ndagi' ma'seledey ma'selege iye bolami'z. Elektron bul kishi potentsial shuqi'rda lokallang'an boladi' (tap «o'zinin» atomi'nda lokallang'an si'yaqli'). E shkalasi'ndagi' elektronni'n' energiyasi'ni'n' ma'nislerinin' tarqali'wi' 4.1-b su'wrette keltirilgen. Energiyani'n' ruqsat etilgen ma'nisleri bir birinen izolyaciyalang'an.

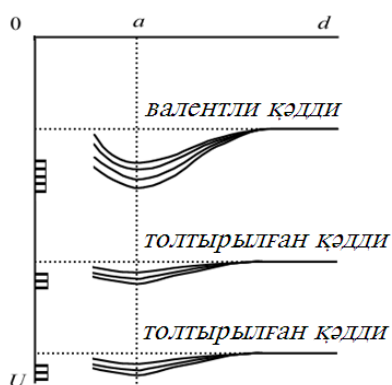
Barerlerdin' biyikligi menen ken'liklari arali'qli'q ma'nislerge iye bolsa (yag'ni'y ju'da u'lken de, ju'da kishi de bolmasa) energiya E nin' ma'nislerin juwi'q usi'llardi'n' ja'rdeminde esaplaydi'. Bul jag'daydag'i' energiyani'n' ruqsat etilgen ma'nisleri 4.1 b su'wrette

ko'rsetilgan jag'daydag'i'day boladi'. Bul su'wrette barerlerdin' biyikligi u'lkeygende ruqsat etilgan ha'm qadag'an etilgen energiya zonalari'ni'n' shegaralari' ornasqan ori'nlar o'zgeriske ushi'raydi'. Atap aytqanda qadag'an etilgen zonalar ruqsat etilgen zonalardi'n' esabi'nan ken'eyedi. Potencial barerler arqali' o'tiw derlik mu'mkin bolmay qalg'an jag'daylarda zonani'n' ken'ligi bir qa'ddinin' ken'ligine (bir si'zi'qti'n' ken'ligine) shekem kishireyedi. Bunday situaciya izolyaciyalang'an atomlar ushi'n ta'n, elektron o'z atomi'ni'n' do'gereginde lokalizaciyalang'an. Bul ku'shli baylani's jaqi'nlas'i'wi'na sa'ykes keledi.

Ku'shli baylani's jaqi'nlas'i'wi'. Bul jaqi'nlas'i'wda berilgen atomdag'i' elektronni'n' baylani's energiyasi' bul elektronni'n' basqa atomlar ta'repinen payda etilgen maydanlar menen ta'sir etisiw energiyasi'nan joqari' dep esaplanadi'. Bunday jag'dayda kondensaciyalang'an zattag'i' (kristallardag'i' ha'm suyi'qli'qlardag'i') elektronli'q hallar izolyaciyalang'an atomlardag'i' elektronli'q hallarg'a uqsas boladi'. Sebebi bunday jag'daylarda atomlardin' bir biri menen ta'sirlesiwleri atomni'n' elektronli'q hallari'n o'zgerte almaydi'.

Ku'shli baylani's jaqi'nlas'i'wi' o'zlerinin' elektronlari'n bekkem uslap turi'wshi' atomlardag'i' (ionli'q ha'm kovalentli kristallardag'i' atomlar) elektronlardin' energiya qa'ddilerinin' sistemasi'n jaqsi' ta'ripleydi. Qa'ddiler sistemasi'ni'n' tu'rin bi'layi'nsha ani'qlaymi'z: atomlar o'zleri payda etken elektr ha'm magnit maydanlari' arqali' basqa atomlarga ta'sir etedi, bul maydanlar basqa atomdag'i' energiyani'n' bir qa'ddin bir neshe qa'ddilerge aji'rali'wi'n boldi'radi'. Demek biz qarap ati'rg'an jag'dayda kondensaciyalang'an zattag'i' izolyaciyalang'an atomlardag'i' energiyani'n' bir qa'ddi orni'na energiyani'n' bazi' bir diapazoni'nda jaylasqan ko'p sanli' qa'ddiler ji'ynag'i' payda boladi'. Bunday ji'ynaqti' energiyali'q jolaq yamasa ruqsat etilgen energiyali'q zona dep ataydi'.

Da'slep bir birinen u'lken qashi'qli'qlarda jaylasqan N dana atomlardin' qaraymi'z. Bunday jag'dayda atomlar arasi'ndag'i' ta'sirlesiwdi esapqa almawg'a boladi' ha'm olardi'n' ha'r qaysi'si'n o'z aldi'na ali'p qaraw kerek. Atomlardin' barli'g'i' da birdey energiyalar qa'ddilerge iye. N dana atomnan turatug'i'n sistemani'n' qa'ddileri $2N$ ese ayni'g'an boli'p shi'g'adi'. Bul jerde 2 sani' spindi esapqa alg'anda payda boladi'. Atomlar bir birine jaqi'nlasqanda tarti'si'wdi'n' saldari'nan atomlardin' energiyasi'ni'n' to'menlewini'n' aqi'betinde energiya qa'ddileri to'menleydi. Usi'ni'n' menen bir qatarda atomlar bir biri menen qansha jaqi'n jaylassa energiya qa'ddilerinin' de sonshama bo'leklerge bo'liniwi ku'sheyedi (rassheplenie). Sebebi atomlar bir birine jaqi'n kelgende olar payda etken maydanlar u'lkeyedi. Atomlar kristalli'q pa'njerenin' da'wirindey arali'qqa shekem jaqi'nlasqanda qa'ddiler energiyasi'ni'n' minimumi'ni'n' ori'n ali'wi' kerek. Sebebi bir birine bunnan bi'lay jaqi'nlasqanda atomlar bir biri menen iyyerise baslaydi' ha'm ta'sirlesiw energiyasi'ni'n' ma'nisi keskin tu'rde o'sedi. Bunday jag'dayda atomlardin' qa'ddilerinin' energiyasi'ni'n' atomlar arasi'ndag'i' qashi'qli'qqa qatnasi' 4.2-su'wrette sxema tu'rinde ko'rsetilgende boladi'. A'l'bette si'rtqi' valentlik elektronlar turg'an qa'ddiler en' ko'p sanli' bo'leklerge bo'linedi.



4.2-su'wret.

Atomlar qa'ddilerinin' energiyasi'ni'n' olar arasi'ndag'i' qashi'qli'q d g'a baylani'si'.

4.2-su'wrette ayni'mag'an qa'ddige juwap beretug'i'n ha'm N dana izolyaciyalang'an da, kristaldi' payda etken de atomlarga tiyisli bolg'an elektronlardi'n' hallari'ni'n' uli'wmali'q sanlari'ni'n' 2N ge ten' bolatug'i'nli'g'i'n ko'rsetedi (2 sani' elektronni'n' spinin esapqa ali'wdi'n' na'tiyjesinde payda boladi', ha'r bir ayni'mag'an qa'ddige elektronni'n' spininin' ha'r qi'yli' bag'i'tlari'na sa'ykes keletug'i'n eki hal tuwri' keledi). Solay etip bir zonadag'i' hallardi'n' sani' 2N ge ten' boladi' degen so'z.

Izolyaciyalang'an atomni'n' bir qa'ddine juwap beretug'i'n hallardi'n' sani' tek ekige ten' emes, al bul qa'ddi ayni'g'an bolsa hallardi'n' sani'ni'n' ko'p boli'wi' mu'mkin (bunday jag'day vodorod atomi'ni'n' p hali' ushi'n ori'n aladi'). Bunday jag'dayda hallardi'n' uli'wmali'q sani'n 2N ge izolyaciyalang'an atomni'n' bul qa'ddi ushi'n ayni'wdi'n' retligine (kratnost) ko'beytiw joli' menen tabami'z.

Eger atomlar arasi'ndag'i' ta'sirlesiwler ku'shli bolsa ayi'ri'm zonalaridi'n' bir biri menen baylani'si'p ketiwi mu'mkin. Bunday jag'dayda uli'wmali'q bir zona ali'ni'p, bul zonadag'i' elektronli'q hallardi'n' sani' bir birine qosi'lg'an eki zonadag'i' hallar sanlari'ni'n' qosi'ndi'si'na ten' boladi'. Demek bunday jag'dayda da elektronli'q hallardi'n' uli'wmali'q sani' 2N eselengen san boladi'.

Derlik erkin elektronlar modeli. Atomlari'ni'n' si'rtqi' elektronlari' ortalii'qqa beriletug'i'n ha'm usi'ni'n' na'tiyjesinde olardi'n' kristal boylap erkin qozg'ali'w mu'mkinshiligine iye kristalli'q zatlaridi'n' u'lken topari' belgili. Bunday toparg'a birinshi gezekte metallar kiredi. Bunday zatlar ushi'n derlik erkin elektronlar modeli sa'tli tu'rde islep shi'g'i'lg'an modellerdin' biri boli'p tabi'ladi'. Bul model sheklerinde elektronlar kristallarda o'lshepleri kristaldi'n' o'lshepi menen birdey bolg'an potencial shuqi'rda da'wirli tu'rde jaylasqan ionli'q tulg'alardi'n' a'zzi maydani'nda qozg'aladi'. Bul a'zzi maydan kishi kozg'alan' (maloe vozmushenie) tu'rinde esapqa ali'nadi'.

En' birinshi jaqi'nlasii'w si'pati'nda kristallardag'i' elektronlardi'n' qanday qa'siyetlerdi ko'rsetetug'i'nli'g'i'n ta'riplew ushi'n elektronli'q Fermi-gaz modelinen paydalanadi'. Bul modeldin' ayri'qsha a'hmiyetine baylani'sli' bul teoriyani'n' tiyarg'i' na'tiyjelerin qarap shi'g'ami'z. Olardi' qi'sqasha erkin elektronlar jaqi'nlasii'wi' dep te ataydi'.

Elektronlardi'n' tolqi'n vektorlari' ken'isligindegi elektronli'q hallar sistemasi'n qabi'rg'asi'ni'n' uzi'nli'g'i' L ge ten' kub formasi'na iye u'sh o'lshepli kubli'q potencial kuti' ushi'n Shredinger ten'lemesin sheshiw joli' menen aladi'. Ψ tolqi'n funkciyasi' ushi'n da'wirli shegarali'q sha'rtler berilgende elektronli'q hallar sistemasi' $\vec{k} = (k_x, k_y, k_z)$ tolqi'n vektorlari'ni'n' to'mendegidey mu'mkin bolg'an ma'nisleri ali'nadi':

$$k_x = 2\pi n_1 / L; \quad k_y = 2\pi n_2 / L; \quad k_z = 2\pi n_3 / L; \quad (4.1)$$

Bul an'latpalarda n_1, n_2, n_3 arqali' pu'tin sanlar belgilengen. L shamasii'ni'n' u'lken ekenligine baylani'sli' k_x, k_y, k_z shamalari'ni'n' o'zgeriw adi'mlari'ni'n' kishi bolatug'i'nli'g'i'n an'g'arami'z. Sonli'qtan $\vec{k} = (k_x, k_y, k_z)$ shamasina g'a'rezli bolg'an funkciyalardi' $\vec{k}$ vektori'ni'n' u'zliksiz funkciyalari' si'pati'nda qaraladi'.

Elektronlardi'n' tolqi'n funkciyasi' mi'naday tu'rge iye boladi':

$$\Psi = A \exp(i\vec{k} \vec{r}). \quad (4.2)$$

Bul formulada $A = \sqrt{\left(\frac{2\pi}{L}\right)^3}$.

Elektronlardi'n' kinetikali'q energiyasi' to'mendegi formulani'n' ja'rdeminde esaplanadi' (olardi'n' potencialli'q energiyasi' nolge ten'):

$$E = p^2 / 2m = (\hbar k)^2 / 2m = (\hbar^2 / 2m)(k_x^2 + k_y^2 + k_z^2) \quad (4.3)$$

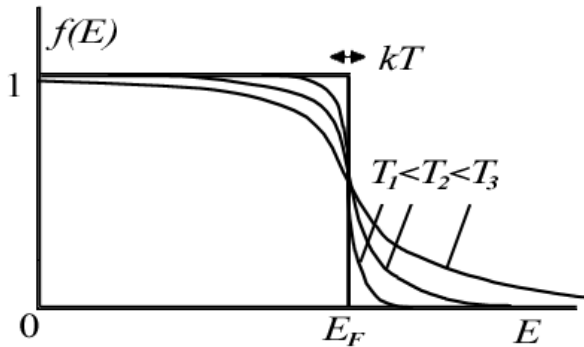
$T = 0$ temperaturada barli'q N elektron Pauli principine bag'i'ng'an halda (ha'r bir halda 1 den arti'q emes elektron) E nin' en' kishi ma'nislerine iye bolg'an hallardi' iyeleydi. Bunday jag'dayda k -ken'islikte barli'q iyelengen hallar radiusi' k_F bolg'an sferani'n' (shardi'n') ishinde boladi'. Bunday shardi'n' betin Fermi beti, al Fermi betinde joylasqan elektronlardi'n' energiyasi'ni'n' ma'nisin Fermi energiyasi' dep ataydi'. Fermi energiyasi'ni'n' ma'nisi erkin elektronlardi'n' koncontraciya' n shamasin'nan g'a'rezli ha'm to'mendegi formulani'n' ja'rdeminde esaplanadi':

$$E_F = (\hbar^2 / 2m)(3\pi^2 n)^{2/3} \quad (4.4)$$

Temperatura joqari'lag'anda hallardi'n' elektronlar menen toli'q itimalli'g'i' to'mendegidey tu'rge iye bolg'an hallardi'n' tolti'ri'li'w funkciyasi' arqali' esaplanadi':

$$f(E) = 1 / \{ \exp((E - E_F) / kT) + 1 \} \quad (4.5)$$

Bul funkciyani'n' ha'r qi'yili' temperaturalar dag'i' grafiklari 4.3-su'wrette keltirilgen.



4.3-su'wret.
Fermi-gaz elektronlari'ni'n' ha'r qi'yili' temperaturalar dag'i' hallardi' tolti'ri'w funkciyasi'.

Barli'q metallar ushi'n ha'm barli'q temperaturalar da Fermi energiyasi'ni'n' ma'nisi kT shamasin'nan 50 – 200 ese u'lken. Sonli'qtan metallar dag'i' elektronlar gazin ku'shli ayni'g'an elektronli'q Fermi-gaz si'pati'nda qaraydi'. Temperatura joqari'lag'anda Fermi energiyasi'ni'n' shamasi' da azmaz u'lkeyedi ha'm bul baylani's mi'na formulani'n' ja'rdeminde beriledi:

$$E_F(T) = E_F(0) \{ 1 - (\pi^2 / 12)(kT / E_F(0))^2 \} \quad (4.6)$$

Solay etip temperaturani'n' joqari'lawi' k -ken'isliktegi Fermi betinin' azmaz jayi'li'wi'na ali'p keledi eken.

Derlik erkin elektronlar modelindegi ionli'q tulg'alar potentsiallari' da'wiri kristalli'q pa'njerenin' parametrlerine sa'ykes keletug'i'n da'wirli funkciya tu'rinde qabi'l etiledi. Bunday da'wirli funkciya ushi'n to'mendegidey qatnas ori'nlanadi':

$$U(x + an_1, y + bn_2, z + cn_3) = U(x, y, z) \quad (4.7)$$

Ionli'q tulg'alardi'n' potentsiali'n tek ionni'n' ortasi' qasi'ndag'i' kishi oblastta g'ana u'lken ma'niske iye boladi' dep esaplaymi'z. Bul yadrolardi'n' zaryadi'n ionli'q tulg'alardi'n' elektronlari' ta'repinen ekranlawdi'n' aqi'betinde ju'zege keledi. Sonli'qtan ionli'q tulg'alardi'n' potentsiallari'n kishi qozg'alan' si'pati'nda esapqa alami'z.

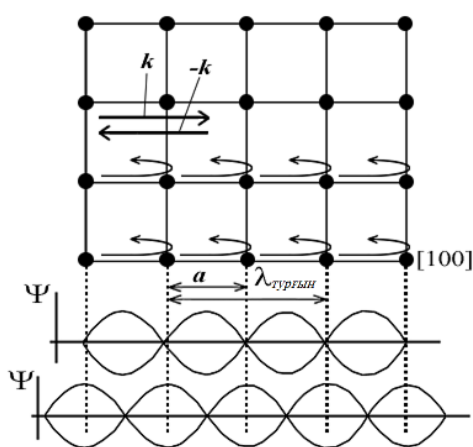
Blox teoremasi'n paydalanami'z. Bul teorema boyi'nsha potentsial energiyasi' (4.7) tu'rine iye bolg'an da'wirli maydan bolg'an jag'dayda (4.2)-tolqi'n funkciyasi'ni'n' tu'ri mi'na formulag'a sa'ykes o'zgeredi:

$$\Psi = u_{\vec{k}}(\vec{r}) \exp(i\vec{k}\vec{r}) \quad (4.8)$$

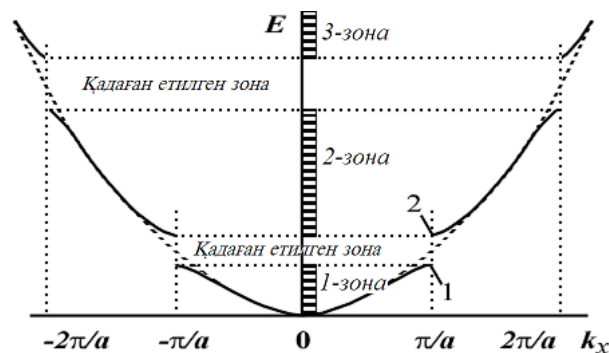
Bul an'latpada $u_{\vec{k}}(\vec{r})$ arqali' $\vec{k}$ ha'm $\vec{r}$ shamalari'nan g'a'rezli bolg'an da'wirli funkciya belgilengen. Oni'n' da'wiri ionli'q tulg'alardi'n' potentsiali' bolg'an $U(\vec{r})$ potentsiali'ni'n' da'wirine ten'. Derlik erkin elektronlar jaqi'nasi'wi'nda kristaldi'n' ishindeg'i barli'q ken'islikte $u_{\vec{k}}(\vec{r})$ shamasi'ni'n' ma'nisin birge jaqi'n dep esaplaydi'. Tek ionli'q tulg'alardi'n' ishindeg'i «kishi» oblastlarda g'ana oni'n' ma'nisi birden azmaz pari'q qi'ladi'.

Derlik erkin elektronlar modelinde ionli'q tulg'alardi'n' da'wirli maydi'ni'n esapqa ali'w elektronni'n' energiyasi'ni'n' tolqi'n vektori'nan g'a'rezligine (mi'sali' oni'n' kristaldag'i' bag'i'ti'nan) ali'p keledi. Usi'ni'n' saldari'nan Fermi beti sferali'q bet boli'p qalmay, ol quramali' formag'a iye boladi'. Biraq Fermi beti sferali'q simmetriyag'a iye boli'p qala beredi. Sebebi kristalda elektronni'n' energiyasi'ni'n' $\vec{k}$ vektori'nan g'a'rezliginde $E(\vec{k}) = -E(\vec{k})$ ten'ligi ori'nlanadi'.

$E(\vec{k})$ funkciyasi'ni'n' Brillyuen zonasi' qasi'ndag'i' en' a'hmiyetli o'zgesheliklerin ko'rsetemiz. Ko'rsetpelilik ushi'n da'wiri a g'a ten' bolg'an a'piwayi' kubli'q pa'njereni qaraymi'z. Meyli elektron $[100]$ bag'i'ti'nda qozg'alsi'n ha'm $\vec{k} = (k, 0, 0)$ tolqi'n vektori'na iye bolsi'n. (4.4 a su'wret). Eger biz ionli'q tulg'alardi'n' maydanlari'n esapqa almasaq energiyani'n' tolqi'n vektori'nan kvadratli'q g'a'rezligin alg'an bolar edik. Bul jag'day 4.4 (b) su'wrette keltirilgen.



a)



b)

4.4-su'wret. Da'wiri a bolg'an kristalli'q kubli'q pa'njerede elektronli'q tolqi'nlardi'n' tarqali'wi'ni'n' ha'm usi' pa'njerede turg'i'n tolqi'nlardi'n' payda boli'wi'ni'n' sxemasi' (a).

Erkin elektronlar ha'm derlik erkin elektronlar modellerindagi elektronni'n' energiyasi'ni'n' oni'n' tolqi'nli'q vektori'nan g'a'rezligi (b)

Elektronni'n' tolqi'nli'q qa'siyetke iye ekenligi belgili. Oni'n' tolqi'n uzi'nli'g'i' de-Broyl tolqi'ni'ni'n' uzi'nli'g'i'na, yag'ni'y $\lambda_B = \frac{2\pi\hbar}{p} = \frac{2\pi}{k}$ shamasi'na ten'. $\lambda_B = 2a$ sha'rti ori'nlang'anda (yag'ni'y $k = \pi/a$ ten'ligi ori'n alg'an jag'dayda) Ox ko'sheri bag'i'ti'na qarama-qarsi' bag'i'tta ionlarda shashi'rag'an elektronlardi'n' interferenciya'li'q ku'sheyiwi ori'n aladi'. Haqi'yqati'nda da qon'si'las atomlar (ionlar) ta'repinen shashi'rag'an tolqi'nlar ushi'n optikali'q ju'risler ayi'rmasi' $2a$ g'a ten', $k = \pi/a$ sha'rti ori'nlang'anda usi'nday uzi'nli'qti'n' u'stine pu'tin san eselengen elektronni'n' de-Broyl tolqi'ni'ni'n' uzi'nli'g'i' jaylasadi'. Bunday jag'dayda joqari' intensivli shag'i'li'sqan tolqi'n payda boladi' ha'm bul

shashi'rag'an tolqi'n tu'siwshi tolqi'n menen interfenennciyalari'p turg'i'n tolqi'nni'n' payda boli'wi'n ju'zege keltiredi.

Turg'i'n tolqi'nlari' kubli'q pa'njerenin' tu'yinlerinde yamasa tu'yinlerdin' da' ortalari'nda «do'n'esliklerge» iye boladi' (4.4 a su'wrette ko'rsetilgen). Usi'nday do'n'esliklerdin' basqa ori'nlari'nda payda boli'wi'ni'n' mu'mkin emes ekenligin an'sat an'g'ari'wg'a boladi'. Sebebi eger bunday bolmag'anda kristalli'q pa'njerege sali'sti'rg'anda elektronli'q bultlardi'n' do'n'esliklerinin' jaylasi'wlari'ndag'i' simmetriya buzi'lg'an bolar edi.

Tolqi'n funkciyasi'ni'n' modulinin' kvadrati' menen elektrondi' tabi'wdi'n' itimalli'g'i'ni'n' ti'g'i'zli'g'i' menen kristaldag'i' ortasha elektronli'q ti'g'i'zli'qti'n' baylani'sli' ekenligi ma'lim. Turg'i'n tolqi'nni'n' ken'eygen ori'nlari' (bul ori'nlarda elektronni'n' tolqi'n funkciyasi' da, elektronli'q ti'g'i'zli'qti'n' maksimumi' da u'lken ma'nislerge iye) kristalli'q pa'njerenin' ionlari'na sa'ykes kelse teris zaryadlang'an elektronli'q bult penen on' zaryadli' ionlar arasi'ndag'i' ta'sir etisiwge juwap beretug'i'n Kulon energiyasi'ni'n' ma'nisinin' kishi bolatug'i'nli'g'i' tu'sinikli. Solay etip $k = \pi/a$ sha'rti ori'nlang'anda $E(k)$ ni'n' bir emes, al eki ha'r qi'yli' bolg'an ma'nisi boladi'. $E(\vec{k})$ shamasini'n' k ni'n' basqa ma'nislerinde u'zliksizligin esapqa ali'p $E(k)$ ni'n' g'a'rezligin 4.4b su'wrettegidey etip ko'rsetiw mu'mkin.

Bul na'tiyjeni tolqi'n vektori' [100] bag'i'ti'na parallel emes bolg'an jag'daylar ushi'n da uli'wmalasti'ri'w mu'mkin (4.4 a su'wret). $\vec{k}$ vektori'ni'n' ushi' Brillyuen zonasi'ni'n' shegarasi'na tu'sken jag'dayda (1.20)-an'latpag'a sa'ykes Vulf-Bregg sha'rti ori'nlanadi' ha'm intensivli shag'i'li'sqan tolqi'n payda boladi'. Bul jag'dayda da joqari'da qarap o'tilgen jag'daydag'i'day turg'i'n tolqi'nlardi'n' payda boli'wi' ju'zege keledi. Bul jag'day bolsa o'z gezeginde $E(\vec{k})$ shamasini'n' u'ziliske tu'siwin ta'miyinleydi. Solay etip Brillyuen zonalari'ni'n' shegaralari'nda $E(\vec{k})$ g'a'rezliginde u'zilis ori'n aladi'.

Elektronni'n' spini esapqa ali'ng'an jag'dayda Brillyuen zonasi'ndag'i' hallardi'n' sani'ni'n' 2N ge ten' ekenligi belgili. Bul san energiyali'q zonadag'i' hallardi'n' sani'na ten' boladi'.

4.4 b su'wrettegi 1 noqati'na ionli'q tulg'a qasi'nda elektronli'q ti'g'i'zli'g'i' en' joqari' bolg'an elektronlardi'n' hali', al usi'nday formag'a jaqi'n formag'a izolyaciyalang'an atomlardi'n' s elektronlari'ni'n' hali' sa'ykes keledi. N dana izolyaciyali'q atomlardi'n' kollektivi ushi'n bunday hallardi'n' sani' 2N ge ten'. Al bul san Brillyuen zonasi'ndag'i' hallardi'n' sani'na ten'. 4.4 b su'wrettegi 2 noqati'na ionli'q tulg'ani'n' qasi'nda en' kishi elektronli'q ti'g'i'zli'qqa iye elektronni'n' hali', al usi'nday formag'a jaqi'n formag'a izolyaciyalang'an atomlardi'n' p-elektronlari'ni'n' hallari' jaqi'n. $E(k)$ funkciyasi'ni'n' u'ziliske tu'siw noqati'na s hallardi' eske tu'siretug'i'n hallardi'n' tolti'ri'li'wi'ni'n' tamam boli'wi' ha'm p hallari'na sa'ykes keletug'i'n hallardi'n' tolti'ri'li'wi' baslanadi' dep esaplaydi'. Bul hallardi'n' energiyalari' bir birinen sezilerliktey ayi'rmag'a iye boli'wi' kerek.

Solay etip ku'shli baylani's modelindegidey, derlik erkin elektronlar modelinde de elektronlardi'n' energiyalari'ni'n' shkalasi'nda energiyani'n' ruqsat etilgen ha'm qadag'an etilgen ushastkalari' bar boladi' eken. Bunday ushastkalardi' ruqsat etilgen ha'm qadag'an etilgen zonalar dep ataymi'z. Ha'r bir ruqsat etilgen zonadag'i' hallardi'n' sani' kristaldag'i' atomlardi'n' sani'na eki ese ko'p. Tolqi'n vektorlari' ken'isliginde $\vec{k}$ vektori'ni'n' ruqsat etilgen bir ma'nisine noqatlar sa'ykes keledi, al (4.3) ke sa'ykes sol noqatlar qabi'rg'alari'ni'n' uzi'nli'g'i' $2\pi/L$ bolg'an kubli'q quti'shalardi' tolti'radi'. Kristaldi'n' o'lshepleri u'lken bolg'anda bul noqatlar ju'da' ti'g'i'z jaylasqan boladi'. Sonli'qtan elektronli'q hallardi' qarag'anda bunday diskretlikti esapqa almaydi': Fermi betin tegis bet, al hallar ti'g'i'zli'g'i' funkciyasi'n tegis (basqi'shlarg'a iye emes) dep esaplaydi'.

Kristalli'q pa'njeredegi elektronlardi'n' dinamikasi'. Kristalli'q pa'njerenin' da'wirli potentsiali' esapqa ali'ng'anda da elektronni'n' kristalli'q pa'njere boyi'nsha qozg'ali'si' menen elektronni'n' erkin ken'isliktegi qozg'ali'si' arasi'nda aytarli'qtay ayi'rmani'n'

bolmaytug'i'nli'g'i' kelip shi'g'adi'. Bul kvant teoriyasi'ni'n' a'hmiyetli ha'm ku'tilmegen na'tiyjelerinin' biri boli'p tabi'ladi'. Bul jag'daydi' qarap o'temiz.

Elektronni'n' kristaldag'i' qozg'ali'si'n u'yrengende ani'qsi'zli'q qatnasi'n paydalani'w kerek boladi'. Bul ani'qsi'zli'q qatnasi'n biz qarap ati'rg'an jag'day ushi'n bi'layi'nsha jazami'z:

$$\delta x \delta p_x \geq \hbar / 2. \quad (4.9)$$

Bul jag'dayda elektrondi' tezliginin' shamasi' $\hbar/2m\delta x$ diapazoni'na kiriwshi elektrondi' ken'isliktin' δx oblasti'nda tabi'wdi'n' itimalli'g'i' haqqi'nda ga'p etiledi. Impuls penen baylani'sli' bolg'an elektronni'n' tolqi'n vektori' da $\delta k \approx 1/(2\delta x)$ shamasi'nday ani'qsi'zli'qqa iye boladi'.

$$\Psi = A \exp(ikr), \quad (4.10)$$

tu'rindagi ten'leme erkin elektronni'n' tolqi'n funkciyasi' bolg'anli'qtan bazi' bir diapazonda δk ma'nisine iye elektrong'a tolqi'n paketi sa'ykes keledi. Tolqi'n paketinin' amplitudasi'ni'n' maksimumi'ni'n' tezligin gruppali'q tezlik dep ataydi'. Gruppali'q tezlik bi'layi'nsha ani'qlanadi':

$$v_g = (\partial \omega / \partial k) = (\partial E / \partial p) = (1 / \hbar) (\partial E / \partial k) \quad (4.11)$$

Bul tezlik tolqi'n paketinin' ha'm usi' paket penen baylani'sli' bolg'an oblastti'n' ken'isliktegi ori'n almasti'ri'w tezligin ta'ripleydi. Ken'isliktin' bul oblasti'nda elektrondi' ushi'rati'wdi'n' itimalli'g'i' u'lken boladi'. 4.4-su'wrette gruppali'q tezlik $E(k)$ g'a'rezligine tu'sirilgen uri'n'bani'n' qi'yali'g'i'ni'n' tangensine ten' (tezlikti tabi'w ushi'n oni' $\hbar$ qa ko'beytiw kerek). Brillyuen zonasi'ni'n' shegarasi'nda turg'i'n tolqi'n payda boladi' ha'm energiyani'n' ko'shiwi ori'n almaydi', gruppali'q tezlik nolge ten'. Sonli'qtan $k = \pi/a$ noqati'nda $E(k)$ funkciyasi' gorizont bag'i'ti'ndag'i' uri'n'bag'a iye. Bunday jag'dayda $E(k)$ funkciyasi' keminde bir pergib noqati'na iye boli'wi' kerek (4.4 b su'wret).

Toparli'q tezlik tu'sinigi hallardi'n' u'sh o'lshemli tarqali'wi' ushi'n da uli'wmalasti'ri'ladi': u'sh o'lshemli $\vec{k}$ ken'isliginde gruppali'q tezlik vektori' $E(\vec{k})/\hbar$ funkciyasi'ni'n' gradienti tu'rinde beriledi. Oni'n' bag'i'ti' Fermi betine perpendikulyar.

Elektrondi' klassikali'q bo'lekshe dep qaraymi'z ha'm oni'n' $\vec{F}$ ku'shinin' ta'sirindegi qozg'ali'si'n qaraymi'z. Gruppali'q tezlik $\vec{v}_g$ shamasini'n' qalay o'zgeretug'i'nli'g'i'n u'yrenemiz. Buni'n' ushi'n $\vec{v}_g$ shamasinan waqi't boyi'nsha tuwi'ndi' alami'z (klassikali'q mexanikadag'i' tezleniwdin' analogi'). $\vec{F}$ ku'shi menen gruppali'q tezlik $\vec{v}_g$ vektorlari' o'z-ara parallel dep esaplaymi'z (yag'ni'y bir tuwri'ni'n' boyi'nda bir ko'sher bag'i'ti'nda jaylasqan). Bunday jag'dayda $\vec{F}$ penen $\vec{v}_g$ shamalari'ni'n' usi' ko'sherge tu'sirilgen proekciyalari' ushi'n to'mendegidey an'latpalardi' alami'z:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_g}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial t} \left((1/\hbar) \frac{\partial E}{\partial k} \right) = (1/\hbar) \left(\frac{\partial^2 E}{\partial k^2} \right) \frac{\partial k}{\partial t} = \\ &= (1/\hbar^2) \left(\frac{\partial^2 E}{\partial k^2} \right) \frac{\partial p}{\partial t} = (1/\hbar^2) \left(\frac{\partial^2 E}{\partial k^2} \right) F \end{aligned} \quad (4.12)$$

Bul formulani' mi'na tu'rde ko'shirip jazi'w mu'mkin:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} m_* = F \quad (4.13)$$

Eger

$$m_* = \hbar^2 / \left(\frac{\partial^2 E}{\partial k^2} \right) \quad (4.14)$$

dep esaplasaq biz Nyutonni'n' ekinshi ni'zami'na uqsas formulani' alami'z:

$$\frac{\partial}{\partial t} m_* = F \quad (4.15)$$

m_* shamasi'n elektronni'n' effektivlik massasi' dep ataydi'. Effektivlik massani'n' ma'nisinde $E(k)$ funkciyasi'na kristaldi'n' da'wirli potentsiali'ni'n' ta'siri janapay tu'rde esapqa ali'ng'an. Demek ku'tilmegen na'tiyjege iye boldi'q: kristalli'q da'wirli maydan vakuumge sali'sti'rg'anda elektronni'n' qozg'ali's kartinasi'na o'zinin' ku'shli ta'sirin tiygizbeydi, al elektronni'n' tek effektivli massasi'n o'zgertedi eken.

Elektronni'n' effektivlik massasi' elektronni'n' kestelerde berilgen massasi'nan a'dewir ayi'rmag'a iye. (4.14)-formula boyi'nsha effektivlik massa elektronni'n' ha'r qi'yli' tolqi'n vektori' ushi'n ha'r qi'yli' ma'nislerge iye boladi'. $E(\vec{k})$ funkciyasi'ni'n' ekinshi ta'rtpili tuwi'ndi'si' ja'rdeminde esaplanatug'i'n effektivlik massa $\vec{k}$ vektori'ni'n' kishi ma'nislerinde on' ma'niske iye boladi'. Al $\vec{k}$ vektori'ni'n' ma'nisi Brillyuen zonasi'ni'n' shegarasi'na jaqi'n ma'nislerge iye bolg'anda effektivlik massani'n' shamasi' teris. Bunday jag'dayda si'rttan tu'sirilgen ku'sh elektrondi' tezlendirmeydi, al tormozlaydi'. Bunday tormozlani'w elektronni'n' qozg'ali'si'na kristaldi'n' da'wirli potentsiali'ni'n' ta'siri menen baylani'sli'. Bunday elektronlar si'rttan tu'sirilgen elektromagnit maydani'nda massasi' teris, al zaryadi' on' bolg'an bo'lekshelerdin' qa'siyetlerindey qa'siyetlerge iye boladi'. Bunday bo'leksheni massasi' teris ma'niske iye yamasa zaryadi' on' ma'niske iye bo'lekshe dep qaraw mu'mkin. Sebebi si'rttan tu'sirilgen elektromagnit maydanda bo'lekshenin' tezleniwi o'zinin' belgisin massasi'ni'n' belgisi o'zgergende yamasa zaryadi'ni'n' belgisi o'zgergende o'zgertedi. Bunday on' zaryadlang'an bo'lekshelerdi tesiksheler (di'rkalar) dep ataw qabi'l etilgen. Tesikshelerdin' qozg'ali'si' haqqi'nda to'mende ga'p etiledi.

4.4 (b) cu'wrettegi peregib noqati' (4.14)-an'latpag'a sa'ykes sheksiz u'lken (yamasa og'ada u'lken) effektiv massag'a sa'ykes keledi. Bunday elektron o'zinin' tezligin si'rttan tusirilgen ku'shlerdin' ta'sirinde o'zgerte almaydi'.

Elektronlardi'n' ko'pshiligi ushi'n effektiv massani'n' ma'nisi on'. Mi'sali' yari'mi' yamasa onnan da kemi tolti'ri'lg'an zonalar dag'i' elektronlar on' ma'nisli effektiv massag'a iye (4.4 b su'wrette keltirilgen). Teris ma'nisli effektiv massag'a Brillyuennin' birinshi zonasi'ni'n' shegarasi' qasi'ndag'i' hallarda turg'an elektronlar iye.

Ma'sele. A'piwayi' kubli'q kristalli'q pa'njerege iye, pa'njere turaqli'si' a g'a ten' bolg'an bir valentli metal ushi'n Fermi energiyasi'n esaplan'i'z. Elektronlardi'n' energiyalar boyi'nsha tarqali'w funkciyasi'n tabi'n'i'z. Elektronlardi'n' de-Broyl tolqi'n uzi'nli'g'i' boyi'nsha tarqali'w funkciyasi'n tabi'n'i'z. De-Broyl tolqi'ni'ni'n' en' minimalli'q uzi'nli'g'i'n pa'njere turaqli'si' a menen sali'sti'ri'n'i'z.

Sheshimi. Fermi energiyasi'n esaplaw ushi'n (4.4)-an'latpani' paydalanami'z. n shamasi'n $n = 1/a^3$ si'pati'nda esaplaymi'z. Sebebi 1 erkin elektrong'a (atomni'n' valentligi 1 ge ten') kubli'q elementar quti'shani'n' ko'lemi sa'ykes keledi. De-Broyl tolqi'ni'ni'n' minimalli'q uzi'nli'g'i'na ($\lambda_{B/min}$ shamasi'na) elektronni'n' maksimalli'q impulsi sa'ykes

keledi ha'm elektronni'n' maksimalli'q energiyasi' Fermi energiyasi' boli'p tabi'ladi'. Bunnan (4.3)-an'latpa tiykari'nda mi'na shamalardi' ani'qlaw mu'mkin: $\lambda_{B/min} = \frac{2\pi\hbar}{p_F} = 2\pi\hbar/\sqrt{2mE_F}$. a menen $\lambda_{B/min}$ shamalari' bir birine barabar boli'p shi'g'adi'. Fermi-gaz teoriyasi'na sa'ykes Fermi-gaz elektronlari' ushi'n hallardi'n' ti'g'i'zli'g'i' funkciyasi' mi'na tu'rge iye boladi':

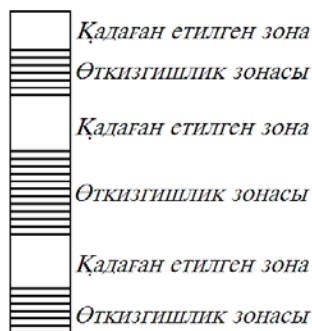
$$g(E) = V(\sqrt{2m^{23}} / \hbar^3 \pi^2) E^{1/2} = \text{Const} \cdot E^{1/2}$$

$dN = g(E)dE = g(\lambda)d\lambda$ an'latpasi'n ha'm $\lambda = 2\pi\hbar / \sqrt{2mE}$ formulasi'n paydalani'p elektronlardi'n' de-Broyl tolqi'ni' uzi'nli'qlari' boyi'nsha tarqali'w funkciyasi'n ali'w mu'mkin. Son'g'i' formulani'n' ja'rdeminde $E, g(E), dE$ shamalari'n λ arqali' an'lati'p, bunnan keyin barli'q an'latpalardi' dN ushi'n jazi'lg'an an'latpag'a qoyi'p $g(\lambda)$ funkciyasi'n ali'w mu'mkin.

Dielektrikler yari'm o'tkizgishler ha'm o'tkizgishler

Zonalardi'n' elektronlar menen tolti'ri'li'w xarakteri zatlardi'n' elektr o'tkizgishlik mexanizmlerin' ani'qlaydi' ha'm zatlardi'n' dielektriklerge, yari'm o'tkizgishlerge ha'm o'tkizgishlerge bo'liniwin tu'sindiredi.

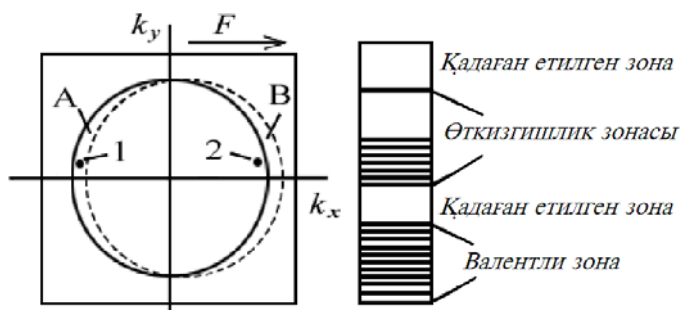
En' da'slep en' kishi energiyali' zonalardi'n' tolti'ri'latug'i'nli'g'i'na itibar beremiz. Olar elektronlarga'a toli'g'i' menen tolti'ri'ladi'. Toli'q tolti'ri'lg'an, biraq en' u'lken energiyag'a iye zonani' valentli zona dep ataydi'. Bunnan keyingi o'tkizgishlik zonasi' dep atalatu'g'i'n zona tolti'ri'lmag'an boli'wi' da, shala tolti'ri'lg'an boli'wi' da mu'mkin (4.5-su'wret). Tolti'ri'lmag'an zona yari'm o'tkizgishlerde ha'm dielektriklerde, al toli'q tolti'ri'lmag'an (biz oni' shala tolti'ri'lg'an dep atadi'q) zonalarda o'tkizgishlerde boladi'. Bul eki jag'daydi' toli'q tu'rde qarap shi'g'ami'z.



4.5-su'wret.
Zatlardag'i' energiyali'q zonalardi'n'
tolti'ri'li'w sxemasi'

O'tkizgishler. Eger o'tkizgishlik zonasi' toli'q emes tolti'ri'lg'an bolsa, onda elektronlar menen iyelengen hallar Fermi betinin' to'meninde jaylasadi', al Fermi beti bolsa simmetriya orayi'na iye. Bunday jag'dayda qa'legen $\vec{k}$ tolqi'n vektori'na iye elektrong'a tolqi'n vektori' - $\vec{k}$ bolg'an elektron sa'ykes keledi. Bul eki elektronni'n' impulslerinin' qosi'ndi'si' nolge ten' (yag'ni'y tezliklerinin' qosi'ndi'si' da nolge ten'). Sonli'qtan olar zaryadti'n' ko'shiwine (perenos zaryada) ha'm elektr tog'i'ni'n' payda boli'wi'na u'les qospaydi' (4.6-su'wret). Eger si'rttan elektr maydani'n ha'm og'an baylani'sli' bolg'an $\vec{F}$ ku'shin tu'sirse, onda situaciya o'zgeredi (4.6-su'wret): tolqi'n vektori' $\vec{k}$ shamasini'n' $\vec{F}$ vektori'ni'n' bag'i'ti' menen bag'i'tlas bolg'an 1 elektroni'ni'n' hali' tolqi'n vektori' $\vec{k}$ shamasini'n' $\vec{F}$ vektori'ni'n' bag'i'ti'na qarma-qarsi' bolg'an 2 elektronni'n' hali'na qarag'anda energiyali'q jaqtan uti'mli' bolmaydi'. Bunday jag'dayda elektronlar ushi'n qaytadan topardu'ziw uti'mli' boladi' ha'm

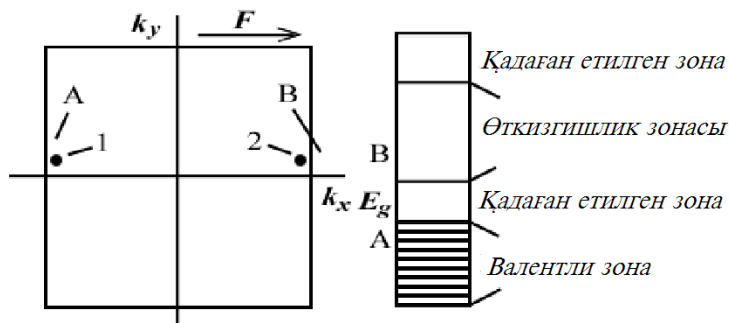
Fermi betinin' asti'ndag'i' A hali'n bosatadi' ha'm Fermi betinin' u'stindeg'i B hali'n iyeleydi (4.6-su'wret). Elektronlardi'n' bunday tarqali'wi'nda qosi'ndi' (summali'q) tezlik nolge ten' bolmaydi' ha'm elektr tog'i'na u'les qosadi'. O'tkizgish dep atalatug'i'n bunday zat elektr tog'i'n jaqsi' o'tkizedi. Bul jag'day si'rtqi' elektr maydani'nda elektronlardi'n' hallar boyi'nsha qaytadan bo'listiriliw (tarqali'w) mu'mkinshiliginin' bar ekenliginin' saldari'nan ju'zege keledi.



Ris. 4.6.

Si'rttan tu'sirilgen elektr maydani'ni'n' ta'sirinde elektronlardi'n' hallar boyi'nsha qaytadan bo'listiriliwi (tarqali'wi').

Dielektrikler. Eger o'tkizgishlik zonasi' toli'q tolti'ri'lg'an bolsa, onda zonadag'i' iyelengen hallardi'n' barli'g'i' Brilliyen zonasi'n tolti'radi'. Bul zona simmetriya orayi'na iye. En' jaqi'n jaylasqan iyelenbegen hallar endi kelesi zonada jaylasqan ha'm bul zona toli'q tolti'ri'lg'an zonadan E_g qashi'qli'qta jaylasqan boladi' (4.7-su'wret). Bunday jag'dayda da (o'tkizgishlerdegi jag'dayday) qa'legen $\vec{k}$ tolqi'n vektorini'na iye elektrong'a tolqi'n vektorini' $-\vec{k}$ bolg'an elektron sa'ykes keledi. Bul eki elektronni'n' impulslari'ni'n' qosi'ndi'si' nolge ten' ha'm sonli'qtan olar zaryadti'n' ko'shiwine ha'm elektr tog'i'ni'n' payda boli'wi'na u'les qospaydi' (4.7-su'wret).



Ris. 4.7.

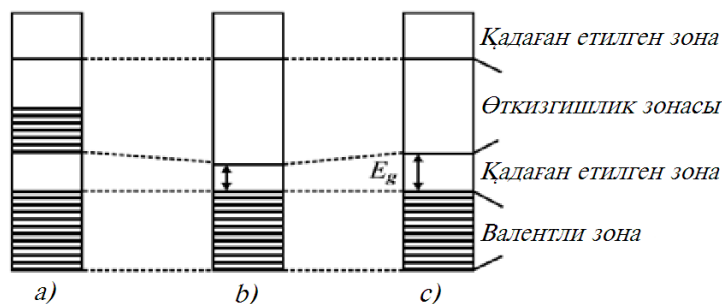
To'li'q tolti'ri'lg'an zona jag'dayi'nda si'rttan tu'sirilgen elektr maydani'ni'n' ta'sirinde elektronni'n' qaytadan bo'listiriliwinin' mu'mkin emes ekenligi (dielektrikte ori'n alatug'i'n situaciya)

Eger si'rttan elektr maydani' ha'm oni'n' menen baylani'sli' bolg'an $\vec{F}$ ku'shi tu'sken jag'dayda da situaciya o'zgermeydi (4.7-su'wret). 4.6-su'wrette keltirilgen jag'daydag'i'day elektronlar qaytadan toparlasa almaydi'. Buni'n' ushi'n A hali'n taslap ketip energiyasi' E_g shamasina u'lken bolg'an B hali'na o'tiwi kerek. Ji'lli'li'q qozg'ali'slari'ni'n' energiyasi' kT buni'n' ushi'n (elektronlardi'n' qaytadan toparlasi'wi', yag'ni'y peregruppirovkasi' ushi'n) jetpeydi. Sonli'qtan elektr tog'i'ni'n' payda etiwini' ta'miyinleytug'i'nday elektronlardi'n' qaytadan toparlasi'wi' ori'n almaydi' ha'm sog'an sa'ykes tolti'ri'lg'an zona zatti'n' elektr o'tkizgishligine u'lesin qosa almaydi'. Dielektrikler dep atalatug'i'n bunday zatlar elektr tog'i'n ju'da' jaman o'tkizedi

Yari'm o'tkizgishler. Eger dielektriklerde qadag'an etilgen zonani'n' ken'ligi onsha u'lken bolmasa (mi'sali' shama menen $10kT$ g'a ten' bolsa), onda ayi'ri'm elektronlardi'n' toli'q tolti'ri'lg'an zonadan o'tkizgishlik zonasi'na o'tiwi mu'mkin. Bunday jag'dayda valentlik zonada bos hallar (tesiksheler), al o'tkizgishlik zonasi'nda elektronlar menen iyelengen hallar payda boladi'. Si'rttan elektr maydani' tu'sirilgende bunday elektronlar o'tkizgishlik zonasi'nda da, valentli zonada da jan'adan toparlasa aladi' (bunday jag'daydi'

4.6-su'wrette ko'rdik). Biraq o'tkizgishlik zonasi'nda elektronlar, al valentli zonada tesiksheler az bolg'anli'qtan bunday zatlar elektr tog'i'n sali'sti'rmali' jaman o'tkizedi. Bunday zatlardi' yari'm o'tkizgishler dep ataydi'.

4.8-su'wrette o'tkizgishlerdegi, dielektriklerdegi ha'm yari'm o'tkizgishlerdegi energiyali'q zonalardi'n' elektronlar menen tolti'ri'li'wi'ni'n' sxemasi' keltirilgen.



Ris. 4.8.
O'tkizgishlerdegi (a),
dielektriklerdegi (c) ha'm yari'm
o'tkizgishlerdegi (b) energiyali'q
zonalardi'n' elektronlar menen
tolti'ri'li'wi'

Endi qanday zatlardi'n' o'tkizgish, yari'm o'tkizgish ha'm dielektrik bola alatug'i'nli'g'i'n qarap o'temiz.

Siltili ha'm qi'mbat bahali' (blagorodni'e) metallardi'n' atomlari' bir valentli elektrong'a iye. Olarda en' u'lken energiyag'a iye zonani'n' yari'mi' tolti'ri'lg'an. Bul 4.6- ha'm 4.8 a su'wretlerdegi sxemalarg'a sa'ykes keledi. Bunday metallar elektr tog'i'n jaqsi' o'tkeredi.

To'rt valentli uglerod (almaz) toli'q tolti'ri'lg'an valentli zonag'a iye. Bul zona menen o'tkizgishlik zonasi' arasi'ndag'i' qashi'qli'q juwi'q tu'rde 5 eV shamasi'n quraydi'. Sonli'qtan almaz jaqsi' izolyatorlar qatari'na kiredi. Dielektrikler boli'p tabi'latug'i'n ionli'q kristallar valentli zonalari' toli'q tolti'ri'lg'an atomlardan turadi'.

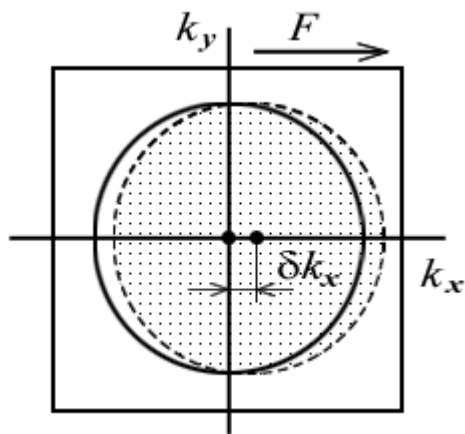
To'rt valentli kremniy menen germaniy toli'q tolti'ri'lg'an valentli zonag'a iye. Bul valentli zona menen o'tkizgishlik zonasi' arasi'ndag'i' qashi'qli'q sa'ykes 1,2 i 0,7 eV shamalari'na ten' (yag'ni'y o'jire temperaturalari'nda shama menen 10kT ni' quraydi'). Bunday jag'dayda elektronlar valentli zonadan o'tkizgishlik zonasi'na o'te aladi'. Usi'ni'n' saldari'nan kremniy menen germaniy en' ko'p tarqalg'an yari'm o'tkizgishler boli'p tabi'ladi'. Temperatura joqari'lag'anda germaniydin' elektr o'tkizgishligi kremniydin' elektr o'tkizgishligine sali'sti'rg'anda tezirek u'lkeyedi. Sebebi germaniydin' qadag'an etilgen zonasi'ni'n' ken'ligi kremniydin' qadag'an etilgen zonasi'ni'n' ken'liginen kishi.

Siltili jer elementleri eki valentli elektrong'a iye. Usi'g'an baylani'sli' oni'n' zonalari' toli'g'i' menen tolti'ri'lg'an boli'wi' kerek. Biraq bunday metallarda zonalar birinin' u'stine biri tu'sedi ha'm na'tiyjede «ko'p sanli' elektronlar si'yatug'i'n uli'wmali'q» zona payda boladi'. Sonli'qtan en' u'lken energiyag'a iye zona toli'g'i' menen tolti'ri'lmag'an, al siltili jer elementleri o'tkizgishler boli'p tabi'ladi'.

O'tkizgishlerdin' elektr o'tkizgishligi

O'tkizgishlerdin' elektr o'tkizgishligin kvant mexanikasi' pozitsiyalari'nda turi'p qarag'an maqul bolg'an bolar edi. Biraq bul a'dewir quramali' ma'sele. Sonli'qtan o'tkizgishlerdin' elektr o'tkizgishligin esaplaw ushi'n yari'm klassikali'q ko'z-qarastan ha'reket etemiz

Si'rttan elektr maydani' tu'sirilmegende k ken'isliktegi elektronlar menen tolti'ri'lg'an hallar Fermi beti menen sheklengen o'tkizgishti qaraymi'z. A'piwayi'li'q ushi'n Fermi betin sfera ja'ne bul betti Brillyuennin' birinshi zonasi'ni'n' shegarasi' menen kesilispeydi dep esaplaymi'z (4.9-su'wret).



4.9-su'wret.

Elektr maydani' ta'repinen si'rttan ku'sh ta'sir etkende elektronlardi'n' hallar boyi'nsha bo'listiriliwinin' (tarqali'wi'ni'n') o'zgeriwi.

Si'rtqi' $\vec{E}$ elektr maydani' payda bolg'anda elektronlarga $\vec{F} = e\vec{E}$ ku'shi ta'sir etedi. Na'tiyjede Nyutonni'n' ekinshi ni'zami'na sa'ykes elektronlar tezlene baslaydi':

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} = e\vec{E}. \quad (4.16)$$

Bazi' bir τ waqi'ti' o'tkennan keyin elektronlar:

$$\vec{v} = \frac{e\vec{E}\tau}{m}. \quad (4.17)$$

tezligine iye boladi'. Bul an'latpada m arqali' elektronni'n' massasi' belgilengen.

4.9-su'wrette keltirilgen elektronlardi'n' hallar boyi'nsha bo'listiriliwi bazi' bir qashi'qli'qqa ji'li'sadi' dep esaplawg'a boladi'. Jetkilikli da'rejedegi u'lken waqi'ttan keyin elektronlardi'n' tezligi menen elektronlardi'n' tarqali'wi'ni'n' ji'lji'wi' (awi'si'wi') u'lken ma'nislerge iye boladi' (bul o'z-o'zinen tu'sinikli). Biraq elektronlardi'n' bir biri menen, baska da tosqi'nli'qlar menen soqli'g'i'si'wlari'n esapqa ali'w za'ru'r

Jetiliskan kristalli'q pa'njerenin' (yag'ni'y defektleri joq kristalli'q pa'njerenin') Brillyuen zonasi'ni'n' shegarasi'na tu'setug'i'n tolqi'n vektori' joq elektronlardi'n' qozg'ali'wi'na kesent jasamaytug'i'nli'g'i'n biz joqari'da ko'rgen edik. Elektron tek baska elektron yamasa kristalli'q pa'njerenin' defektleri menen soqli'g'i'sa aladi'. Joqari'da esletip o'tkenimizdey, kristalli'q pa'njerenin' defektlerin dinamikali'q ha'm statikali'q dep ekige bo'lemiz.

Dinamikali'q defektlerge mi'sal retinde fononlardi' ha'm magnonlardi' keltire alami'z. Olar menen elektronni'n' ta'sir etisiwi qozg'ali'wshi' bo'lekshe menen soqli'g'i'si'wlardi' eske tu'siredi. Al haqi'yqati'nda fonon kristalli'q pa'njereni mayi'sti'radi', al elektron bolsa mayi'sqan ushastkada qozg'ali's bag'i'ti'n o'zgertedi.

Statikali'q defektlerdi biz joqari'da ko'rip o'ttik. Elektronlardi'n' sonday defektler menen ta'sir etisiwi elektronlardi'n' ti'ni'sh turg'an (statikali'q) bo'lekshe menen soqli'g'i'si'wi'n eske tu'siredi. Dinamikali'q defektlerdin' koncentraciyalari' temperaturani'n' joqari'lawi' menen joqari'laydi', al statikali'q defektlerdin' koncentraciyalari' shama menen turaqli' boli'p qaladi' (biz bul jerde noqatli'q defektlerdi na'zerde tuti'p ati'rg'ani'mi'z joq).

Soqli'g'i'si'wlar ori'n alg'anda elektronlar ortasha τ waki'ti' ishinde tezleniw menen qozg'aladi'. Bunday waqi'tti' relaksaciya waqi'ti' dep ataymi'z. Relaksiaciya waqi'ti' o'tkennan keyin elektronni'n' defekt penen soqli'g'i'si'wi' ori'n aladi'. Na'tiyjede elektronni'n' tezligi tosi'nnan o'zgeriske ushi'raydi' ha'm ortasha nolge ten' boladi'. Soqli'g'i'si'wg'a shekem elektron bazi' bir ortasha tezlikke iye boladi'. Bunday ortasha tezlikni dreyflik tezlik dep ataymi'z ha'm oni'n' shamasini' mi'nag'an ten':

$$\langle \vec{v} \rangle = \frac{\vec{E} e \tau}{2m}. \quad (4.18)$$

Bul toqti'n' to'mendegidey ti'g'i'zli'g'i'ni'n' payda boli'wi'na ali'p keledi:

$$\vec{j} = n \langle \vec{v} \rangle e = \frac{\vec{E} e^2 n \tau}{2m}. \quad (4.19)$$

Om ni'zami'n eske tu'siremiz. Ol $\vec{j} = \sigma \vec{E}$ tu'rinde jazi'ladi'. Sonli'qtan σ elektr o'tkizgishlik koeffitsientini ushi'n mi'naday an'latpa alami'z:

$$\sigma = \frac{e^2 n \tau}{2m}. \quad (4.20)$$

Al sali'sti'rmali' qarsi'li'q ushi'n

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{2m}{e^2 n \tau} = \frac{2m \nu}{e^2 n} \quad (4.21)$$

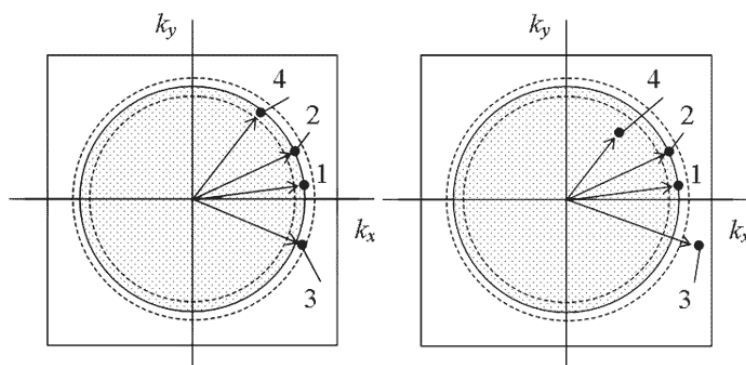
an'latpasi'n alami'z. $\nu = 1/\tau$ arqali' elektronni'n' soqli'g'i'si'wlari'ni'n' ortasha jiyiligi belgilengen.

$\rho(T)$ g'a'rezligin tallaw ushi'n $\nu = 1/\tau$ shamasi'ni'n' temperatura menen defektlerdin' koncentraciyasi'nan g'a'rezligin tallawi'mi'z kerek.

Koncentraciyalari' onsha u'lken bolmag'anda dinamikali'q defektler de, statikali'q defektler de qozg'ali'wshi' elektronlarga bir birinen g'a'rezsiz ta'sir etedi dep esaplawg'a boladi'. Bunday jag'dayda elektronni'n' defektler menen soqli'g'i'si'w jiyiligin esaplaw mu'mkinshiligine iye bolami'z ha'm bul jiyilik to'mendegidey eki jiyiliktin' qosi'ndi'si'nan turadi':

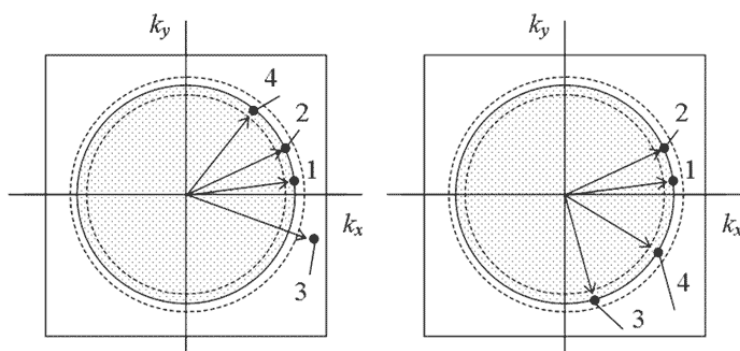
$$\nu = \nu_{stat} + \nu_{dinam}. \quad (4.22)$$

Birinshi qosi'li'wshi' temperaturadan g'a'rezli emes. Ekinshi qosi'li'wshi' birinshiden fononlardi'n' koncentraciyasi'nan ha'm elektronlardi'n' fononlar menen soqli'g'i'si'w mexanizmlerinen; ekinshiden elektronlardi'n' bir biri menen soqli'g'i'si'wlari'nan g'a'rezli.



4.10 a su'wret.

Eki elektronni'n' bir biri menen soqli'g'i'si'wi'ni'n' sxemasi'. Strelkalardi'n' ja'rdeminde eki elektronni'n' 1 ha'm 2 soqli'g'i'siqang'a shekemgi, 3 ha'm 4 soqli'g'i'siqannan keyingi tolqi'n vektorlari' belgilengen.



4.10 b su'wret.

Eki elektronni'n bir biri menen soqli'g'i'si'wi'ni'n sxemasi'. Strelkalardi'n ja'rdeminde eki elektronni'n 1 ha'm 2 soqli'g'i'sqang'a shekemgi, 3 ha'm 4 soqli'g'i'sqannan keyingi tolqi'n vektorlari' belgilengen.

Elektronlar bir biri menen soqli'g'i'sqanda energiya menen impulsti'n saqlani'w ni'zamlari'n ha'm Pauli principin esapqa ali'w kerek. Pauli principi elektronlardi'n soqli'g'i'sqannan keyingi tolqi'n vektorlari'na qosi'msha sheklerdi qoyadi': elektron basqa elektronlar menen iyelenbegen haldi' iyelewi kerek. Joqari'da atap o'tilgenindey, o'tkizgishlerde balqi'w temperaturasi'na shekemgi barli'q temperaturalarda Fermi energiyasi'nan to'meninde kT qashi'qli'g'i'nda jaylasqan derlik barli'q hallar iyelengen. 4.10-su'wrette keltirilgen en' kishi sferani'n ishinde jaylasqan usi'nday iyelengen hallardi'n sani' ju'da' ko'p ha'm tap usi' hallarda elektron soqli'g'i'sqannan keyin jaylasa almaydi' (ha'tte energiya menen impulstin' saqlani'w ni'zami'na qayshi' kelmese de).

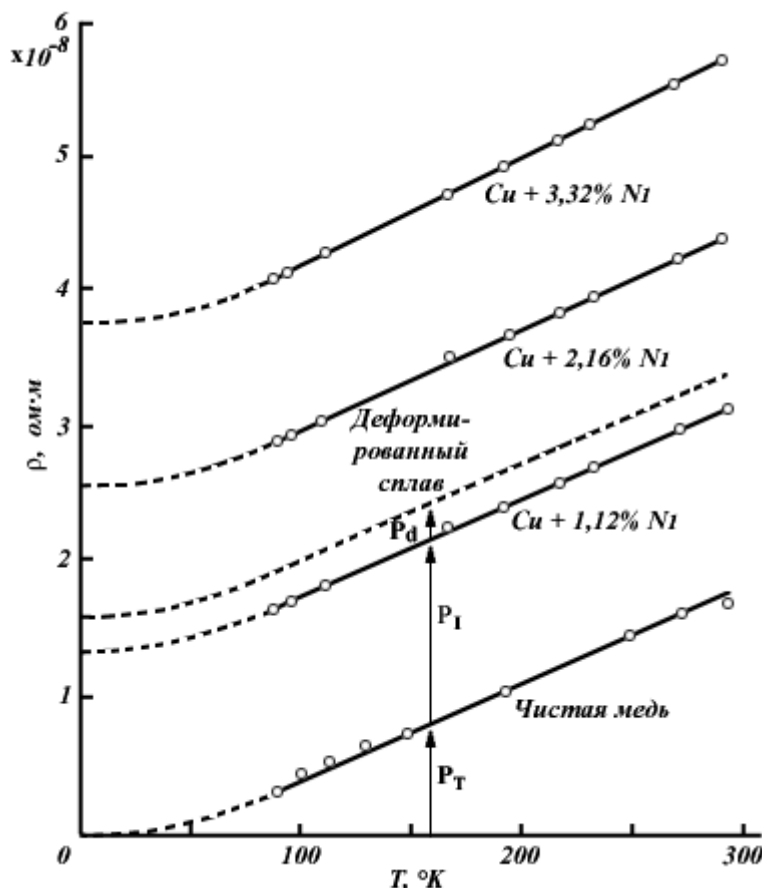
4.10-a su'wrettegi shep ta'repte keltirilgen processlardin' ju'riwi mu'mkin. Sebebi olar ushi'n energiya menen impulstin' saqlani'w ni'zamlari' ha'm Pauli principinin' talaplari' ori'nlanadi'. 4.10-a su'wrettegi on' ta'reptegi processtin' ju'riwi mu'mkin emes. Sebebi 4 hali' iyelengen ha'm elektron soqli'g'i'sqannan keyin ol halda tura almaydi'. 4.10 -b su'wrettin' shep ta'repinde keltirilgen processler de 3 ha'm 4 hallari' bos bolsa da ju'da' kishi itimalli'qqa iye. Bunday processtin' ju'zege keliwi ushi'n kT shamasin'nan a'dewir u'lken energiya talap etiledi (3 ha'm 4 hallari'nda jaylasqan elektronlardi'n energiyalari'ni'n qosi'ndi'si' 1 ha'm 2 hallari'ndag'i' elektronlardi'n energiyalari'ni'n qosi'ndi'si'nan u'lken). Sonli'qtan soqli'g'i'si'w processlerine tolqi'n vektorlari' Fermi betinin' qasi'ndag'i' juqa qatlamni'n ishinde jaylasqan elektronlar g'ana qatnasa aladi' (4.10-a sheptegi su'wret). Al impulstin' saqlani'w ni'zami' usi' ko'p emes sanli' elektronlardi'n barli'g'i'ni'n soqli'g'i'si'wg'a qatnasi'wi'na shek qoyadi'. Mi'sali' 4.10 b su'wrettin' on' ta'repinde belgilengenip o'tilgen tolqi'n vektori'na iye elektronlardi'n soqli'g'i'si'wi'n impulsti'n saqlani'w ni'zami' qadag'an etedi. Usi'nday sebeplerge baylani'sli' bir birine atomlar arasi'nday arali'qqa qashi'qlasqan ha'm u'lken tezlikler menen qozg'alatug'i'n elektronlar bir biri menen ju'da' siyrek soqli'g'i'sadi'. Usi'ni'n na'tiyjesinde elektronlardi'n o'tkizgishlerdegi erkin ju'riw joli'ni'n uzi'nli'g'i' onlag'an ha'm ju'zlegen mi'n atomlar arasi'ndag'i' qashi'qli'qqa jetedi. Esaplawlar ha'm ta'jiriybelerde ali'ng'an mag'li'wmatlardi' tallaw elektronlar menen elektronlardi'n soqli'g'i'si'wi' elektronlardi'n fononlar menen soqli'g'i'si'wi'na sali'sti'rg'anda ju'da' siyrek bolatug'i'nli'g'i'n ko'rsetedi.

Joqari'da ayti'p o'tilgen jag'daylarg'a baylani'sli' elektronlardi'n fononlar menen soqli'g'i'si'wi'n qarap shi'g'ami'z. Bunday soqli'g'i'si'wlar o'tkizgishlardin' elektr o'tkizgishligine tiykarg'i' u'lesti qosi'wi' kerek. O'jire temperaturalari'na jaqi'n temperaturalarda fononlardi'n sani' temperaturag'a tuwri' proporcional. Sonli'qtan elektronni'n fononlar menen soqli'g'i'si'wi'ni'n jiyiligi de temperaturag'a tuwri' proporcional boli'wi' kerek. (4.22)-an'latpag'a sa'ykes dinamikali'q defektlerdin' elektr qarsi'li'g'i'na qosatug'i'n u'lesi de temperaturag'a proporcional boli'p shi'g'adi'. Eksperimentalli'q mag'li'wmatlar bul juwmaqt'i' tasti'yi'qlaydi' (4.11-su'wretti qaran'i'z).

Sali'sti'rmali' qarsi'li'qti'n temperaturadan g'a'rezligin qarsi'li'qti'n temperaturali'q koefficientinin' shamasin' menen xarakterleydi. Bul koefficient

$$\alpha = \frac{1}{\rho(T)} \cdot \frac{\partial \rho(T)}{\partial T}$$

tu'rinde jazi'ladi'. 3.11-su'wretten temperaturani'n' birdey ma'nisinde ha'r qi'yli' quramdag'i' quymalar ushi'n α ni'n' ma'nisi ha'r qi'yli' boli'p shi'g'atug'i'nli'g'in an'g'ari'wi'mi'z kerek. Sebebi 4.11-su'wrettegi mag'li'wmatlar tiykari'nda esaplang'an α ni'n' ma'nisi $\rho(T)$ iymekliginin' qi'yali'g'i'ni'n' (qi'yali'q barli'q quymalar ushi'n derlik birdey) tangensinin' $\rho(T)$ shamasina qatnasi'na ten'. Usi' sebeplerge baylani'sli' sali'sti'rmali' qarsi'li'qqa statikali'q defektlerdin' u'lesi u'lken bolg'an quymalarda α ni'n' shamasi' ju'da' kishi boladi'.



4.11-su'wret.
Mi's penen mi's-nikel
quymalari'ni'n' sali'sti'rmali'
qarsi'li'g'i'ni'n'
temperaturadan g'a'rezligi.

4.11-su'wrette sa'wlelendirilgen iymeklikler boyi'nsha dinamikali'q ha'm statikali'q defektlerdin' o'tkizishtin' sali'sti'rmali' qarsi'li'g'i'na u'leslerin additiv shamalar dep qarawg'a boladi'. Statikali'q defektlerdin' koncentraciyasi' ha'm og'an baylani'sli' bolg'an sali'sti'rmali' qarsi'li'qti'n' shamasi' absolyut nol temperaturag'a jaqi'n temperaturalarda qosi'mta atomlardi'n' koncentraciyasi'na proporcional.

Texnikada sali'sti'rmali' qarsi'li'g'i' ju'da' u'lken ha'm ju'da' kishi bolg'an materiallar ken' tu'rde qollani'ladi'. Sali'sti'rmali' qarsi'li'g'i' ju'da' kishi bolg'an materiallar kompaktli' ha'm ekonomiyali' si'mlardi' sog'i'w ushi'n, al sali'sti'rmali' qarsi'li'g'i' u'lken bolg'an materiallar ha'r qi'yli' qi'zdi'rg'i'shlardi' sog'i'w ushi'n paydalani'ladi'.

Ma'seleler:

1. 4.11-su'wrette berilgen mag'li'wmatlar tiykari'nda qurami'ndag'i' nikel 0 ha'm 3 procent bolg'an mi's-nikel quymasi'ni'n' 100 ha'm 400 K temperaturalardag'i' qarsi'li'g'i'ni'n' temperaturali'q koeffitsientin ani'qlan'i'z.

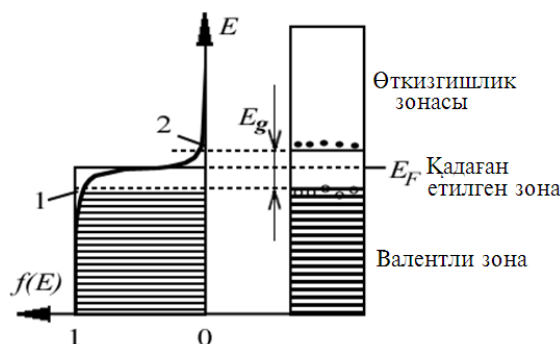
Ko'rsetpe: Qarsi'li'qti'n' temperaturali'q koeffitsientin' ma'nislerin esaplag'anda $\alpha = \frac{1}{\rho(T)} \cdot \frac{\partial \rho(T)}{\partial T}$ formulasi'nan paydalani'n'i'z.

2. Mi'sti'n' 20 K temperaturadag'i' sali'sti'rmali' qarsi'li'g'i' ρ bolsa ondag'i' elektronni'n' erkin ju'riw joli'ni'n' uzi'nli'g'i'n' bahalan'i'z. Valentli elektronlardi'n' sani' berilgen ha'm n ge ten' dep esaplan'i'z. Mi'sta valentli elektronlar Fermi energiyasi' E_F ke ten' bolg'an elektronli'q Fermi-gaz modeli tiykari'nda ta'riplenedi

Sheshimi. Erkin ju'riw joli'ni'n' uzi'nli'g'i' $l = v_F \cdot \tau$ formulasi'ni'n' ja'rdeminde esaplanadi'. τ di'n' ma'nisin (4.21)-formula, al v_F tin' ma'nisin $E_F = \frac{mv_F^2}{2}$ formulasi'ni'n' ja'rdeminde esaplaydi'.

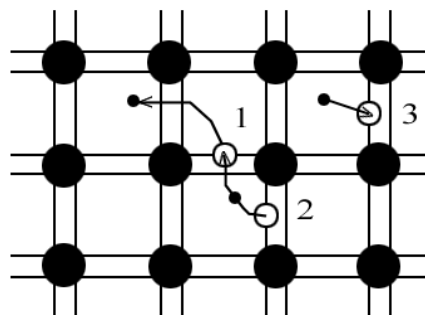
Yari'm o'tkizgishlerdin' elektr o'tkizgishligi

Yari'm o'tkizgishlerdin' elektr o'tkizgishligin klassikali'q mexanika ko'z-qaraslari' menen qarap shi'g'i'w mumkin. Bunday jag'dayda elektronlardi'n' da, tesikshelerdin' de koordinatalari' da, impulsleri de bir waqi'tta o'lshenedi, ha'r bir elektron menen tesikshenin' qozg'ali'si'n baqlap bari'w mu'mkin. Buni' (4.5)-an'latpadag'i' hallardi'n' tolti'ri'li'w funkciyasi'n sali'sti'rmali' ensiz qadag'an etilgen zona jag'dayi'nda qarap shi'g'i'w arqali' amelge asi'ri'w mu'mkin (4.12-su'wret). Bul su'wrette shtrixovka ja'rdeminde elektronlar menen tol'gan hallar belgilengen. 4.12-su'wrette keltirilgen eki g'a'rezlikti tallap eki juwmaq shi'g'ari'w mu'mkin.



4.12-su'wret.

Yari'm o'tkizgishlerdegi elektronlardi'n' hallar boyi'nsha tarqali'wi'.



4.13-su'wret. Yari'm o'tkizgishlerdegi elektronlar menen tesikshelerdin' payda boli'wi' ha'm qozg'ali'si'.

Birinshisi. O'tkizgishlik zonasi'ndag'i' elektronlardi'n' sani' menen valentli zonadag'i' tesikshelerdin' sani' bir birine ten' boli'wi'ni'n' kerekliginen 1 ha'm 2 arqali' belgilengen maydanlar shama menen o'z-ara ten' boli'wi' kerek (bul jerde elektronlar menen tesikshelerdin' effektivlik massasi'na beriletug'i'n du'zetiwlardi ha'm tolqi'n vektorlari' ken'isligindagi hallardi'n' u'sh o'lshemli tarqali'wi'n esapqa alg'anda). Bul jag'day Fermi qa'ddi qadag'an etilgen zonani'n' da'l ortasi'nda joylasqan jag'dayda ori'n aladi'. Bul tasti'yi'qlawdi' matematikali'q jaqtan keltirip shi'g'ari'w da mu'mkin.

Ekinshisi. $(E - E_F) \gg kT$ bolg'anli'qtan elektrondin' o'tkizgishlik zonasi'nda ushi'rati'wdi' itimalli'gi'n beretug'i'n (4.5)-formula Bolcman tarqali'w funkciyasi'na aylanadi':

$$f(E) = 1 / \{ \exp((E - E_F) / kT) + 1 \} \approx \text{Const} \cdot \exp(-(E - E_F) / kT). \quad (4.23)$$

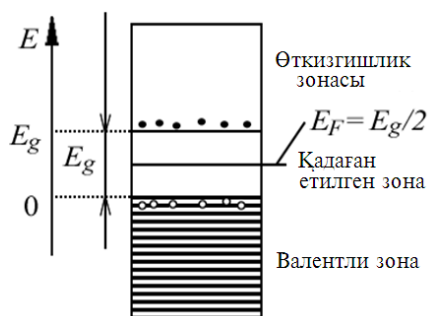
Bul elektronlar menen tesikshelerdin' yari'm o'tkizgishlerdegi qa'siyetlerin ta'riplew ushi'n klassikali'q usi'llardi' paydalani'wdi'n' mu'mkin ekenligin ko'rsetedi. E shamasin' valentli zonani'n' en' u'stingi shetinen baslap esaplag'an qolayli'. Bunnan keyingi tallawlari'mi'zda biz tap usi'nday jollar menen ju'remiz.

Qosi'mtalari' joq yari'm o'tkizgishler. Yari'm o'tkizgish bolg'an kremniydi qaraymi'z. Ol almaz tipidegi kristalli'q pa'njerege iye. Bunday pa'njerede ha'r bir atom qon'si'las atomlar menen to'rt valentli baylani's arqali' baylani'sqan. $T = 0$ K temperaturada barli'q baylani'sli' elektronlar menen tolti'ri'lg'an. Sonli'qtan valentli zona toli'g'i' menen tolti'ri'lg'an, al bul zonadan 1,1 eV qashi'qli'qta jaylasqan o'tkizgishlik zonasi' pu'tkilley bos. Temperaturani' shama menen 200-300 K ge ko'tersek bazi' bir elektronlar valentli zonadan o'tkizgishlik zonasi'na o'te aladi'. Bul elektronni'n' kovalentlik baylani'stan ketiwine ha'm elektronni'n' «kristal boyi'nsha erkin qozg'ali'p ju're alatug'i'n» elektrong'a aylani'wi'na sa'ykes keledi (4.13-su'wret).

Bos kalg'an kovalentlik baylani's orni'nda tesikshe qaladi'. Tesikshe elektron taslap ketken «u'zilgen» kovalentlik baylani's boli'p tabi'ladi'. Qon'si'las baylani'stag'i' elektron sol «tesikshe» ge «sekirip» o'tiwi mu'mkin. Usi'ni'n' saldari'nan tesikshe jan'a ori'ng'a ko'shedi (4.13-su'wrette jan'a ori'n 2 arqali' belgilengen). Elektronlar menen tesiksheler jubi' menen payda bolg'anli'qtan biz karap otken jag'daydag'i' tesiksheler sani' elektronlar sani'na ten'.

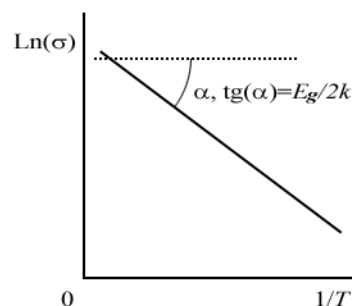
Erkin elektronlardi'n' biri tesikshelerdin' birewin iyelewi mu'mkin. Usi'ni'n' saldari'nan olardi'n' ekewi de jog'aladi'. Bunday processti tesikshe menen elektronni'n' rekombinaciyasi' dep ataymi'z (4.13 (3) su'wret). Rekombinaciyani'n' itimalli'g'i' elektronlar menen tesikshelerdin' koncentraciyalari'na tuwri' proporcional. Elektron-tesikshe jubi'ni'n' payda boli'w itialli'g'i' yari'm o'tkizgishtin' temperaturasi'na g'a'rezli Veroyatnost zarojdeniya pari' elektron - di'rka zavisit ot temperaturi' poluprovodnika. Soni'n' menen birge yari'm o'tkizgishti nurlandi'rg'anda da elektron-tesikshe juplari'ni'n' payda boli'w itimalli'g'i' joqari'laydi'. Al bul itimalli'qti'n' ma'nisi yari'm o'tkizgishke kelip tu'siwshi tolqi'nni'n' intensivligine proporcional.

Yari'm o'tkizgishtin' o'tkizgishliginin' temperaturadan g'a'rezligin ali'wg'a boladi'. Minimalli'q energiyag'a iye elektron-tesikshe jubi'ni'n' payda boli'wi'ni'n' itimalli'g'i' (4.23)-an'latpag'a sa'ykes maksimalli'q ma'niske iye boladi' (eger o'tkizgishlik elektroni' en' kishi energiyag'a, al tesikshe en' u'lken energiyag'a iye bolsa usi'nday jup ali'nadi'). Tap usi'nday juplar shama menen $10kT$ shamasina ten' temperaturada payda boladi' ha'm erkin zaryad tasi'wshi'lardi'n' koncentraciyasi' n ge tiykarg'i' u'les qosadi'.



4.14-su'wret.

Qosi'mtalari' joq yari'm o'tkizgishtegi energiya qa'ddileri.



4.15-su'wret.

Qosi'mtasi' joq yari'm o'tkizgishtin' o'tkizgishliginin' logarifminin' temperaturadan g'a'rezligi.

Bunday jag'dayda juwi'q tu'rde mi'na an'latpani' jaza alami'z:

$$n(T) = n_0 \exp((E_g / 2 - E) / kT) = n_0 \exp(-E_g / 2kT) \quad (4.24)$$

Elektr o'tkizgishlik erkin zaryad tasi'wshi'lardi'n' koncentrasiyasi'na proporsional bolg'anli'qtan, tap sonday formulani' yari'm o'tkizgishtin' o'tkizgishligi ushi'n da jaza alami'z:

$$\sigma(T) = \sigma_0 \exp(-E_g / 2kT) \quad (4.25)$$

Bul ni'zam eksperimentte tasi'yi'qlanadi' (4.15-su'wret). Usi' su'wrettegi tuwri' si'zi'qti'n' qi'yali'g'i'ni'n' tangensi aralaspasi' joq yari'm o'tkizgishtin' qadag'an etilgen zonasi'ni'n' ken'ligi menen baylani'sqan.

Elektr tog'i'n ali'p ju'riwshinin' ji'lji'g'i'shli'g'i'. Solay etip yari'm o'tkizgishlerde elektronlar menen tesiksheler elektr tog'i'n tasi'wshi'lar boli'p tabi'ladi' eken. Olardi'n' koncentrasiyalari'n sa'ykes n_e ha'm n_h arqali' belgileymiz. Bunday jag'dayda $\vec{E}$ elektr maydani'na jaylasti'ri'lg'an yari'm o'tkizgishtegi toqti'n' ti'g'i'zli'g'i' bi'layi'nsha jazi'ladi':

$$\vec{j} = n_e \vec{v}_e e + n_h \vec{v}_h e \quad (4.26)$$

Bul formulada v_e menen v_h arqali' elektronlar menen tesikshelerdin' dreyflik tezlikleri belgilengen. Differencial formada jazi'lg'an Om ni'zami'n ($\vec{j} = \sigma \vec{E}$) (4.26)- ha'm (4.19)- formulalar menen sali'sti'ri'p v_e menen v_h shamalari'ni'n' elektr maydani'ni'n' kernewligi $\vec{E}$ ge proporsional ekenligine iye bolami'z. Elektr tog'i'n tasi'wshi'si'ni'n' ji'lji'g'i'shli'g'i' dep atalatug'i'n ha'm μ arqali' belgilenetug'i'n jan'a shamani' kirgizgen qolayli':

$$\vec{v} = \mu \vec{E} \quad (4.27)$$

Bul an'latpadan ji'lji'g'i'shli'qti'n' elektr maydani'ni'n' kernewligi $\vec{E}$ nin' shamasi' birge ten' bolg'andag'i' toq tasi'wshi'ni'n' dreyflik tezligine ten' ekenligin ko'remiz.

Toq tasi'wshi'lardi'n' ji'lji'g'i'shli'g'i' tu'sinigi yari'm o'tkizgishler fizikasi'ndag'i' en' a'hmiyetli tu'siniklerdin' biri boli'p tabi'ladi'. Ji'lji'g'i'shli'q tu'siniginin' ja'rdeminde yari'm o'tkizgishler fizikasi'ni'n' ko'p quramali' an'latpalari' a'piwayi'lasadi' (biz to'mende Xoll effektin u'yrengenimizde bul so'zlerdin' duri'sli'g'i'na isenemiz). Mi'sal retinde (4.26)- an'latpani' bi'layi'nsha ko'shirip jazi'wg'a boladi':

$$\vec{j} = (n_e \mu_e + n_h \mu_h) e \vec{E} \quad (4.28)$$

A'dette elektronlardi'n' ji'lji'g'i'shli'g'i' tesikshelerdin' ji'lji'g'i'shli'g'i'nan a'dewir u'lken boladi'. Sebebi tesikshenin' ji'lji'wi' quramali' process boli'p, ol ko'p sandag'i' elektronlardi'n' sekirip o'tiwleri menen baylani'sli'.

Yari'm o'tkizgishlerdin' qosi'mtali' o'tkizgishligi. Ayi'ri'm qosi'mtalardi' yari'm o'tkizgishke ju'da' az mug'darda qossa da oni'n' o'tkizgishligin ku'shli o'zgertedi. Bunday qosi'mtalar arti'q erkin elektronlardi'n' yamasa tesikshelerdin' payda boli'wi'na ali'p keledi. Olardi' donorli'q qosi'mtalar (elektronlari'n beredi) yamasa akceptorli'q qosi'mtalar (elektronlari'n o'zine biriktirip aladi') dep ataydi'.

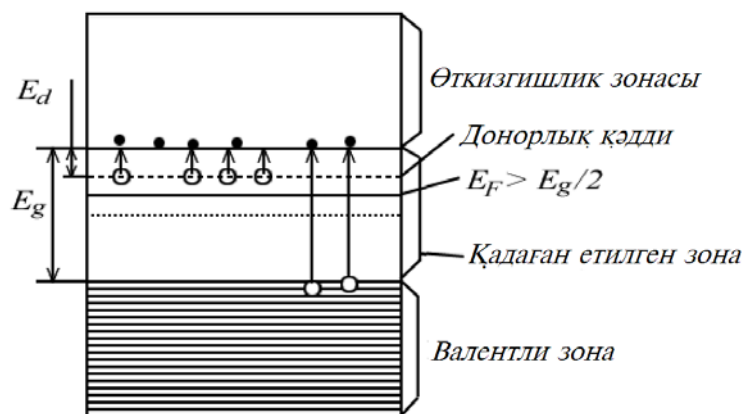
Donorli'q qosi'mtalar kirgizilgen yari'm o'tkizgishlerdi donorli'q yari'm o'tkizgish dep ataymi'z. Bunday yari'm o'tkizgishti elektronli'q o'tkizgish (sebebi olarda arti'q elektronlar ko'p) yamasa n tipindegi yari'm o'tkizgish dep ataydi'. n belgisinin' payda boli'wi' negative so'zinen kelip shi'qqan boli'p, ol erkin zaryad tasi'wshi'lardi'n' atri'qmashli'g'i'n bildiredi.

Akceptorli'q qosi'mtalardi' kirgizgennen keyin yari'm o'tkizgishti akceptorli'q yari'm o'tkizgish dep ataydi'. Oni' tesikshelik yari'm o'tkizgish (sebebi ondag'i' arti'q tesikshelerdin' sani' ko'p) yamasa p tipindegi yari'm o'tkizgish dep te ataydi' (bul an'latpa positive – on'

degen so'zden kelip shi'qqan, sebebi bunday yari'm o'tkizgishte on' zaryadli' toqti' tasi'wshi'lardi'n' sani' arti'q).

Eger yari'm o'tkizgishke elektroni' jen'il «aji'rati'p ali'natug'i'n» qosi'mta atomlar kirgizilse oni' donorli'q yari'm o'tkizgish dep ataymi'z. Mi'sali', eger to'rt valentli kremniyge (yamasa germaniyge) bes valentli mi'shyak yamasa fosfor atomlari' kirgizilse, ular o'zlerinin' 4 valentli elektronlari'n kristalli'q pa'njeredegi 4 valentli baylani's du'ziw ushi'n jumsaydi', al besinshi valentli elektron arti'q (awi'si'q) boli'p qaladi'. Bunday elektron atomnan an'sat aji'rali'p shi'g'i'p ketedi ha'm ol kristal boyi'nsha erkin qozg'ali'p ju'riw mu'mkinshiligin aladi'. Na'tiyjede kristalda arti'q erkin elektronlar payda boladi'. A'l'bette qosi'mtalar kirgizilgen yari'm o'tkizgishte de elektron-tesikshe jubi'ni'n' payda bolatug'i'nli'g'i'n umi'tpawi'mi'z kerek. biraq buni'n' ushi'n a'dewir u'lken bolg'an energiya talap etiledi ha'm sonli'qtan o'jire temperaturalarini'nda bunday procestin' ju'riwinin' itimalli'g'i' (4.23)-an'latpag'a sa'ykes ju'da' az. Donorli'q yari'm o'tkizgishtegi elektronlardi' tiykarg'i' zaryad tasi'wshi'lar, al tesikshelerdi tiykarg'i' emes zaryad tasi'wshi'lar dep ataydi'.

Zonali'q teoriyani'n' tilinde «jen'il bo'linip shi'g'atug'i'n» elektronlardi'n' payda boli'wi' qadag'an etilgen zonada donorli'q qa'ddinin' payda boli'wi'na sa'ykes keledi. (4.16-su'wret). Bunday qa'ddiden o'tkizgishlik zonasi'na o'tiw ushi'n elektrong'a valentli zonadan o'tkizgishlik zonasi'na o'tiw ushi'n talap etiletug'i'n energiyag'a sali'sti'rg'anda a'dewir kem energiya talap etiledi. Bul elektronni'n' a'dettegi kovalentli baylani'stan ketiwine sa'ykes keledi.



4.16-su'wret.
Donorli'q yari'm
o'tkizgishlerdegi elektroni'q
hallardi'n' sxemasi'.

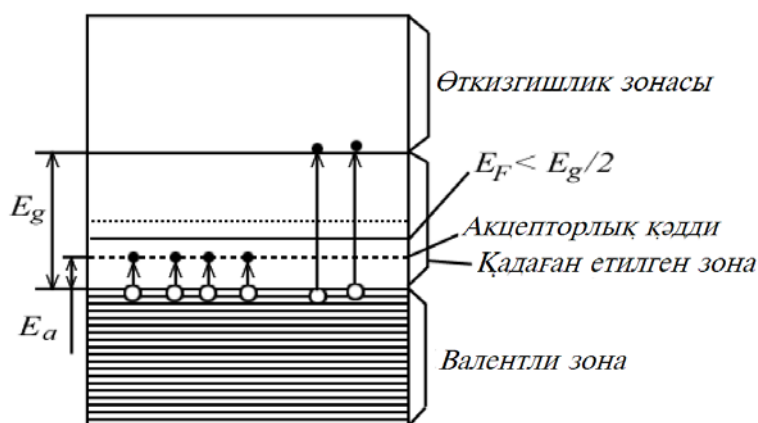
O'jire temperaturalarini'na jaqi'n temperaturalarda yari'm o'tkizgishtin' o'tkizgishligine tiykarg'i' u'lesti donorli'q qa'ddiden o'tkizgishlik zonasi'na o'tken elektronlar qosadi'. Al bunday temperaturalarda valentli zonadan o'tkizgishlik zonasi'na elektronlardi'n' o'tiwinin' itimalli'g'i' ju'da' az boladi'.

Temperatura joqari'lag'anda elektronlardi'n' bir bo'limi az sanli' donorli'q qa'ddilerden o'tkizgishlik zonasi'na o'tedi. Usi'ni'n' menen bir qatarda valentli zonadan o'tkizgishlik zonasi'na elektronlardi'n' o'tiwinin' itimalli'g'i' a'dewir u'lkeyedi. Valentlik zonadag'i' qa'ddilerdin' sani' qosi'mta atomlar payda etken qa'ddilerdin' sani'ni'n' ko'p ese arti'q bolg'anli'qtan temperaturani'n' joqari'lawi' menen elektronlar menen tesikshelerdin' koncentraciyalari' arasi'ndag'i' u'lken ayi'rma derlik pu'tkilley jog'aladi'. Ayi'rmani'n' shamasi' donorli'q qa'ddilerdin' koncentraciyasi'na ten'. Yari'm o'tkizgishtin' o'tkizgishliginin' donorli'q xarakteri kem-kemnen jog'ala baslaydi'. En' aqi'ri'nda temperatura ja'ne de joqari'lag'anda yari'm o'tkizgishtegi zaryad tasi'wshi'lardi'n' koncentraciyalari' u'lken boli'p, donorli'q yari'm o'tkizgish da'slep qa'siyetleri boyi'nsha qosi'mtasi'z yari'm o'tkizgish penen derlik birdey boli'p qaladi', al bunnan keyin ol o'tkizgishlik zonasi'nda ko'p elektronlarga iye o'tkizgishtin' qa'siyetlerindey qa'siyetlerge iye boladi'.

Donorli'q yari'm o'tkizgishdagi Fermi qa'ddi energiya shkalasi'nda joqari'g'a karay ji'lji'ydi'. Ji'lji'wdi'n' shamas' to'mengi temperaturalarda u'lkenirek (bunday temperaturalarda erkin elektronlardi'n' koncentraciyasi' tesikshelerdin' koncentraciyasi'nan a'dewir u'lken). Temperatura joqari'lag'anda yari'm o'tkizgishdin' donorli'q xarakterinin' seziliwi kem-kemnen to'menleydi, al Fermi qa'ddi qadag'an etilgen zonani'n' ortasi'na ji'lji'ydi' (qosi'mtasi'z yari'm o'tkizgishdagey).

Akceptorli'q yari'm o'tkizgishdagi ali'w ushi'n yari'm o'tkizgishke usi' yari'm o'tkizgishdin' atomlari'ni'n' elektronlari' an'sat tu'rde o'zine ala alatug'i'n atomlardi' kirgizedi. Mi'sali, eger to'rt valentli kremniyge (yamasa germaniyge) u'sh valentli indiydi qossa, onda indiy atomlari' o'zinin' u'sh valentli elektroni'n kristalli'q pa'njeredegi u'sh valentli baylani's du'ziw ushi'n jumsaydi', al to'rtinshi baylani's bolsa elektronsi'z qaladi'. Qon'si'las baylani'slardan elektron bul bos ori'ng'a kele aladi' ha'm usi'ni'n' na'tiyjesinde kristalda tesikshe payda boladi' (4.13-su'wret). Bul jag'dayda kristalda awi'si'q tesiksheler payda boladi'. Akceptorli'q yari'm o'tkizgishdagi tesiksheler tiykarg'i' zaryad tasi'wshi'lar, al elektronlar tiykarg'i' emes zaryad tasi'wshi'lar boli'p tabi'ladi'.

Zonali'q teoriya tilinde elektronni'n' toli'q kovalentlik baylani'stan elektron jetpeytug'i'n baylani'sqa o'tiwi qadag'an etilgen zonada o'tkizgishlik zonasi'ni'n' to'mengi shetinin' to'meninde akceptorli'q qa'ddilerdin' payda boli'wi'na sa'ykes keledi (4.17-su'wret). Elektron ushi'n valentli zonada akceptorli'q qa'ddige bunday o'tiw ushi'n valentli zonada o'tkizgishlik zonasi'na o'tiwdegige sali'sti'rg'anda a'dewir kem energiya talap etiledi (bunday jag'dayda elektron bir kovalentlik baylani'stan derlik sonday baylani'sqa o'tedi).



4.17-su'wret.
Akceptorli'q yari'm
o'tkizgishdagi elektronli'q
hallardi'n' sxemasi'.

O'jire temperaturalari'na jaqi'n temperaturalarda yari'm o'tkizgishdin' elektr o'tkizgishligine tiykarg'i' u'lesti valentlik zonadagi' tesiksheler beredi (bul tesikshelerdin' elektronlar akceptorli'q qa'ddige o'tkende payda bolg'anli'g'i'n umi'tpaymi'z). Al elektronlardi'n' valentli zonadan o'tkizgishlik zonasi'na o'tiw itimalli'g'i' ju'da' az.

Temperatura joqari'lag'anda az sandagi' akceptorli'q qa'ddilerdin' basi'm ko'pshiligi elektronlar menen toladi'. Soni'n' menen bir qatarda elektronlardi'n' valentlik zonadan o'tkizgishlik zonasi'na o'tiwinin' itimalli'g'i' joqari'laydi'. Qosi'mtalar payda etken qa'ddilerdin' sani'nan valentlik zonadagi' qa'ddilerdin' sani' ko'p ese u'lken bolg'anli'qtan temperaturani'n' joqari'lawi' menen elektronlar menen tesikshelerdin' u'lkeyip ati'rg'an koncentraciyalari' arasi'ndagi' ayi'rma jog'ala baslaydi'. Sebebi ular bir birinen az shamag'a – akceptorli'q qa'ddilerdin' koncentraciyasi'na ayri'ladi'. Temperatura joqari'lag'an sayi'n yari'm o'tkizgishdin' akceptorli'q ekenligi derlik sezilmeydi. Temperatura ja'ne de joqari'lag'anda yari'm o'tkizgishdagi zaryad tasi'wshi'lardi'n' koncentraciyalari' ju'da' joqari' boladi' ha'm akceptorli'q yari'm o'tkizgish penen qosi'mtasi'z yari'm o'tkizgish arasi'ndagi' ayi'rma jog'aladi', al temperatura ja'ne de joqari'lasa yari'm o'tkizgish o'tkizgishke aylanadi'.

Akseptorli'q yari'm o'tkizgishtegi Fermi qa'ddinin' energiya shkalasi' boyi'nsha to'menge karay ji'lji'ytug'i'nli'g'i'n ko'rsetiwge boladi'. Bul awi'si'w to'mengi temperaturalarda ko'birek ma'niske iye (bunday temperaturalarda tesikshelerdin' koncentraciyasi' erkin elektronlardin' koncentraciyasi'nan a'dewir u'lken). Temperatura joqari'lag'anda yari'm o'tkizgishtin' akseptorli'q ekenligi derlik sezilmeydi ha'm Fermi qa'ddi aralaspasi'z (qosi'mtasi'z) yari'm o'tkizgishtegi si'yaqli' qadag'an etilgen zonani'n' da'l ortasi'na karay ji'lji'ydi'.

Solay etip temperatura a'ste-aqi'ri'n joqari'lag'anda donorli'q ha'm akseptorli'q yari'm o'tkizgishlerdin' aralaspasi'z si'yaqli' yari'm o'tkizgishke, bunnan keyin a'dettegi o'tkizgishtin' o'tkizgishligindey o'tkizgishlikke iye yari'm o'tkizgishke aylanadi'. Sonli'qtan ha'r qi'yli' tiptegi yari'm o'tkizgishlerden sog'i'lg'an du'zilislerdin' qi'zi'p ketiwinen saqlaw lazim. Temperaturani'n' joqari'lawi' menen ha'r qi'yli' oblastlar arasi'ndag'i' ayi'rma jog'aladi' ha'm ko'p sanli' yari'm o'tkizgishlerden sog'i'lg'an du'zilis toqti' jaqsi' o'tkeretug'i'n monolit (bir pu'tin) yari'm o'tkizgishke aylanadi'.

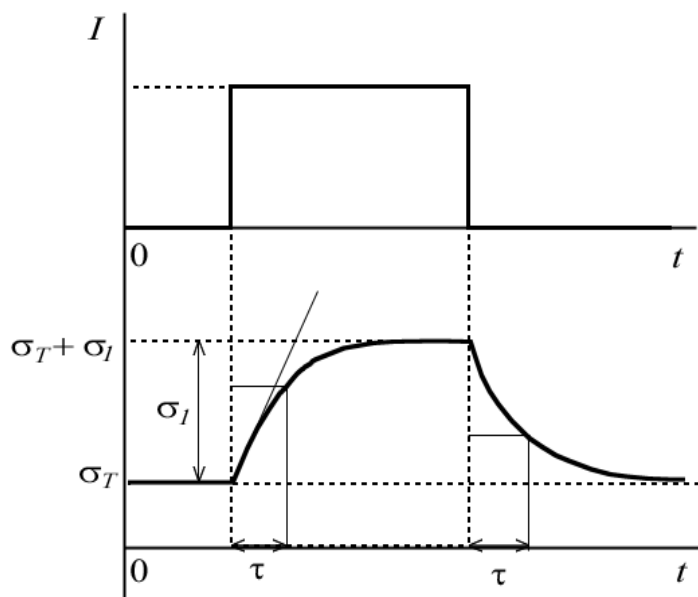
Yari'm o'tkizgishlerdin' foto o'tkizgishligi. Eger yari'm o'tkizgishke elektromagnit nurlani'wi'ni'n' ag'i'si' kelip tu'sse ha'm bul nurlani'wdi'n' kvantlari'ni'n' energiyasi' $\hbar\omega$ qadag'an etilgen zonani'n' ken'ligi E_g shamasi'nan u'lken bolsa yari'm o'tkizgishte ishki fotoeffekt qubi'li'si'ni'n' baqlani'wi' mu'mkin. Ishki fotoeffekt qubi'li'si' dep nurlani'w kvanti'n jutqan elektronni'n' valentli zonadan o'tkizgishlik zonasi'na o'tiwin aytami'z. Usi'ni'n' saldari'nan o'tkizgishlik zonasi'ndag'i' elektronlardin', valentli zonadag'i' tesikshelerdin' sani' artadi' ha'm yari'm o'tkizgishtin' o'tkizgishligi joqari'laydi'. Yari'm o'tkizgishlerdin' si'rttan tu'sirilgen nurlardi'n' ta'sirinde o'tkizgishliginin' joqari'lawi' qubi'li'si'n yari'm o'tkizgishlerdin' fotoo'tkizgishligi dep ataydi'.

Bul qubi'li's fizika ushi'n ju'da' a'hmiyetli. Sebebi fotoo'tkizgishliktin' ja'rdeminde yari'm o'tkizgishlerdegi qadag'an etilgen zonani'n' ken'ligin ha'm zaryad tasi'wshi'lardi'n' (toq tasi'wshi'lardi'n') ortasha jasaw waqi'ti'n ani'qlaw mu'mkin.

Qadag'an etilgen zonani'n' ken'ligin ishki fotoeffektin' qi'zi'l shegarasi' boyi'nsha ani'qlaydi'. Fotoeffektin' qi'zi'l shegarasi'na fotoeffektti baqlaw mu'mkin bolg'an maksimalli'q tolqi'n uzi'nli'g'i' λ_K sa'ykes keledi. Oni' bi'layi'nsha tabami'z:

$$E_g = \hbar\omega_K = \frac{2\pi\hbar c}{\lambda_K}.$$

Yari'm o'tkizgishlerdegi toq tasi'wshi'lardi'n' ortasha jasaw waqi'ti'n tabi'w ushi'n jaqti'li'q penen nurlandi'rg'anda yari'm o'tkizgishtin' o'tkizgishliginin' o'zgerislerinin' eksperimentlerde ali'ng'an na'tiyjelerin paydalanadi'. (4.18-su'wret). O'jire temperaturalari'ndag'i' aralaspasi' (qosi'mtalari') joq yari'm o'tkizgishti qaraymi'z. Jaqti'li'q nurlari' tu'sirilmegende zaryad tasi'wshi'lardi'n' ten' salmaqli'q koncentraciyasi' n_T , al usi' zaryad tasi'wshi'lar menen baylani'sli' bolg'an o'tkizgishlik σ_T shamasi'na ten' boladi' (4.18-su'wret).



4.18-su'wret.

Zaryad tasi'wshi'lardi'n' ten' salmaqli'q koncentraciyasi' $n = n_T + n_I$ menen sol zaryad tasi'wshi'lar menen baylani'sli' bolg'an o'tkizgishlik $\sigma = \sigma_T + \sigma_I$ shamalari'ni'n' yari'm o'tkizgishti jaqti'landi'ri'wdan g'a'rezligi.

Yari'm o'tkizgishti jaqti'landi'rg'anda elektron-tesikshe jubi' payda boladi'. Bul process elektronlar menen tesikshelerdin' rekombinaciyasi' menen tez waqi'tti'n' ishinde ten'lesedi. Al rekombinaciyani'n' itimalli'g'i' elektronlar menen tesikshelerdin' koncentraciyalari'ni'n' arti'wi' menen artadi'. Bazi' bir waqi'ttan keyin rekombinaciyani'n' tezligi elektronlar menen tesikshelerdin' tuwi'li'w tezligi menen ten'lesedi. Na'tiyjede yari'm o'tkizgishti elektronlar menen tesikshelerdin' koncentraciyalari'ni'n' jan'a ma'nisi ornaydi'. Oni' $n = n_T + n_I$ arqali' belgileymiz (4.18-su'wret)). Eger jaqti'li'qti' o'shirsek elektronlar menen tesikshelerdin' koncentraciyalari' rekombinaciyani'n' aqi'betinde yari'm o'tkizgishke jaqti'li'q tu'sirilmesten buri'n ali'ng'an n_T shamasi'na shekem to'menleydi. Tap sol si'yaqli' boli'p yari'm o'tkizgishtin' elektr o'tkizgishligi de o'zgeredi. Yari'm o'tkizgishtin' jaqti'li'q tu'sirilgende payda bolg'an o'tkizgishliginin' 2,7 ese (e ese) kemeyetug'i'n waqi't yari'm o'tkizgishtegi elektronlar menen tesikshelerdin' ortasha jasaw waqi'ti' dep ataladi'. Yari'm o'tkizgishlerdin' o'tkizgishliginin' tez o'zgerisin oscillografti'n' ekrani'nda baqlaw mu'mkin.

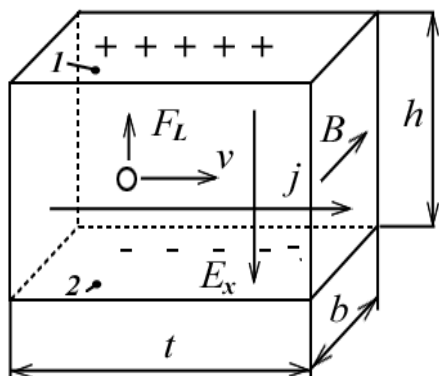
Yari'm o'tkizgishlerdin' fotoo'tkizgishligi qubi'li'si' texnika ushi'n og'ada a'hmiyetli. Sebebi fotoo'tkizgishlik qubi'li'si' tiykari'nda isleytug'i'n jaqti'li'qti'n', elektromagnit tolqi'nlari'ni'n' basqa da tu'rlerinin' yari'm o'tkizgishli datshiklerin (ko'rsetkishlerin) sog'i'w mu'mkin.

Ha'zirgi waqi'tlari' yari'm o'tkizgishli datshikler (ko'rsetkishler) jaqti'landi'ri'lg'anli'q (osveshennost) o'lshevi ushi'n da, jaqti'li'q ag'i'mi'ni'n' impulslerinin' sani'n ani'qlaw ushi'n da qollani'ladi'. Mi'sali' datshikler mashinalardi'n' vallari'ni'n' aylani'w tezligin, stanoklardi'n' bo'limlerinin' qansha shamag'a qozg'alg'anli'g'i'n (ori'n almasti'rg'anli'g'i'n), kompakt disklerdegi (CD yamasa DVD disklerdegi) informaciyalardi' oqi'w ushi'n ken'nen qollani'lmaqta. Biz ha'zir kompakt disklerdegi informaciyalardi' oqi'w ma'selesinde toqtap o'temiz.

Kompakt disklerdi oqi'ytug'i'n du'zilis yari'm o'tkizgishli jaqti'li'q datshiginin' ja'rdeminde aylani'p turg'an kompakt disklin' betine fokuslang'an lazer nuri'ni'n' intensivliginin' o'zgerislerin o'lsheydi. Bul datshik informaciyani' oqi'wdi'n' ju'da' joqari' tezligin ta'miynleydi (sekundi'na shama menen 10^8 impuls). Bunday joqari' tezliklerde informaciyalardi' oqi'w ushi'n datshiktegi yari'm o'tkizgishtegi elektronlar menen tesikshelerdin' jasaw waqi'ti' ju'da' kishi boli'wi' sha'rt (shama menen 10^8 sekund).

Yari'm o'tkizgishlerdegi Xoll effekti. Tuwri' mu'yeshli paralelopiped formasi'ndag'i' yari'm o'tkizgish u'lgini qaraymi'z. Oni'n' l qaptali' boyi'nsha $\vec{j}$ ti'g'i'zli'g'i'nda toq o'tip turg'an bolsi'n (4.19-su'wret). U'lginin' b ta'repi bag'i'ti'nda $\vec{B}$ magnit indukciyasi' tu'sirilgen bolsi'n. Xoll effekti u'lginin' joqari' ha'm to'mengi noqatlari' arasi'nda birinin' u'stinde biri

turg'an eki noqat arasi'nda Xoll potentsiallar ayi'rmasi' dep atalatug'i'n potentsiallar ayi'rmasi'ni'n' payda boli'wi'nan ibarat (4.19-su'wrettegi 1 ha'm 2 arqali' belgilengen noqatlar arasi'nda). To'mende Xoll effektinini' ju'zege keliwin qarap o'temiz.



4.19-su'wret.

Akceptorli'q yari'm o'tkizgishtegi betlik zaryadlardi'n' ha'm elektro maydani'ni'n' Xoll kernewliginin' payda boli'wi'.

Da'slep akceptorli'q yari'm o'tkizgishti qarap o'temiz. Toqti'n' ti'g'i'zli'g'i' $\vec{j}$ shamasini' menen zaryad tasi'wshi'lar bolg'an tesikshelerdin' dreyflik tezligi $\vec{v}_h$ baylani'sli'. Al magnit maydani'nda qozg'ali'wshi' e zaryadi'na elektrodinamikadan belgili bolg'an Lorenc ku'shi $\vec{F}_L$ ta'sir etedi. 4.19-su'wrette bul ku'shtin' bag'i'ti' joqari' qaray bag'i'tlang'an:

$$\vec{F}_L = e[\vec{v}_h \times \vec{B}] \quad (4.29)$$

$\vec{F}_L$ ku'shinin' ta'sirinde tesiksheler joqari' qaray qozg'aladi' ha'm u'lginin' joqarg'i' betinde toplanadi'. Al u'lginin' to'mengi qaptali'nda tesikshelerdin' sani' azayadi'. Bul zaryadlar $\vec{E}_x$ elektr maydani'n payda etedi. Bul maydan tesikshelerge $e\vec{E}_x$. Zaryadlardi'n' toplani'wi' menen $e\vec{E}_x$ ku'shi u'lkeyedi ha'm oni'n' ma'nisi Lorenc ku'shine ten' bolg'anda zaryadlardi'n' ji'ynali'w processi toqtaydi' ha'm $\vec{v}_h$ penen $\vec{B}$ shamalari'na juwap беретug'i'n $\vec{E}_x$ shamasini' ornaydi'. Ten' salmaqli'q sha'rti $\vec{F}_L = e\vec{E}_x = e[\vec{v}_h \times \vec{B}]$. Bul an'latpadag'i' $\vec{v}_h$ shamasini' (4.28)-an'latpa ja'rdeminde $\vec{j}$ g'a almasti'ri'p eksperimentler o'tkeriw ushi'n qolayli' bolg'an

$$\vec{E}_x = \frac{[\vec{j} \times \vec{B}]}{en_k} = R[\vec{j} \times \vec{B}] \quad (4.30)$$

an'latpasi'n alami'z.

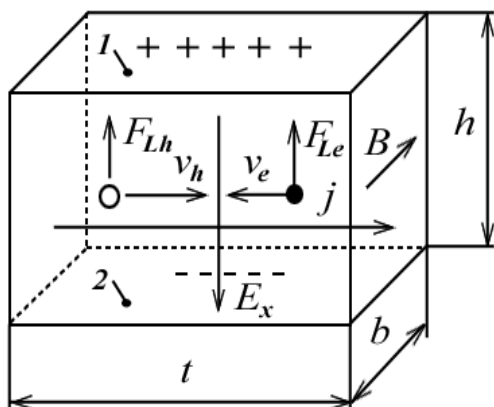
Bul formulag'a kiriwshi barli'q shamalardi'n' o'lsheniwi mu'mkin. R shamasini' Xoll turaqli'si' dep ataymi'z. Tap sol si'yaqli' formulani' donorli'q yari'm o'tkizgish ushi'n da alami'z ha'm R shamasini'ni'n' belgisinin' zaryad tasi'wshi'lardi'n' belgisi menen sa'ykes keletug'i'nli'g'i'na ko'z jetkeremiz.

(4.30)-an'latpani' paydalani'w menen zaryad tasi'wshi'lardi'n' koncentraciyasi'n ha'm olardi'n' belgisin ani'qlaw mu'mkin.

Texnikada Xoll effektin magnit indukciyasi' $\vec{B}$ ni'n' shamasini' o'lshew ushi'n qollanadi'. buni'n' ushi'n 4.19-su'wrette ko'rsetilgendey datshik - yari'm o'tkizgish u'lgi qollani'ladi'. $\vec{E}_x$ ha'm $\vec{j}$ shamalari' o'lshenedi ha'm bunnan keyin Xoll turaqli'si'ni'n' belgili ma'nisin paydalani'p $\vec{B}$ ni'n' shamasini' esaplaydi'. O'lshew processlerin an'sat tu'rde avtomatlasti'ri'wg'a boladi'. Bunday jag'dayda a'sbap $\vec{B}$ ni'n' ma'nisin birden beredi.

Endi yari'm o'tkizgishte elektronlar menen tesikshelerdin' koncentraciyalari' shama menen birdey bolg'an jag'daydi' qaraymi'z. Meyli tuwri' mu'yeshli paralelopiped

formasi'ndagi' yari'm o'tkizgish u'lgidegi elektronlar menen tesikshelerdin' koncentraciyalari' sa'ykes n_e ha'm n_h shamalari'na, al olardi'n' ji'lji'g'i'shli'g'i' sa'ykes μ_e ha'm μ_h shamalari'na ten' bolsi'n (4.20-su'wret).



4.20-su'wret.

Elektronlar menen tesikshelerdin' koncentraciyalari' bir biri menen barabar bolg'an yari'm o'tkizgishtegi betlik zaryadlardi'n' ha'm elektro maydani'ni'n' Xoll kernewliginin' payda boli'wi'.

$\vec{E}_l$ elektr maydani'ni'n' ta'sirinde elektronlar ha'm tesiksheler ta'repinen $\vec{j}$ toqti'n' ti'g'i'zli'g'i' payda boladi'. Meyli bul toq l bag'i'ti'nda bag'i'tlang'an boli'p (4.28)-an'latpani'n' ja'rdeminde berilsin:

$$\vec{j} = (n_e \mu_e + n_h \mu_h) e \vec{E}_l \quad (4.31)$$

b bag'i'ti'nda bizden arman qaray $\vec{B}$ magnit indukciyasi' tu'sirilgen bolsi'n. Bul maydan ta'repinen elektrong'a da, tesikshege de joqari' karay bag'i'tlang'an Lorenc ku'shi tu'sedi. Bul ku'shtin' ta'sirinde elektronlar menen tesiksheler joqari'g'a qaray qozg'ala baslaydi' ha'm joqarg'i' qaptalda toplanadi'. Bul jerde olar rekombinaciya'g'a ushi'raydi'. Meyli ani'qli'q ushi'n joqarg'i' qaptal betke tesiksheler elektronlarga'g'a sali'sti'rg'anda ko'birek toplanatug'i'n bolsi'n. Bunday jag'dayda joqarg'i' bette elektrong'a sali'sti'rg'anda tesiksheler, al to'mengi bette tesikshelerge sali'sti'rg'anda elektronlar ko'plew boladi'. Bunday jag'dayda to'menge qaray bag'i'tlang'an elektr maydani'ni'n' Xoll kernewligi $\vec{E}_x$ payda boladi'. Bul maydan tesikshelerdin' qozg'ali'si'na tosqi'nli'q qi'ladi', al elektronlardi'n' joqari' qaray qozg'ali'si'na ja'rdem beredi. Bazi' bir waqi'ttan keyin sonday $\vec{E}_x$ maydani' payda boladi', bunday maydanda joqari'g'a karay bag'i'tlang'an elektronlar tog'i'ni'n' ti'g'i'zli'g'i' $\vec{j}_{e\uparrow}$ menen tesiksheler tog'i'ni'n' ti'g'i'zli'g'i' $\vec{j}_{h\uparrow}$ bir biri menen ten'lesedi, joqarg'i' qaptal bette zaryadlardi'n' toplan'i'wi' ha'm $\vec{E}_x$ shamasini'n' o'siwi toqtaydi'. Ten' salmaqli'q sha'rtin vertikalli'q bag'i'tqa tu'sirilgen proekciyalarda bi'layi'nsha jazami'z:

$$n_h \mu_h F_L - n_h \mu_h E_x = n_e \mu_e F_L + n_e \mu_e E_x. \quad (4.32)$$

(4.27) menen (4.28) di esapqa ali'p vektorlardi'n' modulleri ushi'n to'mendegidey an'latpa jazami'z:

$$n_h \mu_h (E_l \mu_h) B e - n_h \mu_h E_x e = n_e \mu_e (E_l \mu_e) B e + n_e \mu_e E_x e. \quad (4.33)$$

Bul an'latpadan $\vec{E}_x / \vec{E}_l$ qatnasi' ushi'n

$$E_x / E_l = B (n_h \mu_h^2 - n_e \mu_e^2) / (n_h \mu_h + n_e \mu_e). \quad (4.34)$$

an'latpasi'n alami'z. Bul an'latpada (4.29)- ha'm (4.30) an'latpalardan $R = E_x / j B$ shamasini'n' ushi'n to'mendegidey formula alami'z:

$$R = (n_h \mu_h^2 - n_e \mu_e^2) / \{(n_h \mu_h + n_e \mu_e)^2 e\} \quad (4.35)$$

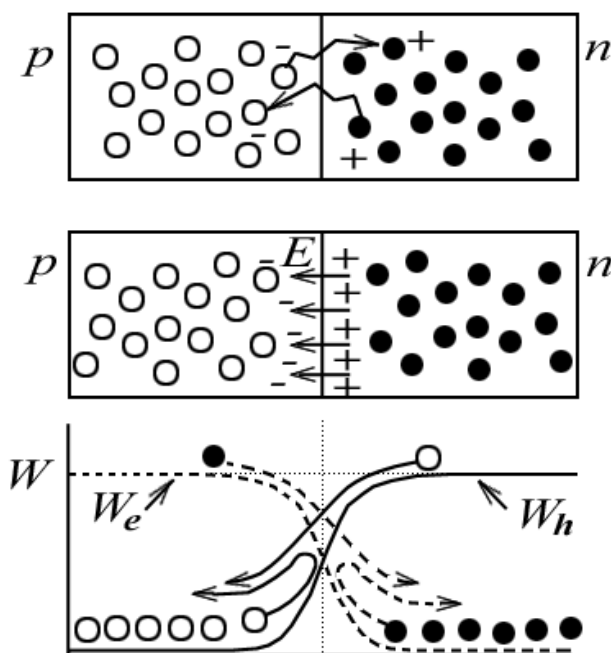
Yari'm o'tkizgishte qosi'mtalar bolmasa (4.34)- ha'm (4.35)-an'latpalar a'piwayi'lasadi'. Bunday yari'm o'tkizgish ushi'n $n_h = n_e$:

$$E_x / E_z = B(\mu_h - \mu_e) \quad (4.36)$$

Na'tiyjede aralaspasi' joq yari'm o'tkizgish ushi'n (4.36)-an'latpa tiykari'nda elektronlar menen tesikshelerdin' ji'lji'g'i'shli'qlari'ni'n' ayi'rmasi'n tabi'w mu'mkin.

Yari'm o'tkizgishli p-n o'tiwi

Yari'm o'tkizgishli p-n o'tiwi dep akseptorli'q ha'm donorli'q tiptegi eki yari'm o'tkizgishtin' kontakti' oblasti'ndag'i' juqa qatlamg'a aytami'z (4.21-su'wret). Yari'm o'tkizgishtin' su'wrette ko'rsetilgen eki oblasti' da elektrlik jaqtan neytral. Sebebi yari'm o'tkizgish materialdi'n' o'zi de, qosi'mtalar da zaryadlang'an emes. Olar arasi'ndag'i' ayi'rma sonnan ibarat, oni'n' shep ta'repinde erkin qozg'alatug'i'n tesiksheler, al on' ta'repinde erkin qozg'alatug'i'n elektronlar bar.



4.21-su'wret.
p-n o'tiwi oblasti'ndag'i' elektr
zaryadlari'ni'n' tarqali'wi'.

Xaotikali'q ji'lli'li'q qozg'ali'slardi'n' saldari'nan p oblasti'ndag'i' tesikshelerdin' biri on' ta'reptegi n tiptegi oblastqa o'te aladi'. Na'tiyjede ol elektronlardi'n' biri menen da'rha'l rekombinaciya'g'a ushi'raydi'. Usi'ni'n' saldari'nan on' ta'repte awi'si'q on' zaryad, al shep ta'repte awi'si'q teris zaryad payda boladi' (4.21-su'wret). Tap sol si'yaqli' ji'lli'li'q qozg'ali'slari'ni'n' saldari'nan elektron shep ta'reptegi oblasttan on' ta'reptegi oblastqa o'tip da'rha'l tesikshe menen rekombinaciya'g'a ushi'raydi'. Na'tiyjede bul jag'dayda da on' ta'repte arti'q on' zaryad, al shep ta'repte arti'q teris zaryad payda boladi'.

Bul zaryadlardi'n' payda boli'wi' yari'm o'tkizgishlerdin' shegarali'q oblasti'nda $\vec{E}$ elektr maydani'ni'n' payda boladi'. Bul maydan p tiptegi oblasttan tesikshelerdi yari'm o'tkizgishlerdi ayi'ri'p turg'an shegaradan shep ta'repke, al n tiptegi oblasttan elektronlardi' usi' shegaradan on' ta'repke qaray iyteredi. $\vec{E}$ elektr maydani' menen oblastlardag'i' elektronlar menen tesikshelerdin' potencial energiyasi'n baylani'sti'ri'w mu'mkin (4.21-

su'wret). p oblasttan n oblastqa o'tiw ushi'n tesikshege biyikligi W shamasina ten' potencial tabaldi'ri'qtan atlap o'tiw kerek boladi'. Al elektron ushi'n n oblasttan p oblastqa o'tiw ushi'n tap sonday tabaldi'ri'qtan o'tiwge tuwri' keledi. Usi'nday o'tiw din' itimalli'gi' Bolcman ko'beytiwshisine proporcional::

$$P = P_0 \exp(-W / kT) \quad (4.37)$$

Joqari'da qarap o'tilgen tiykarg'i' zaryad tasi'wshi'lardi'n' o'tiwleri p-n o'tkeli arqali tiykarg'i' toq tasi'wshi'lardi'n' tog'i'ni'n' ti'g'i'zli'g'i'n payda etedi:

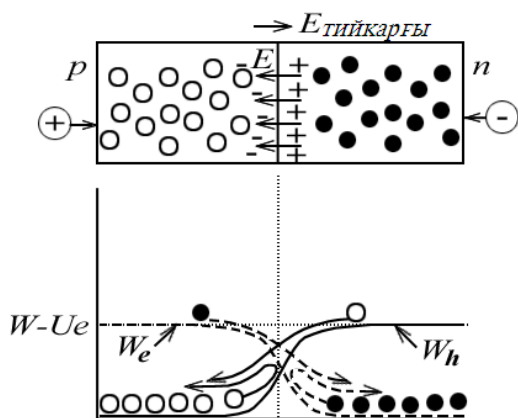
$$j_{\text{оч}} = j_0 \exp(-W / kT) \quad (4.38)$$

Ten' salmaqli'q hali'nda bul toq tiykarg'i' emes tasi'wshi'lar payda etken toq ta'repinen kompensaciyanadi' (tiykarg'i' emes tasi'wshi'larg'a p oblasttag'i' elektronlar menen n oblasttag'i' tesiksheler kiredi). Biraq tiykarg'i' emes tasi'wshi'lardi'n' sani' og'ada az, sonli'qtan olar payda etken toqti'n' shamasina shek qoyi'ladi' ($\vec{E}$ maydani' bul toqti'n' o'tiwine «ja'rdem berse» de).

Eger p-n o'tkeline si'rttan 4.22 (a) su'wrettegidey U potenciallar ayi'rmasi' tu'sirilse (buni' p-n o'tkeldi tuwri' tutasti'ri'w dep ataydi'), onda si'rttan tu'sirilgen $\vec{E}$ maydani' kristalda bar bolg'an $\vec{E}$ maydani'n ha'lsiretedi, 4.22-su'wrette keltirilgen tabaldi'ri'qti'n' biyikligi kishireyedi ha'm tiykarg'i' tasi'wshi'lardi'n' tog'i'

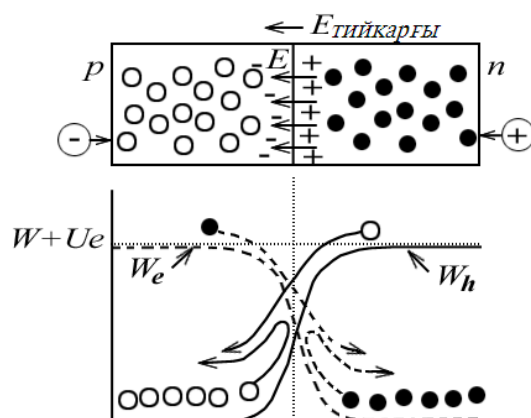
$$j_{\text{оч}} = j_0 \exp(-(W - Ue) / kT) \quad (4.39)$$

formulasi'na sa'ykes o'sedi. Tiykarg'i' emes tasi'wshi'lar tog'i' derlik o'zgermey qaladi', sebebi oni'n' shamasini' az sandag'i' tiykarg'i' emes tasi'wshi'lar ta'repinen sheklengen. 4.23-su'wrette si'rttan tu'sirilgen kernew U di'n' shamasina tiykarg'i' ha'm tiykarg'i' emes tasi'wshi'lar tog'i'ni'n' g'a'rezligi ja'ne voltamperlik xarakteristikani'n' (voltamperlik xarakteristika so'zin ki'sqarti'p ko'binese VAX dep jazadi') bir ushastkasi' keltirilgen ($U \geq 0$ ushi'n).



4.22-a su'wret.

Si'rtqi' kernewdi tuwri' ha'm keri bag'i'tlarda tu'sirgendegi p-n o'tkeli jani'ndag'i' potencial tabaldi'ri'qlar.

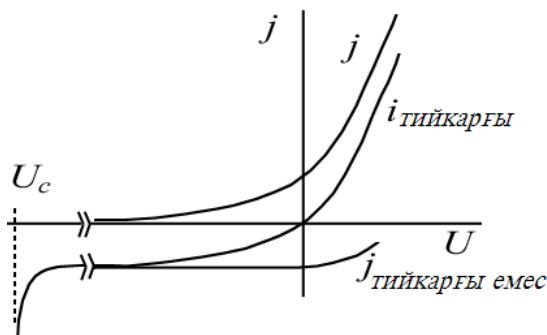


Ris. 4.22b.

Si'rtqi' kernewdi tuwri' ha'm keri bag'i'tlarda tu'sirgendegi p-n o'tkeli jani'ndag'i' potencial tabaldi'ri'qlar.

Eger p-n o'tkelge tu'sirilgen si'rtqi' potenciallar ayi'rmasi'ni'n' bag'i'ti'n o'zgertsek (bul jag'day 4.22 b su'wrette keltirilgen, bul jag'daydi' p-n o'tkeldi keri jalg'aw dep ataydi'), onda si'rtqi' $\vec{E}$ maydani' shegaradag'i' $\vec{E}$ maydani'n ku'sheytadi ha'm 4.21-su'wrettegi

tabaldi'ri'qti'n' biyikligi o'sedi. Usi'ni'n' saldari'nan tiykarg'i' tasi'wshi'lar tog'i'ni'n' shamasi' (4.38)-formulag'a sa'ykes kemeyedi. Al tiykarg'i' emes tasi'wshi'lar tog'i'ni'n' shamasi' o'zgerissiz derlik qaladi'. 4.23-su'wrette si'rtqi' U kernewdi «keri» bag'i'tta tu'sirgen jag'daydag'i' tiykarg'i' ha'm tiykarg'i' emes tasi'wshi'lar toqlari'ni'n' kernewden g'a'rezligi ha'm $U \geq 0$ bolg'an jag'daydag'i' volt-amperlik xarakteristikani'n' ushastkasi' keltirilgen.



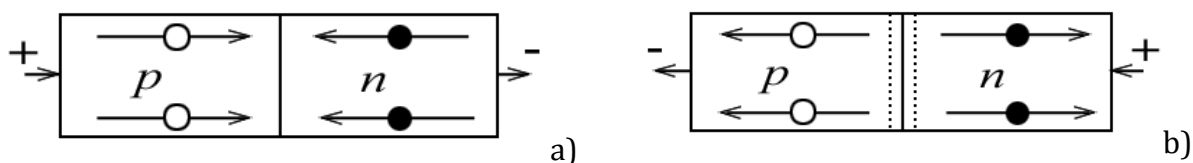
4.23-su'wret.

p-n o'tkeli arqali' o'tip ati'rg'an tiykarg'i' ha'm tiykarg'i' emes tasi'wshi'lar toqlari'ni'n' usi' o'tkelge tu'sirilgen kernewden g'a'rezligi, p-n o'tkelinin' volt-amperlik xarakteristikasi' (VAX).

p-n o'tkelindegi proboy (eskertiw: ori's tilindegi proboy so'zi qaraqalpaq tilinde a'dette «tesik» degen ma'nisti an'g'artadi'). Keri polyarli'qqa iye kernewdi u'lkeyte bersek, onda bazi' bir U_c kernewinde (kernewdin' bunday ma'nisin proboy kernewi dep ataymi'z) p-n o'tkelinde proboy ori'n aladi'. Bul jabi'q xalda p-n o'tkeline tu'sirilgen kernewdin' tek juqa shegarali'q qatlamg'a tu'setug'i'nli'g'i'na baylani'sli'. Sonli'qtan bunday juqa qatlamda elektr maydani'ni'n' u'lken kernewligi payda boladi'. Al bul kernew elektrondin' kishi arali'q ishinde oni'n' energiyasi' kovalentlik baylani'sta bir elektrondin' uri'p shi'g'ara alatug'i'nday etip tezlendiredi. Bunnan keyin sol eki elektron da tezlenedi ha'm olar da o'z gezeginde kovalentlik baylani'stag'i' elektronlardin' ushi'p shi'g'aradi'. Process usi'nday izbe-izlikte dawam etedi. Elektronli'q lavinani' ko'z aldi'g'a elesletetug'i'nday jag'day ju'z beredi. Probog'a VAX tag'i' U_c ushastkasi' sa'ykes keledi (4.23-u'wretke qaran'i'z). $|U| < |U_c|$ sha'rti ori'nlang'anda bul ushastkada toqti'n' a'stelik penen o'siwi ori'n aladi'. Al bunday jag'daydi' proboy qubi'li'si'n kernewdi stabilizaciyalaw ushi'n qollani'wg'a mu'mkinshilik beredi (bul haqqi'nda to'mende toli'g'i'raq ga'p etemiz).

p-n o'tkeldin' volt-amperlik xarakteristikasi' si'zi'qli' emes, al en' basli'si' simmetriyalı' emes: p-n o'tkel bir ta'repke qaray toqti' jaqsi' o'tkizedi, al ekinshi ta'repke karay toqti' jaman o'tkizedi.

p-n o'tkelinin' ha'r qi'ylı' bag'i'tlarda toqti' ha'r qi'ylı' etip o'tkeriwinin' sebebin a'piwayı' ha'm ko'rgizbeli etip tu'sindirıw mu'mkin. 4.24-su'wretke itibar beremiz.



4.24-a su'wret. p-n o'tkeldi tuwri' (a) ha'm keri (b) bag'i'tta tutasti'rg'andag'i' elektronlar menen tesikshelerdin' qozg'ali's sxemasi'

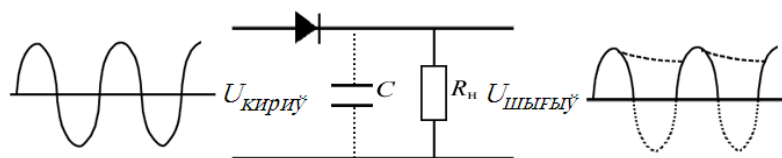
p-n o'tkeldi shi'nji'rg'a tuwri' bag'i'tta tutasti'rsa (4.24-a su'wret) shep ta'reptegi oblasttag'i' tesiksheler eki tiptegi yari'm o'tkizgishlerdin' shagarsi'na qaray, al on' ta'reptegi oblasttag'i' elektronlar da sol shegara bag'i'tta qozg'aladi'. Shegarada olar

rekombinatsiyalanadi'. Shi'nji'r'di'n' barli'q ushastkalari'nda toq tiykarg'i' tasi'wshi'lar menen ta'miynlenedi, al p-n o'tkeldin' o'zi toq tasi'wshi'lar menen toyi'ng'an. Sonli'qtan p-n o'tkelinin' o'tkizgishligi ju'da' u'lken boladi'.

p-n o'tkeldi shi'nji'rg'a kerri bag'i'tta tutasti'rsa (4.24-b su'wret) shep ta'reptegi oblasttag'i' tesiksheler shegaradan kerri bag'i'tta, al on' ta'reptegi ushastkadag'i' elektronlar da shegaradan kerri ta'repke qaray qozg'aladi'. Bo'lip turg'an shegarada toqti' tiykarg'i' tasi'wshi'lar qalmaydi'. Bul shegaradag'i' toqti' juqa p-n o'tkeldeg'i' az sandag'i' tiykarg'i' emes toq tasi'wshi'lar tasi'ydi'. Na'tiyjede p-n o'tkelinin' o'tkizgishligi az boladi' ha'm volt-ampereklik xarakteristika 4.23-su'wrettegidey simmetriyali' emes xarakterge iye boladi'.

Texnikada p-n o'tkeldi jiyyi qollanadi'. Olardi'n' ayi'ri'mlari' haqqi'nda ayti'p o'temiz.

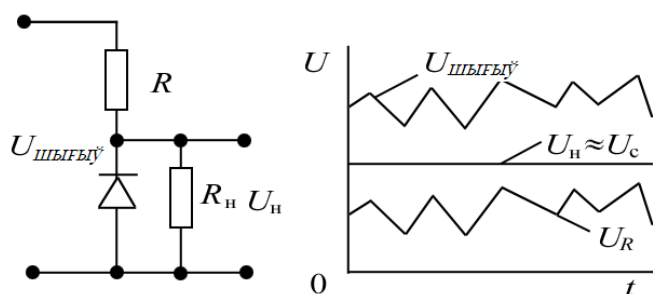
Toqti' tuwri'law ha'm signallardi' detektorlaw. Bunday maqsetlerde en' bas bo'limi p-n o'tkel bolg'an yari'm o'tkizgishli diodlardi' paydalanadi'. Diodti' shi'nji'rg'a tutasti'ri'wdi'n' sxemasi' 4.25-su'wrette keltirilgen. Egerde shi'nji'r'di'n' kiriw bo'limine sinusoida ta'rizli signal berilse, onda diod o'zi arqali' sinusoidani'n' tek on' ma'nisli yari'm tolqi'nlari'n g'ana o'tkeredi. 4.25-su'wrette diod arqali' o'tken toq o'tetug'i'n karsi'li'qti'n' ushi'ndag'i' signaldi'n' tu'ri keltirilgen. Sinusoidani' «tegislew» maqsetinde qosi'msha S kondensatori' paydalani'ladi'. Bul kondensator zaryadlan'i'w ha'm razryadlan'i'w arqali' «su'yir» yari'm tolqi'nlardi' tegisleydi. Usi'nday sxema tiykari'nda kernewdin' en' a'piwayi' tuwri'lawshi'lari' isleydi. Bul tuwri'lawshi'lar o'zgermeli toqti' turaqli' toqqa aylandi'radi'. Tap usi'nday sxema boyi'nsha isleytug'i'n signallar detektorlari' bolsa joqarg'i' jiyilikli signallardi'n' paydali' informatsiyalardi' ali'p ju'retug'i'n kerekli bo'limin kesip ali'wg'a mu'mkinshilik beredi.



4.25-su'wret.

p-n o'tkeldi toqlardi' tuwri'law ha'm signallardi' detektorlaw ushi'n jalg'awdi'n' sxemasi'.

Kernew stabilizatorlari'. p-n o'tkeldin' proboyi' qubi'li'si'n kernewdi stabilizatsiyalaw ushi'n paydalanadi'. Buni'n' ushi'n orni'qli' emes (stabilni'y emes) U_{kiriw} kernew dereGINE rezistor menen stabilitronnan turatug'i'n shi'nji'r tutasti'radi'. Stabilitron bolsa p-n o'tkelinen turadi'. Stabilitron kerri bag'i'tta tutasti'ri'ladi' ha'm berilgen kernewge esaplang'an boladi' (4.26-su'wret). Eger stabilitrondag'i' kernewdin' ma'nisi kritikali'q ma'nisten u'lken bola baslasa ol ha'm R rezistori' arqali' o'tiwshi toqti'n' shamasi' u'lkeyedi ha'm rezistorg'a tu'sken kernew de u'lkeyedi. Usi'ni'n' saldari'nan stabilitrong'a tu'sken kernew proboy qubi'li'si' baslanatug'i'n kritikali'q ma'nisten u'lken bola almaydi'. Bunday jag'dayda stabilli emes kernew eki kernewdin' qosi'ndi'si'nan turadi': rezistordag'i' stabilli emes kernew ha'm stabilitron menen nagruzkadag'i' stabilli kernew (4.26-su'wret).

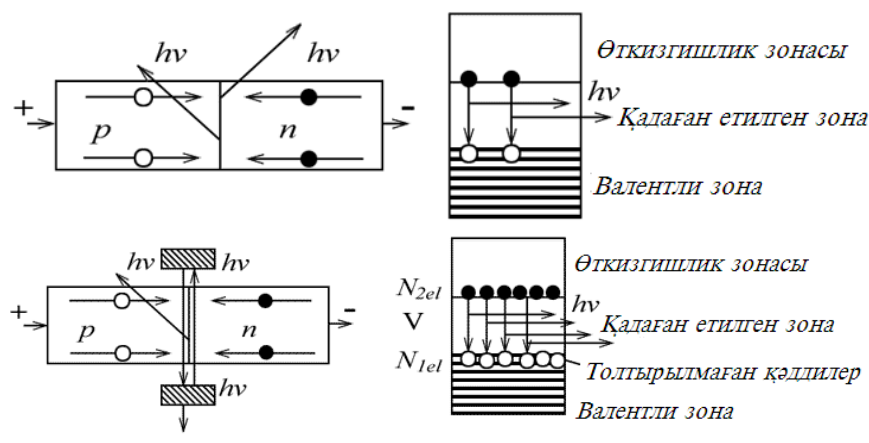


Ris. 4.26.

p-n o'tkeldi kernewdi stabilizatsiyalaw ushi'n tutasti'ri'w sxemasi'.

p-n o'tkeli tiykari'nda isleytug'i'n stabilitronlardi' ha'r qi'yli' kernewler ushi'n arnalg'an etip sa'ykes sanaat tarawlari' ko'p sanda islep shi'g'aradi'. Olar u'sh volttan ju'zlegen voltlardag'i' diapazonlarda isleydi.

Jaqli'li'q shi'g'ari'wshi' diodlar. Jaqli'li'q shi'g'ari'wshi' diodlar elektr tog'i'ni'n' energiyasi'n jaqli'li'q energiyasi'na aylandi'radi'. Oni'n' islew principin 4.24- ha'm 4.27- su'wretlerde keltirilgen sxemalar tiykari'nda tu'siniw mu'mkin. Bul sxemalarda p-n diodlar tuwri' bag'i'tta jalg'ang'an. Shegarada p oblasttan kelgen tesikshe n oblasttan kelgen elektron menen rekombinaciya'g'a ushi'raydi'. Bul elektronni'n' o'tkizgishlik zonasi'nan valentlik zonag'a o'tiwine ekvivalent. Sonli'qtan bunday o'tiw elektromagnit nurlardi'n' kvanti'n shi'g'ari'w menen ju'riwi kerek. Al yari'm o'tkizgishte bolsa qadag'an etilgen zonani'n' ken'ligin infraqi'zi'l oblasttan ultrafiolet oblastqa shekemgi kvantlar shi'g'atug'i'nday etip saylap ali'wg'a boladi'.



4.27-cu'wret.

- Jaqli'li'q shi'g'aratug'i'n (a) ha'm lazerlik diodti'n' (b) jumi's islew sxemasi'
- a)
- b)

Jaqli'li'q shi'g'aratug'i'n diodlardi'n' paydali' ta'sir koefficienti ju'da' joqari' boli'p, oni'n' ma'nisi 80 procentke shekem jetedi. Al en' jaqsi' qi'zdi'ri'w lampalari'ni'n' paydali' ta'sir koefficienti onnan on esedey kishi. Haqi'yqati'nda da sa'tli tu'rde sog'i'lg'an jaqli'li'q shi'g'ari'wshi' diodta sol diod arqali' o'tiwshi toqti' payda etetug'i'n ha'r bir elektronni'n' tesikshe menen rekombinaciya'g'a ushi'rap nurlani'w kvanti'n shi'g'ari'wi' kerek. Bunday jag'dayda energiyani'n' az mug'dardag'i' jog'ali'wi' nurlandi'ri'lg'an kvantti'n' diodti'n' materiali' ta'repinen juti'li'p, oni'n' ji'lli'li'q energiyasi'na aylani'wi'na baylani'sli'. Jaqli'li'q shi'g'aratug'i'n diodlerdi'n' o'miri ju'da' uzaq. Sebebi bunday diodlarda tez arada isten shi'g'atug'i'n qi'zi'wshi' si'mlar, katodlar ha'm sol si'yaqli' bo'limler bolmaydi'.

Jaqli'li'q shi'g'ari'wshi' diodlar ekonomli' miniatyurali'q jaqli'li'q derekleri si'pati'nda ken' tu'rde qollani'ladi'. Olar berilgen jiyilik diapazoni'nda jaqli'li'q shi'g'aradi'. Sonli'qtan bunday diodlar a'dettegidey elektr lampalari'n almasti'ra aladi', jaqli'landi'ri'w du'zilislerinde jaqli'li'q deregi si'pati'nda paydalani'ladi'.

Lazerlik jaqli'li'q shi'g'ari'wshi' diodlar. Lazerlik jaqli'li'q shi'g'ari'wshi' diodlardi'n' islew principi jaqli'li'q shi'g'ari'wshi' diodlardi'n' islew principi menen derlik birdey. Biraq bir qatar sheklerdi esapqa ali'wi'mi'z sha'rt. Bul diodlarda hallardi'n' inversiyali'q tolti'ri'li'wi'n ju'zege keltiriwimiz kerek (yag'ni'y qozg'an xalda elektronlar ko'p, al tiykarg'i' halda elektronlar az). Bunday jag'dayda p-n o'tkeli oblasti'nda ju'zege keltiriw mu'mkin. O'tkizgishlik elektronlari'ni'n' u'lken koncentraciyasi' (olar lazerdin' qozg'an hali'na sa'ykes keledi) n oblasttan kelgen elektronlar ta'repinen ta'miyin etiledi (4.27-b su'wret). p oblasttan keliwshi tesikshelerdin' u'lken koncentraciyasi' o'tkeldegi tiykarg'i' halda turg'an elektronlardi'n' az (N_1) sani'na sa'ykes. Bunday jag'dayda hallardi'n' tolti'ri'li'wi'ni'n' inversiyasi'n payda etiw mu'mkin (p-n o'tkeli oblasti'nda qozg'an haldag'i' elektronlardi'n' koncentraciyasi' N_2 , tiykarg'i' haldag'i' elektronlardi'n' koncentraciyasi' N_2 den u'lken). Lazerlik rezonator'di'n' aynalari' si'pati'nda yari'm o'tkizgish materialdi'n' tegislengen

qaptallari' xi'zmet etedi (4.27-su'wrette keltirilgen). Bul tegislengen qaptallardi'n' birin yari'm mo'ldir etip isleydi ha'm bul bet arqali' lazer nuri' shi'g'adi' (4.27-b su'wret).

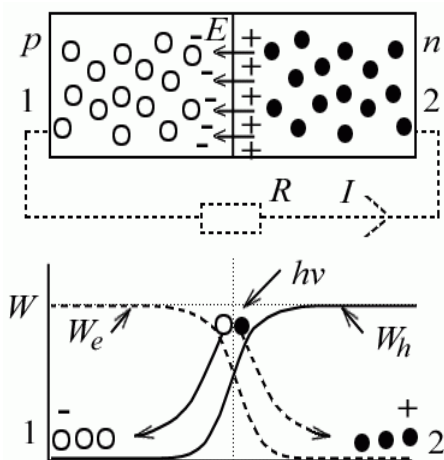
Lazerlik diodlar miniatyurali'q, ekonomli' diodlar boli'p, oni'n' uzi'nli'g'i'ni'n' shamasi' 1 sm den ko'p emes. Bunday diodlar ju'da' ku'shli jaqti'li'q da'stesin bere aladi' ha'm sonli'qtan olardi' informaciyalardi' jazi'w ushi'n polimer plenkalardi'n' za'ru'rli' bolg'an ori'nlari'n' ku'ydiriw ushi'n jiyi paydalanadi'. Lazerlik diodlardi' informaciyani' jazi'w ha'm oqi'w ushi'n sog'i'lg'an optikali'q du'zilislerde, lazerlik printerlerde, informaciyalardi' shiyshe talshi'qli' kabeller arqali' jetkerip beriwshi sistemalarda ken' tu'rde qollanadi'.

p-n o'tkelindegi toq derekleri. Ha'zirgi waqitlari' elektr tog'i'ni'n' generatorlari' si'pati'nda p-n o'tkelindegi toq derekleri ken'nen qollani'ladi'. Bunday o'tkellerdegi toq deregi boli'p to'mendegiler xi'zmet etedi:

1) p-n o'tkeline tu'siwshi elektromagnit nurlani'wi' energiyasi'. Bunday du'zilislerdi yari'm o'tkizgishli Quyash elementleri dep ataydi';

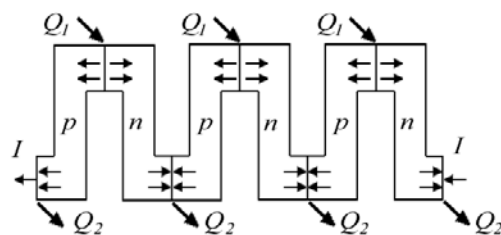
2) p-n o'tkeline ali'p kelinetug'i'n' ji'lli'li'q energiyasi'. Bunday du'zilislerdi yari'm o'tkizgishli ji'lli'li'q elementleri dep ataydi'.

Yari'm o'tkizgishli Quyash elementleri. Yari'm o'tkizgishli Quyash elementlerinin' islew principi 4.28-su'wrette keltirilgen sxemada ko'rsetilgen. Bul sxemadag'i' p-n o'tiwinde joqari'da atap o'tilgen processlerdin' na'tiyjesinde elektr maydani' payda boladi' ha'm elektronlar menen tesikshelerdin' energiyalari'ni'n' tarqali'wi' toqti' payda etiw ushi'n jumsaladi'. p-n o'tkeli oblasti'nda juti'lg'an kvant tesikshe-elektron jubi'n payda etedi, elektr maydani' tesiksheni p oblastqa, al elektrondi' n oblastqa i'si'radi'. Bunday jag'dayda jaqti'li'q nurlari'ni'n' ta'sirinde tesiksheler p, al elektronlar n oblastqa ji'ynaladi'. Usi'ni'n' na'tiyjesinde 1 ha'm 2 noqatlari'n' bir biri menen tutasti'rsa toq o'tedi ha'm bul toqti' paydalani'w mu'mkinshiligine iye bolami'z.



4.28-su'wret.

Yari'm o'tkizgishli Quyash elementinin' konstrukciyasi' ha'm jumi's islewinin' principi.



Ris. 4.29.

Yari'm o'tkizgishli oblastlardi' ji'lli'li'q elementleri batareyasi'na tutasti'ri'w. Elektron-tesikshe jubi'ni'n' tuwi'li'wi' ji'lli'li'qti'n' juti'li'wi'ni'n' saldari'nan ju'zege keledi. Sonli'qtan su'wrettin' joqari'si'ndag'i' p-n oblastti' qi'zdi'ri'w kerek boladi'. Elektron-tesikshe jubi'ni'n' rekombinaciyasi'ni'n' saldari'nan ji'lli'li'q bo'linip shi'g'adi', sonli'qtan su'wrettin' to'meninen ji'lli'li'qti' ali'p ketiw kerek boladi'.

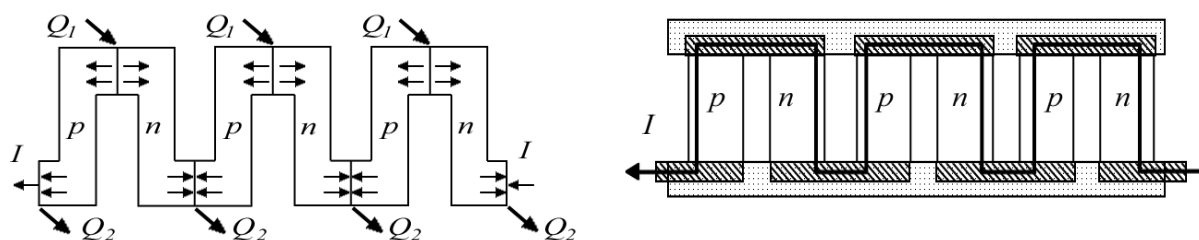
Yari'm o'tkizgishli Quyash elementlerin' p tipindegi yari'm o'tkizgishtin' plastinkasi' tu'rinde aladi'. Bul plastinkag'a metaldi'n' juqa mo'ldir qatlami'n' oti'rg'i'zadi', al bul o'tkizgishti n tipindegi yari'm o'tkizgish si'pati'nda qaraw mu'mkin. Bunnan keyin metall qatlamdi' qorg'ap turi'wshi' mo'ldir material menen jabadi'. Bul qatlam arqali' o'tken jaqti'li'q kvantlari' metaldi'n' juqa qatlami'nan o'tip p-n oblasti'nda juti'ladi'. Toqti' yari'm o'tkizgishli plastinkadan ha'm juqa qorg'ap turi'wshi' qatlamnan «ali'p ketedi». Bunday elementtin' ushlari'nda payda bolg'an potenciallar ayi'rmasi' voltten a'dewir kishi, al toqti'n'

shamasi' bir neshe milliamperdi quraydi'. A'dette elementlerdi batareyag'a tutasti'radi' (buni' Quyash batareyasi'). Al elementlerdi bir biri menen izbe-iz de parallel de tutasti'ri'wg'a boladi'.

Yari'm o'tkizgishli ji'lli'li'q elementleri. Yari'm o'tkizgishli ji'lli'li'q elementlerinin jumi's islew principi Quyash elementlerinin jumi's islew principine uqsas. Tiykarg'i' ayi'rma sonnan ibarat, p-n oblasti'nda elektron-tesikshe jubi' bul jag'dayda ji'lli'li'qti'n' ta'sirinde payda boladi'.

Yari'm o'tkizgishli ji'lli'li'q elementlerin a'dette 4.29-su'wrette ko'rsetilgendey etip batareyag'a tutasti'radi'. Bunday jag'dayda qanday da bir ji'lli'li'q deregi ta'repinen qi'zdi'ri'latug'i'n p-n o'tkelleri konstrukciyani'n' bir ta'repin, al a'dette suw yamasa hawa ag'i'si' menen qi'zdi'ri'latug'i'n p-n o'tkeli konstrukciyani'n' ekinshi bo'legin quraydi'.

Yari'm o'tkizgishli salqi'nlatqi'shlar. Yari'm o'tkizgishli salqi'nlatqi'shlar sonday du'zilis boli'p tabi'ladi', elektr tog'i' o'tkerilgende bunday du'zilistin' bir ta'repi salqi'nlaydi', al ekinshi ta'repi qi'zadi'. Oni'n' sxemasi' 4.30-su'wrette keltirilgen. p ha'm n oblastlari'n shi'nji'r ta'rizli etip tutasti'radi' ha'm bul shi'nji'r arqali' toq o'tedi. Jup nomerlerge iye oblastlarda elektronlar menen tesikshelerdin' rekombinaciyasi' ori'n aladi' ha'm bul oblastlardan ji'lli'li'q bo'linip shi'g'adi'. Al taq nomerli oblastlarda elektron-tesikshe juplari' payda boladi' ha'm sonli'qtan bunday oblastlarda energiya juti'ladi'. Yari'm o'tkizgishlerdin' qadag'an etilgen zonalari'ni'n' ken'ligin ha'm basqa da xarakteristikalarin' tan'lap ali'w arqali' ji'lli'li'q energiyasi'ni'n' juti'li'wi' menen shi'g'ari'li'wi'ni'n' ju'zege keliwin a'melge asi'ri'w mu'mkin. Eger tutasti'ri'lg'an ori'nlardan ji'lli'li'q ali'p ketiletug'i'n bolsa salqi'nlatqi'sh mashina (salqi'nlatqi'sh mashina ji'lli'li'qti' salqi'n deneden temperaturasi' joqari' bolg'an denege ali'p beredi) ali'nadi'. A'dette ha'r qi'yli' tiptegi yari'm o'tkizgishlerdi 4-30-b su'wrette keltirilgen sxema boyi'nsha jalg'asti'radi'. Bunday jalg'asti'ri'wda «salqi'n» jag'i' bir ta'repte, al i'ssi' jag'i' ekinshi ta'repte jaylasadi'. Usi'nday du'zilistin' ja'rdeminde 30-50 gradusli'q temperaturalar ayi'rmasi'n aladi'.

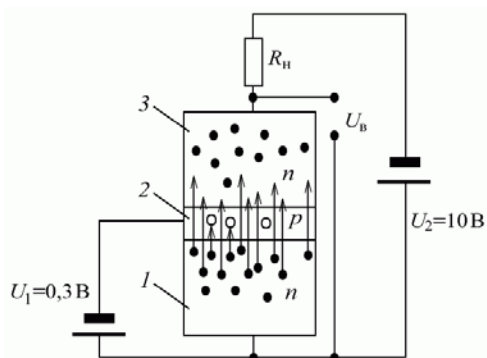


4.30-a ha'm b su'wretler.

Salqi'nlatqi'shtag'i' yari'm o'tkizgish oblastlardin' bir biri menen jalg'ani'wi'. Elektron-tesikshe jubi'ni'n' payda boli'wi' ji'lli'li'qti'n' juti'li'wi' menen ju'redi. Sonli'qtan p-n o'tkeldin' joqari'dag'i' oblastlari' menen olar menen tutasqan dielektrik plastinka salqi'nlaydi'. Elektron-tesikshe jubi'ni'n' rekombinaciyasi' ji'lli'li'qti'n' shi'g'ari'li'wi' menen ju'redi, bul ji'lli'li'q p-n o'tkeldin' to'mengi ta'repindegi oblastlardan dielektrik plastinkalardi'n' ja'rdeminde ali'p ketiledi.

Yari'm o'tkizgishli salqi'nlatqi'shlar miniatyurali'q jen'il salqi'nlatqi'shlar talap etiletug'i'n texnikani'n' tarawlari'nda ken' tu'rde qollani'ladi'. Bunday salqi'nlatqi'shlardi'n' ja'rdeminde infraqi'zi'l nurlani'wi'ni'n' datshiklerin, yari'm o'tkizgishli lazerlerdi ha'm tag'i' basqalar salqi'nlati'ladi'.

Yari'm o'tkizgishli tranzistor. Eger yari'm o'tkizgishtin' u'sh oblasti'n 4.31-su'wrette ko'rsetilgendey etip tutasti'rsa yari'm o'tkizgish tranzistor dep atalatug'i'n a'sbap ali'nadi'. Bunday tranzistordin' ja'rdeminde signallardi', toqlardi', kernewlerdi ku'sheytiv mu'mkin. Yari'm o'tkizgishtin' ha'r qi'yli' tiplerinin' izbe-izligine baylani'sli' tranzistorlar p-n-p ha'm n-p-n tipinde boladi' (tranzistorlardin' tek eki tipi bar).



4.31-su'wret.
n-p-n tipidagi tranzistordi' tutasti'ri'w
sxemasi'.

n-p-n tranzistordi'n' jumi's islew principin qarap o'temiz. 2 arqali' belgilengen ortadag'i' oblastti'n' ju'da' juqa boli'wi' a'hmiyetke iye. Sebebi 1 ha'm 2 oblastlari'nan kelgen elektronlardi'n' ko'pshiliginin' tesiksheler menen 2 oblasti'nda rekombinaciya'ga ushi'ramay joqari'dag'i' 3 oblasti'na kelip jetiwi talap etiledi. Bul principi'alli'q talap. 1, 2 ha'm 3 oblastlari' tranzistordi'n' sa'ykes emitteri, bazasi' ha'm kollektori' dep ataladi'. Olarg'a o'tkizgishler jalg'anadi'. Bul o'tkizgishlerdi de radiotexnikada tranzistordi'n' emitteri, bazasi' ha'm kollektori' dep ataladi'.

Emitter menen bazag'a jalg'ang'an o'tkizgishlerge shama menen 0,3 volt kernew tu'siriledi. Demek emitter-baza o'tkeli azmaz ashi'lg'an degen so'z. Kollektor ha'm emitterge shama menen 3 – 30 volt kernew tu'siriledi. Demek kollektor-baza o'tkeli jabi'q degen so'z. Biraq emitter oblasti'nan kelgen elektronlardi'n' ayi'ri'mlari' g'ana baza oblasti'nda tesiksheler menen rekombinaciya'ga ushi'raydi' (shama menen 20-100 elektronni'n' birewi). Qalg'an elektronlardi'n' barli'g'i' da rekombinaciya'ga ushi'rawg'a «u'lgermey» kollektor oblasti'na «sekirip» o'te aladi'..

Emitter-bazadag'i' kernewdin' kishi o'zgerisi emitter-baza arasi'ndag'i' p-n o'tkeli arqali' o'tetug'i'n toqti'n' u'lken shamalg'a o'siwin, al bul o'z gezeginde kollektor oblasti'ndag'i' toqti'n' o'siwin ta'miynleydi. Bunday jag'dayda nagruzka qarsi'li'g'i'nda kernewdin' ku'shli o'zgerisi ju'zege keledi. Solay etip emitter menen baza arasi'ndag'i' kernew menen toqti'n' kishi o'zgerisleri tranzistordi'n' baza menen kollektori' arasi'ndag'i' kernewdin' u'lken shamalg'a o'zgerisin boldi'radi'. Tranzistor toq penen kernewdi ku'sheyttetug'i'n kompaktli' a'sbap boli'p tabi'ladi'. Oni'n' jumi's islewi u'sh elektrodli' vakuumli' radiolampani'n' jumi's islewine uqsas.

Radiolampalarg'a sali'sti'rg'anda tranzistorlar kompaktli' (ha'zirgi waqi'tlari' mikrosxemalardi'n' qurami'na kiriwshi tranzistorlardi'n' o'lshe'mleri bir mikrometrdan aspaydi', al bir mikrosxema o'z ishine 10^6 - 10^8 shamasina shekem tranzistorlardi' ala aladi'). Tranzistorlar bekkemligi jaqtan radiolampalarg'a sali'sti'rg'anda a'dewir joqari' (sebebi tranzistorlarda torlar, shiyshe bo'limler, qi'zatug'i'n katod bolmaydi'), radiolampalarg'a sali'sti'rg'anda a'dewir uzaq waqi't isleydi (sebebi ku'shli qi'zatug'i'n detallari' joq) ha'm texnologiyali'q jaqtan ju'da' joqari' a'hmiyetke iye [shan'landi'ri'w (napi'lenie) ha'm qi'zdi'ri'w (otjig) joli' menen bir kristalda do'retilgen mikrosxemalardi'n' qurami'na kiriwshi tranzistorlardi'n' birden 10^5 - 10^8 danasi'n aladi'].

Yari'm o'tkizgishlerden sog'i'lg'an tranzistorlardi'n' ha'm basqa da yari'm o'tkizgishli a'sbaplardi'n' kemshiligi si'pati'nda birinshi gezekte olardi'n' qi'zi'wg'a, radiaciya'ga ayri'qsha sezgirligin atap o'tiw kerek. Sonli'qtan ku'shli radiaciya bar ori'nlarda yari'm o'tkizgishli a'sbaplardi' tabi'sli' tu'rde paydalani'w mu'mkin emes ha'm sonli'qtan sonday ori'nlarda usi' ku'nlerge shekem radiolampalari' bar a'sbap-u'skeneler paydalani'ladi'.

1956-j'i'li' Uilyam Bredfor Shokli, Djon Bardin ha'm Uolter Xauzer Bratteynler yari'm o'tkizgishlerdi izertlew boyi'nsha jumi'slari' ha'm tranzistorli'q effektti ashqanli'g'i' ushi'n Xali'q arali'q Nobel si'yli'g'i'n ali'wg'a miyasar boldi'.

Yari'm o'tkizgishli tranzistorlardi'n' payda boli'wi' XX a'sirdegi en' u'lken texnikali'q revolyuciyan' boldi'rdi'. Kompyuterlik, basqa da elektronli'q texnikani'n' kompaktli' ha'm isenimli elementlerin do'retiw mu'mkinshiligi ju'zege keldi.

5. Qatti' denelerdin' magnitlik qa'siyetleri

Belgili bolg'an barli'q zatlar o'zlerinin' magnitlik qabi'llag'i'shli'g'i'ni'n' belgisi boyi'nsha diamagnetikler ha'm paramagnetikler boli'p eki u'lken toparg'a bo'linedi. Paramagnitlik zatlardi'n' arasi'ndag'i' magnitlik jaqtan ta'rtplesken zatlardi' ayi'ri'p ko'rsetedi. Bunday zatlarda qon'si'las atomlardi'n' magnit momentleri bag'i'tlari' boyi'nsha ta'rtplesken. Mi'sali' en' a'piwayi' jag'day retinde ferromagnetiklerdi ali'p ko'rsetiw mu'mkin. Olarda barli'q atomlardi'n' magnit momentleri bir biri menen parallel. Magnit momentlerinin' tap usi'nday boli'p ta'rtplesiw zatlardi'n' tek magnitlik qa'siyetlerinin' emes, al basqa da ko'plegen fizikali'q qa'siyetlerinin' (mi'sali' ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'n) qa'liplesiwine ta'sir jasaydi'. Biz to'mende magnitlik jaqtan ta'rtplesken zatlardi'n' fizikali'q qa'siyetlerin qarap o'temiz.

Magnitlik ta'rtplesiwidin' ta'biyati'

Atomlardi'n' magnit momentlerinin' ta'rtplesken tu'rde jaylasi'wlari' elektrostatikali'q ta'biyatqa iye ha'm elektronlardi'n' tolqi'n funkciyalari'na Pauli principi ta'repinen qoyi'latug'i'n shekler menen baylani'sli'. Buni' to'mende keltirilgen eki elektronni'n' tolqi'n funkciyasi'ni'n' tu'ri haqqi'ndag'i' tallawdi'n' ja'rdeminde ko'rsetiw mu'mkin. Bul tallawdi' ko'p sanli' elektronlar ushi'n da uli'wmalasti'ri'w mu'mkin.

Eki elektronni'n' tolqi'n funkciyasi' $\Psi(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \vec{S}_1, \vec{S}_2)$ arqali' belgileymiz. Eger bul tolqi'n funkciyasi'ni'n' spinlik bo'limi $\vec{S}_1, \vec{S}_2$ oni'n' koordinatali'q bo'limi $\vec{r}_1, \vec{r}_2$ den g'a'rezsiz dep esaplasaq, onda $\Psi(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \vec{S}_1, \vec{S}_2)$ funkciyasi'n $\Psi(\vec{S}_1, \vec{S}_2)$ ha'm $\Psi(\vec{r}_1, \vec{r}_2)$ funkciyalari'ni'n' ko'beymesi tu'rinde ko'rsetiw mu'mkin. Kvant mexanikasi'nda spin-orbitali'q ta'sirlesiw kishi bolg'an jag'dayda bunday jaqi'nlasiw duri's na'tiyjelerdi beredi dep esaplaydi'. Elektronlardi'n' tolqi'n funkciyasi'ni'n' antisimmetriyalig'i' eki jag'dayda ju'zege keledi:

1) tolqi'n funkciyasi'ni'n' spinlik bo'limi antisimmetriyalig'i' (bul spinlerdin' qarama-qarsi' bag'i'tlari'na sa'ykes keledi), al oni'n' koordinatali'q bo'limi simmetriyalig'i' yamasa simmetriyalig'i' emes,

2) tolqi'n funkciyasi'ni'n' spinlik bo'limi simmetriyalig'i' (bul spinlerdin' bag'i'tlas boli'wi'na sa'ykes keledi), koordinatali'q bo'limi bolsa antisimmetriyalig'i'.

Simmetriyalig'i'q tolqi'n funkciyasi'ni'n' koordinatali'q bo'limi mi'naday tu'rge iye:

$$\Psi_s(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = \Psi_{r1}(\vec{r}_1) \cdot \Psi_{r2}(\vec{r}_2) + \Psi_{r1}(\vec{r}_2) \cdot \Psi_{r2}(\vec{r}_1),$$

Al antisimmetriyalig'i'q tolqi'n funkciyasi'ni'n' koordinatali'q bo'limi mi'naday tu'rge iye:

$$\Psi_a(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = \Psi_{r1}(\vec{r}_1) \cdot \Psi_{r2}(\vec{r}_2) - \Psi_{r1}(\vec{r}_2) \cdot \Psi_{r2}(\vec{r}_1).$$

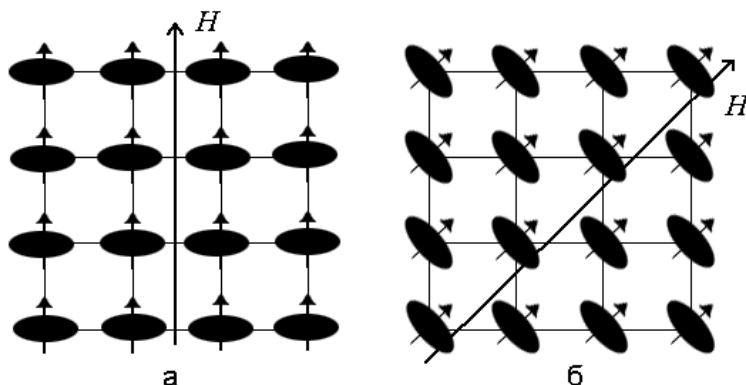
Solay etip spinlerdin' bir birine sali'sti'rg'andag'i' bag'i'tlari' (orientaciyalari') elektronlardi'n' tolqi'n funkciyalari'ni'n' tu'rin o'zgerterdi eken. Bul jag'day elektronlar qabi'qlari'ni'n' ha'r qi'yli' formalari' ha'm elektrostatikali'q energiyani'n' ha'r qi'yli' ma'nisleri menen baylani'sli'. Spinlerdin' antiparallel ha'm parallel bolg'an jag'daylari'na sa'ykes keliwshi (yamasa tolqi'n funkciyasi'ni'n' koordinatali'q bo'liminin' simmetriyalig'i' ha'm antisimmetriyalig'i'na sa'ykes keliwshi) energiyani'n' ma'nislerinin' ayi'rmasi' almasi'w energiyasi' dep ataladi' ha'm U_{alm} arqali' belgilenedi. Kvant mexanikasi'nda U_{alm} shamasini'n' $2J(\vec{S}_1, \vec{S}_2)$ shamasina ten' ekenligi da'lillenedi, yag'ni'y $U_{alm} = 2J(\vec{S}_1, \vec{S}_2)$. J

shamasi' almasi'w integrali' dep ataladi' ha'm oni'n' ma'nisi elektronlar bulti'ni'n' formasi'na, en' basli'si' olardi'n' bir biri menen qalayi'nsha qosi'li'satug'i'nli'g'i'na baylani'sli'.

J shamasi'ni'n' en' u'lken ma'nisi tolti'ri'lmag'an ishki elektronli'q qabi'qlarg'a iye atomlarda baqlanadi'. Mi'sal retinde temirdi, xromdi', manganecti, kobaltti', nikeldi, jerde siyrek ushi'rasatug'i'n ha'm transuran elementlerin ko'rsetiw mu'mkin. Almasi'w integrali'ni'n' belgisi de, ma'nisi de atomlar arasi'ndag'i' qashi'qli'qtan g'a'rezli. Sonli'qtan J shamasi'ni'n' ma'nisi ha'r qi'yli' ximiyali'q birikpelerge kiriwshi atomlardi'n' birdey jubi' ushi'n ha'r qi'yli' ma'nislerge iye bola aladi'. Bul jag'day o'z gezeginde magnitlik ta'rtplesiwidin' ko'p sanli' tiplerin payda etedi.

Atomlardi'n' magnit momentleri ta'rtpleskende energiyali'q jaqtan bir qansha utadi'. Bul uti'sti'n' shamasi' atomlar qaytadan ta'rtpleskende ximiyali'q baylani'stag'i' energiyani'n' uti'si'nday ma'niske iye. Usi'nday sebeplerge baylani'sli' atomlardi'n' magnit momentlerinin' ta'rtplesiw quymadag'i' atomlardi'n' qaytadan toparlarga bo'liniwin, ha'tte qurami' bir tekli bolg'an quymani'n' bir neshe fazalarg'a aji'rali'wi'n boldi'ra aladi' (bir faza magnit momentleri ku'shli tu'rde ta'rtplesken element penen bay, ekinshisi «qalg'an» elementlerge bay fazalar).

Magnitlik anizotropiya. Kristalda magnitlik ta'rtplesiw energiyasi' kristallografiyali'q ko'sherlerge sali'sti'rg'andag'i' atomlardi'n' magnit momentlerinin' ha'm usi'g'an baylani'sli' elektronli'q qabi'qlardi'n' bag'i'ti' menen baylani'sli'. 5.1-su'wrette magnit momentlerinin' bag'i'tlari'ni'n', oni'n' menen baylani'sli' bolg'an atomlardi'n' elektronli'q qabi'qlari'ni'n' kristallografiyali'q ko'sherlerge sali'sti'rg'andag'i' eki tu'rli boli'p bag'i'tlani'wi' keltirilgen. Elektronli'q qabi'qlardi'n' bir biri menen betlesiw ha'r qi'yli' bolg'anli'qtan su'wrette keltirilgen qabi'qlar ushi'n o'z-ara ta'sirlesiwidin' ha'r qi'yli' energiyasi' sa'ykes keledi. Bunday jag'daylarda magnit momentlerinin' berilgen H maydani'nda [100] yamasa [110] bag'i'tlari'ndag'i' energiyalari' ha'r qi'yli' ma'nislerge iye boladi'. Bul energiyani' magnit anizotropiyasi' energiyasi' dep ataydi'. Bunday energiyani'n' ko'lemlik ti'g'i'zli'g'i' ω_m shamasi'n yari'm fenomenologiyali'q formulalar ja'rdeminde esaplaydi'.



5.1-su'wret.

Atomlardi'n' magnit momentlerinin' ha'm H maydani'ni'n' ha'r qi'yli' orientaciyalari'ndag'i' atomlardi'n' elektronli'q qabi'qlari'ni'n' bir birin jabi'wi'.

Mi'sal keltiremiz. kubli'q pa'njerege iye kristaldag'i' ω_m shamasi'n kristaldi'n' [100] tipindegi bag'i'ti'na sali'sti'rg'andag'i' magnitleniw vektori'ni'n' bag'i'tlawshi' kosinuslari' (α, β, γ) lardi'n' funkciyasi' dep esaplaydi'. Bul funkciyani'n' ma'nisi kosinuslardi'n' belgisinen g'a'rezli bolmawi' ha'm kosinuslardi'n' ori'nolari'n almasti'ri'wg'a qarata simmetriyali' boli'wi' sha'rt. Sebebi kubli'q pa'njerede berilgen vektordi'n' bag'i'ti' menen og'an qarama-qarsi' bag'i't, soni'n' menen birge barli'q u'sh dana [100] tipindegi ko'sherler ekvivalent. Usi'nday ko'z-qaraslar tiykari'nda ω_m shamasi'n mi'na tu'rde jazami'z:

$$\omega_m = K_1(\alpha^2\beta^2 + \alpha^2\gamma^2 + \beta^2\gamma^2) + K_2\alpha^2\beta^2\gamma^2 \quad (5.1)$$

Qa'legen kristal ushi'n ω_m shamas'i kishi bolatug'i'n bag'i't bar boladi'. Bunday bag'i'tti' jenil magnitleniw bag'i'ti' dep ataydi'. Mi'sali' KOK strukturag'a iye temir ushi'n [100] tipindegi, QOK strukturag'a iye nikel ushi'n [111] tipindegi, gektagonalli'q pa'njerege iye kobalt ushi'n [0001] bag'i'ti' jenil magnitleniw bag'i'ti' boli'p tabi'ladi'. Jan'a magnitlik materiallard'i' do'retkende ha'm olardi' texnikada paydalang'anda magnitlik anizotropiyani' esapqa ali'w za'ru'r. Magnitlik anizotropiya turaqli' magnitler sog'i'w ushi'n paydalani'latug'i'n ko'plegen materiallard'i'n' en' joqari' xarakteristikalari' boli'p tabi'ladi'.

Magnitostrikiya. Atomlard'i'n' magnit momentleri menen olardi'n' elektronli'q qabi'qlari'ni'n' bag'i'tlari' bir bag'i'tqa qaray o'zgergende (5.1-su'wret) ha'r qi'yli' bag'i'tlardag'i' atomlard'i'n' ten' salmaqli'q hallari'ni'n' o'zgeriwi kerek. Sebebi asimmetriyal'i'q elektronli'q qabi'qlar ha'r qi'yli' bag'i'tlarda bir biri menen ha'r qi'yli' boli'p ta'sirlesedi. Usi'ni'n' saldari'nan kristaldi'n' geometriyal'i'q o'lshe'mleri o'zgerislerge ushi'raydi': ayi'ri'm bag'i'tlar boyi'nsha qi'sqaradi', al ayi'ri'm bag'i'tlar boyi'nsha u'lkeyedi. Bul qubi'li's magnitostrikiya dep ataladi'.

Magnitostrikiyani' toyi'ni'w magnitostrikiyasi' konstantasi' menen xarakterleydi. Bul konstantani'n' ma'nisi barli'q momentlerdi toli'q bura alatug'i'n ku'shli H magnit maydani'ndag'i' kristaldi'n' uzi'nli'g'i'ni'n' sali'sti'rmali' o'zgerisine ten'. Ko'pshilik zatlar ushi'n bul konstantani'n' ma'nisi 10^{-4} - 10^{-5} shamas'i'nda. Biraq konstantasi'ni'n' shamas'i' 10^{-3} ke shamaslas gigant magnitostrikiyag'a iye siyrek jer elementlerinin' birikpeleri de bar.

Magnitostrikiyani' sesti ha'm ultrasesti generaciyalawshi' du'zilislarda ken' tu'rde qollanadi'. Magnitostrikiya koefficienti u'lken bolg'an materialdan sog'i'lg'an serdeshnikti jiyiligi ω bolg'an o'zgermeli sinusoidal'i'q toq penen magnitleydi. Usi'ni'n' saldari'nan serdeshniktin' uzi'nli'g'i' 2ω jiyiligi menen o'zgeredi. Al usi'nday serdeshnik membranag'a tutasti'ri'lg'an bolsa ol a'tiraptag'i' ortal'i'qti' terbeli'w mu'mkinshiligine iye boladi'.

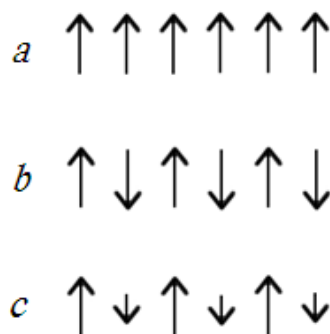
Magnitostrikiyag'a keri bolg'an qubi'li's ta' bar. Bunday jag'dayda kristaldi'n' deformaciyasi' elektronli'q qabi'qlardi'n' bag'i'tlari'ni'n', solar menen birge atomlard'i'n' magnit momentlerinin' anizotropiyali'q bag'i'tlani'wi'na ali'p keledi (5.1-su'wrette keltirilgen). Demek kristaldi' deformaciyalaw oni'n' magnitleniwine ali'p keledi degen so'z. Bul qubi'li'sti' da texnikada terbelisler menen vibraciyalardi' o'shoretug'i'n du'zilislardagi materiallarda ken' tu'rde qollanadi' (mi'sali' $Fe - Cl$ yamasa $Fe - Al$ quymalari'nda). Bunday konstrukciyalardag'i' serpimli terbelisler magnit material kristalli'n' (ko'pshilik jag'daylarda polikristalli'n) deformaciyalaydi'. Usi'ni'n' saldari'nan bunday material qaytadan magnitlenedi ha'm buni'n' ushi'n qosi'msha energiya talap etiledi. Bul qosi'msha energiya terbelmeli processlerden ali'nadi' ha'm na'tiyjede terbelis amplitudasi' kemeyedi. Vibraciyani'n' bir neshe ese kemeyiwi ushi'n buyi'mni'n' tek ayi'ri'm detallari'n' usi'nday materialdan sog'i'w jetkilikli.

Magnitlik ta'rtplesiw'din' tipleri

Qatti' denelerdeg'i' atomlard'i'n' magnit momentlerinin' bag'i'tlari' boyi'nsha ta'rtplesip jaylasi'wlari'ni'n' ko'plegen tipleri bar. Bul jag'day almasi'w integrali'ni'n' bir biri menen ta'sirlesiwshi atomlard'i'n' quri'li'si'nan, olar arasi'ndag'i' qashi'qli'qlardan, u'sh o'lshe'mli kristalli'q pa'njeredegi olardi'n' bir birine sali'sti'rg'andag'i' jaylasi'wlari'nan g'a'rezliginin' aqi'beti boli'p tabi'ladi'. Biz da'slep birdey tiptegi atomlardan turatug'i'n kristalli'q denelerdi qarap shi'g'ami'z

Jaqi'n qon'si'las atomlar ushi'n almasi'w integrali'ni'n' ma'nisi on' shama bola aladi'. Bunday jag'dayda spinler bir birine parallel jaylasadi' ha'm ferromagnetizmge sa'ykes keledi (5.2-a su'wret). Eger almasi'w integrali'ni'n' ma'nisi nolden kishi bolsa spinler antiparallel jaylasadi'. Bul jag'day antiferromagnetizmge sa'ykes keledi (5.2-b su'wret). Ferromagnetikler menen antiferromagnetikler magnitlik jaqtan ta'rtplesken zatlard'i'n' en'

a'piwayi'lari' boli'p tabi'ladi'. En' belgili ferromagnetikler qatari'na KOK pa'njerege iye temir menen QOK pa'njerege iye nikel, al en' belgili antiferromagnetikler qatari'na xrom menen marganec kiredi. 5.2- (a, b) su'wretlerde ferromagnetiktin' magnitlengenligi ju'da' u'lken, al antiferromagnetiktin' magnitleniwi nolge jaqi'n shama ekenligi ko'rinip tur.



5.2-su'wret.

Spinlerdin' ta'rtiplesiwinin' tipleri:

- a) ferromagnetik ushi'n,
- b) antiferromagnetik ushi'n,
- s) ferrimagnetik ushi'n.

Eger atomlar ha'r qi'yli' magnit momentlerine iye bolsa, onda ayi'ri'm atomlardi'n' magnit momentleri antiparallel bag'i'tlani'wi' mu'mkin (5.2-s su'wret). Bul jag'day ferrimagnetizmge sa'ykes keledi. Ferrit dep atalatug'i'n ferrimagnetiktin' magnitlengenligi a'dettegi ferromagnetiklerdegi jag'dayg'a sali'sti'rg'anda kishi, biraq a'dewir u'lken shamani' quraydi'

Ayi'ri'm ximiyali'q birikpelerde atomlardi'n' magnit momentlerinin' quramali' tu'rde jaylasi'wi' da baqlanadi'. Mi'sali' magnit momentlerinin' spiral ta'rizli boli'p ta'rtiplesiwi mu'mkin.

Quymalarda ha'r qi'yli' magnit momentlerine iye atomlar ta'rtipsiz tu'rde aralasqan. Soni'n' ushi'n bunday materiallarda magnitlik ta'rtiplesiwdin' tipi quymani'n' ximiyali'q qurami' o'zgergende o'zgeredi. Sebebi bul jag'dayda birdey tiptegi atomlar arasi'ndag'i' ortasha qashi'qli'q ha'm usi' qashi'qli'q penen baylani'sli' bolg'an almasi'w integrali'ni'n' ma'nisi o'zgeredi. Mi'sal retinde $Mn - Al$ quymasi'n ko'rsetiw mu'mkin. Taza marganectegi Mn atomlari' arasi'ndag'i' ori'n alatug'i'n qashi'qli'qlar ushi'n almasi'w integrali'ni'n' ma'nisi nolden kishi (yag'ni'y teris shama). Sonli'qtan ol antiferromagnetik boli'p tabi'ladi'. Marganecke alyuminiydi qosqanda Mn atomlari' arasi'ndag'i' qashi'qli'q u'lkeyedi. Usi'ni'n' saldari'nan Mn atomlari' arasi'ndag'i' qashi'qli'q belgili bir ma'niske jetkende (yag'ni'y Al atomlari'ni'n' belgili bir koncentraciyasi'nda) almasi'w integrali'ni'n' ma'nisi nolden u'lken boladi'. Bunday jag'dayda Mn atomlari'ni'n' magnit momentleri ferromagnitlik tipte ta'rtiplesedi.

Magnitlik ta'rtiplesiwdi izertlew usi'llari'. Kristallardag'i' spinlerdin' bag'i'tlari'n (orientaciyalari'n) u'yreniwdin' en' isenimli usi'li' neytronlardi'n' shashi'rawi' boli'p tabi'ladi'. Neytron magnit momentine iye. Oni'n' ma'nisi $\mu_n = 0,966237 \cdot 10^{-29}$ Dj/Tl. Sonli'qtan ol atomlardi'n' magnit momentleri menen ta'sirlese aladi'. Soni'n' menen birge neytronlar yadrolarda o'zlerinin' energiyalari'n o'zgertpey shashi'ray aladi'. Usi' jag'daylarg'a baylani'sli' neytronlardi'n' difrakciyasi'n spinlerdin' bag'i'tlari'n u'yreniw ushi'n paydalanadi'.

Ha'r bir atomni'n' neytronlardi' shashi'rati'w amplitudasi' eki qosi'li'wshi'dan turadi': yadroli'q ha'm magnitlik.

Birinshisi ha'r bir izotopti'n' quri'li'si'nan g'a'rezli ha'm ha'r qanday izotoplar ushi'n ha'r qi'yli' ma'nislerge iye.

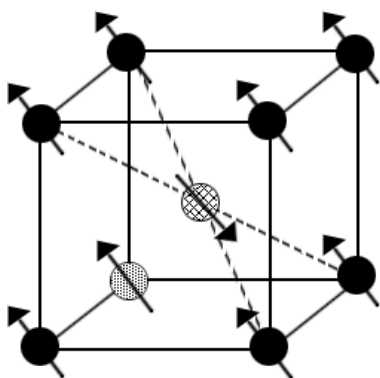
Ekinshisi bolsa atomni'n' magnit momenti $\vec{\mu}$ din' shamasi'nan ha'm bag'i'ti'nan g'a'rezli. Eger shashi'raw vektori' $\vec{G}$ menen $\vec{\mu}$ o'z-ara perpendikulyar bolsa shashi'raw maksimalli'q ma'nisike, al parallel bolg'anda nolge ten'. Solay etip kristaldi' $\vec{G}$ bag'i'ti'nda magnitlep magnitlik shashi'rawdi' «joq» etiwge boladi' degen so'z. $\vec{G}$ menen $\vec{\mu}$ vektorlari' arasi'ndag'i'

mu'yeshler ha'r qi'yli' ma'nislerge iye bolg'an jag'daylar ushi'n difrakciyalı'q kartinalardi'n' seriyasi' ali'nadi'. Bul kartinalardi'n' ja'rdeminde «magnitlik» ha'm «yadroli'q» sistemalardi'n' u'lesleri ani'qlanadi'.

Ferromagnitlik ta'rtplesiw jag'dayi'nda barli'q atomlar birdey shashi'raw amplitudasi'na iye ha'm sonli'qtan neytronlar menen rentgen nurlari'ni'n' shashi'raw kartinasi' birdey boladi'.

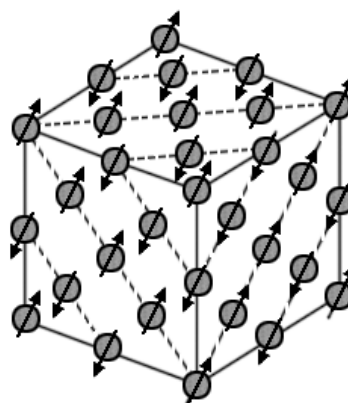
Antiferromagnitlik ta'rtplesiwde qon'si'las atomlardi'n' magnit momentleri bir birine qarama-qarsi' bag'i'tqa iye, al shashi'rag'an tolqi'nni'n' amplitudasi'na magnitlik u'lestin' belgileri ha'r qi'yli' boli'p qon'si'las atomlardi'n' shashi'raw amplitudalari' ha'r qi'yli' ma'nislerge iye. Na'tiyjede qosi'msha «magnitlik» shashi'rawlar payda boladi' (atomlardi'n' jaylasi'wlari'ni'n' ta'rtplesiwı de tap usi'nday «qosi'msha» shashi'rawlardi' payda etetug'i'nli'g'i'n eske tu'siremez).

Endi qi'yali'mi'zda bazi' bir gipotezali'q strukturalardi' alami'z ha'm olarda neytronlar shashi'rag'anda qanday «magnitlik» shashi'rawlardi'n' payda bolatug'i'nli'g'i'n qarap o'temiz. Bunday gipotezali'q strukturalar (quri'li'slar) ha'm olardag'i' atomlardi'n' magnit momentlerinin' bag'i'tlari' 5.3-su'wrette keltirilgen. Su'wrette keltirilgen elementar quti'sha ko'lemde oraylasqan kubli'q (KOK). Bunday quti'shada indekslerdin' qosi'ndi'si' taq bolg'anda shashi'raw ori'n almaydi' (biz buni' joqari'da ko'rgenbiz). Biraq magnitlik ko'z-qarastan 1 ha'm 2 atomlari' ha'r qi'yli', olardi'n' shashi'rati'w amplitudalari'ni'n' ma'nisleri de ha'r qi'yli'. Demek bunday jag'dayda indekslerinin' qosi'ndi'si' taq bolg'an strukturadan ti's (sverxstrukturni'e) shashi'rawlardi'n' payda boli'wi' sha'rt.



5.3-su'wret.

Ko'lemde oraylasqan kubli'q strukturag'a iye gipotezali'q antiferromagnitlik kristaldag'i' atomlardi'n' magnit momentlerinin' o'z-ara jaylasi'wlari'.



5.4-su'wret. Antiferromagnitlik ta'rtplesiwge iye marganec okisi MnO kristalli'ndag'i' Mn atomlari'ni'n' magnit momentlerinin' jaylasi'wlari'.

Mn atomlari'ni'n' spinleri (111) tipindegi tegisliklerdin' birinde birdey bag'i'tqa iye boladi'. Al qon'si'las tegisliktegi spinler qarama-qarsi'

bag'i'tlang'an. Bunday jag'dayda jaqi'n qon'si'las
atomlardi'n' spinleri qarama-qarsi' bag'i'tlang'an.

Kyuri temperaturasi'. Ortasha maydan teoriyasi'

Biz joqari'da ko'rip o'tken magnit momentlerinin' ta'rtplesken jaylasi'wi' ideallasti'ri'lg'an jag'daylar boli'p tabi'ladi'. Sebebi biz atomlardi'n' ji'lli'li'q qozg'ali'slari'n esapqa alg'ani'mi'z joq, al ji'lli'li'q qozg'ali'slari' bolsa magnit momentlerinin' ta'rtplesken jaylasi'wlari'ndag'i' buzi'li'wlardi'n' ori'n ali'wi'na ali'p keledi. Sali'sti'rmali' to'mengi temperaturalarda ji'lli'li'q qozg'ali'slari'ni'n' ta'siri ku'shli emes, biraq temperatura joqari'lag'an sayi'n ji'lli'li'q qozg'ali'slari'ni'n' ta'siri de ku'sheyedi. En' aqi'ri'nda Kyuri temperaturasi' dep atalatug'i'n bazi' bir temperaturada (Kyuri temperaturasi'n T_C arqali' belgileymiz) atomlardi'n' ji'lli'li'q qozg'ali'slari' magnit momentlerinin' ta'rtplesip jaylasi'wlari'n buza aladi'. Bunday jag'dayda ferromagnetik paramagnetikke aylanadi'. T_C shamasini'n' ma'nisi atomlardi'n' magnit momentlerinin' bir biri menen baylani'si'ni'n' bekkemliginen g'a'rezli. Eger haqi'yqati'nda da bekkem baylani's ori'n alsa, onda T_C temperaturasi'ni'n' shamasi' temir ushi'n 770°S, al temir-kobalt quymalari' ushi'n 1000°S dan joqari'. Ko'pshilik zatlar ushi'n Kyuri temperaturasi'ni'n' ma'nisi joqari' emes ha'm shama menen o'jire temperaturalari'n quraydi'.

T_C ni'n' eksperimentte ali'ng'an ma'nislari boyi'nsha magnit momentlerinin' bir biri menen ta'sirlesiw energiyasi' ω ni' ani'qlaw mu'mkin. Ta'rtplesken magnit momentlerin buzi'w (qi'yрати'w) ushi'n shama menen $kT_C \approx \omega \approx 0,1$ eV ji'lli'li'q energiyasi' kerek. Bul u'lken shama. Oni'n' ma'nisi dipollerdin' bir biri menen ta'sirlesiw energiyasi' menen magnit dipolinin' $\vec{B}$ magnit maydani'ndag'i' potencial energiyasi'nan u'lken. Haqi'yqati'nda da $\vec{B}$ magnit maydani'nda turg'an dipoldin' energiyasi' $\omega_d \approx |\mu||\vec{B}| \approx 0,001$ eV shamasina ten'. Bul shama kT_C shamasin'nan a'dewir kishi (ju'z esedey kishi). Demek ω_d ni'n' shamasi' T_C temperaturalari'nda magnit momentlerin ta'rtplesken halda uslap turi'wg'a jetpeydi. Sonli'qtan elektronli'q qabi'qlardi'n' elektrostatikali'q ta'sirlesiw menen baylani'sli' bolg'an magnit ta'rtplesiwini'n' kvantli'q tu'sindiriliwi birden bir qanaatlandi'rarli'q ha'm ba'rshe ta'repten moyi'ng'an tu'sindiriw boli'p tabi'ladi'. Biraq usi' jag'dayg'a qaramastan klassikali'q modeller de bar boli'p, olardi'n' tiykari'nda magnitlik ta'rtplesiwidin' «taza magnitlik» ta'biyati' jatadi'. Bul modeller toli'q korrektli (qatan' tu'rde tiykarlang'an) boljawlarga tiykarlang'an bolsa da magnetiktin' T_C temperaturasi' a'tirapi'ndag'i' qa'siyetlerin sa'tli tu'rde boljay aladi'. Sonlay klassikali'q modellerdin' en' sa'tlilerin qarap o'temiz.

Ortasha maydan modeli. Ferromagnetiklerdin' ko'p qa'siyetlerin sa'tli tu'rde ta'ripleytug'i'n bazi' bir modeller elektronli'q qabi'qlardi'n' elektrostatikali'q ta'sir etisiwini'n' ha'm oni'n' menen baylani'sli' bolg'an almasi'w integrali'nan esapqa ali'wdi'n' orni'na ko'pshilik jag'daylarda molekulali'q maydan $\vec{B}_E$ dep atalatug'i'n almasi'w magnit maydandi' (bul maydandi' Veyss maydani' dep te ataydi') paydalanadi'. $\vec{B}_E$ almasi'w magnit maydani' magnit momentlerinin' ta'rtplesip jaylasi'wlari'n ta'miyinlewi tiyis ha'm oni'n' shamasin' bahalaw mu'mkin. Bul modeller boyi'nsha almasi'w magnit maydani' ta'rtplesip jaylasqan magnit momentleri ta'repinen payda etiledi ha'm usi' magnit maydani'ni'n' o'zi momentlerdin' ta'rtplesip jaylasi'wi'n ta'miyinleydi. Tap usi'nday etip saylap ali'ng'an Veys maydani' eksperimentlerde baqlani'p ju'rgen makroskopiyali'q maydanlardan 10 – 100 esedey u'lken. Bunday jag'daydi'n' principinde kristallardi'n' ayi'ri'm noqatlari'nda ori'n alatug'i'nli'g'i'n atap o'temiz.

Joqari'da atlari' atalg'an ferromagnitlerdi ta'ripleytug'i'n modellerdin' ishindeg'i en' a'piwayi'si' **ortasha maydan modeli** boli'p tabi'ladi'. Bul modelde ha'r bir magnit

momentine zatti'n' magnitlengenligi $\vec{J}$ shamasina tuwri' proporcional bolg'an $\vec{B}_E$ magnit maydani' ta'sir etedi:

$$\vec{B}_E = \mu_0 \lambda \vec{J} \quad (5.2)$$

Bul an'latpada μ_0 arqali' vakuumni'n' magnit sin'irgishligi, al λ arqali' proporcionalli'q koefficient belgilengen.

T_C menen λ arasi'ndag'i' baylani'sti' ani'qlaw mu'mkin. Buni'n' ushi'n si'rtqi' maydan $\vec{B}_0$, sali'sti'rmali' magnit sin'irgishligi χ_p , $\vec{J}$ ha'm $\vec{B}_E$ shamalari' arasi'ndag'i' elektrodinamikadan belgili bolg'an baylani'sti' tabami'z:

$$\mu_0 \vec{J} = \chi_p (\vec{B}_0 + \vec{B}_E) \quad (5.3)$$

Paramagnetizm teoriyasi'nda Kyuri ni'zami' dep atalatug'i'n ni'zam bar. Usi' ni'zamdi' temperatura T_C dan a'dewir u'lken bolg'an jag'daylar ushi'n paydalanami'z:

$$\chi_p = \frac{C}{T} \quad (5.4)$$

(5.2)- ha'm (5.4)-an'latpalardi' (5.3) ke qoyami'z ha'm $\chi = \mu_0 J / B_0$ dep belgilep to'mendegi an'latpani' alami'z:

$$\chi = \frac{\mu_0 J}{B_0} = \frac{C}{T - C\lambda} \quad (5.5)$$

Bul formulada $T \rightarrow C\lambda$ sheginde $\chi \rightarrow \infty$ ekenligi ko'rinip tur. Bul si'rtqi' maydan $B_0 = 0$ bolg'andag'i' shekli magnitlengenlik $\vec{J}$ ge sa'ykes keledi. Al ferromagnetiklerde bolsa $T < T_C$ temperaturalarda tap sonday g'a'rezlik baqlanadi'. Tap usi' jag'daydi' paydalani'p $C\lambda = T_C$ dep jazadi' (C arqali' Kyuri turaqli'si' dep atalatug'i'n turaqli' shama belgilengen). Sonli'qtan $\chi(T)$ g'a'rezligi mi'naday tu'rge iye boladi':

$$\chi = \frac{C}{T - T_C} \quad (5.6)$$

Bul formula eksperimentte jaqsi' tasti'yi'qlanatug'i'n Kyuri-Veys ni'zami' boli'p tabi'ladi'. Ta'jiriybelerde bul ni'zamnan u'lken emes ayi'rmalar baqlanadi'. Mi'sali' (5.6) boyi'nsha esaplang'an T_C ni'n' ma'nisi ta'jiriybelerdegi ferromagnetiktegi spontan magnitleniwidin' jog'ali'w noqati'nan bir neshe gradusqa joqari' boli'p shi'g'adi'. Buni'n' sebebin tu'sindiriw mu'mkin. Haqi'yqati'nda da $T > T_C$ temperaturalarda magnit momentlerinin' jaylasi'wi'nda bir neshe tegislikler arali'q qashi'qli'qlarg'a ten' bolg'an bazi' bir jaqi'nnan ta'rtpi ori'n aladi'. Bunday jag'dayda T_C noqati' jani'nda zatti'n' paramagnitlik hali'n magnit momentleri tek kishi arali'qlarda ta'rtplesken ha'm u'lken χ g'a iye ferromagnitlik hal dep esaplaw mu'mkin.

Eger paramagnetizm teoriyasi'ndag'i' Kyuri turaqli'si' C ushi'n belgili bolg'an an'latpani' paydalansaq, onda λ ushi'n to'mendegidey an'latpa ali'nadi':

$$\lambda = T_C / C = 3k / (ng^2 S(S+1)(\mu_B)^2) \quad (5.7)$$

Temir ushi'n $T_C \approx 1043 \text{ K}$. $B_E = \lambda \mu_0 J$. Linde faktori' $g \approx 2$; $S = 1$; $\mu_0 J \approx 2Tn$. Bunnan $\lambda \approx 500$ ha'm $B_E \approx 1000 \text{ Tl}$ ekenligine iye bolami'z. B_E nin' shamasini' ju'da' u'lken boli'p shi'qti' (1000 Tl maydan kristallarda baqlanatug'i'n maydannan ju'zlegen ese u'lken). Bul na'tiyje ortasha maydan modelinin' haqi'yqatli'qqa sa'ykes kelmeytug'i'nli'g'i'n bildiredi

(haqi'yqatli'qqa magnitlik ta'sirlesiwidin' atomlardi'n' bir biri menen magnitlik ta'sirlesiwini' na'tiyjesi dep esaplaw sa'ykes kelmeydi). Biraq usi'nday jag'daylarg'a qaramastan ortasha maydan modeli ferromagnetizm teoriyasi'nda magnitlengenliktin' temperaturali'q g'a'rzligin esaplag'anda ji'yi paydalani'ladi'.

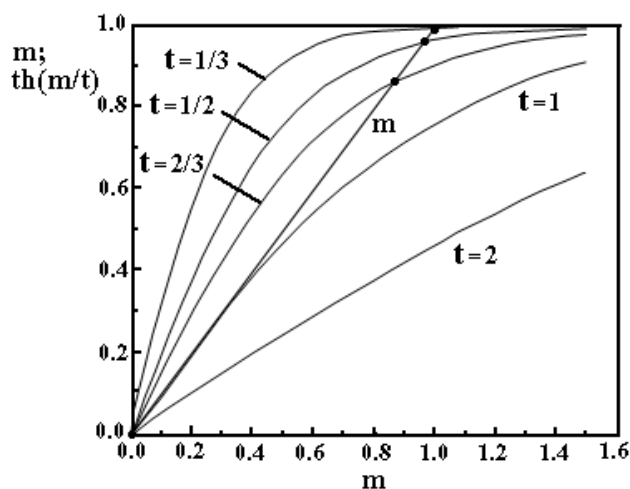
T_C **temperaturasi'nan to'mengi temperaturalar dag'i' magnitlengenlik.** $T < T_C$ temperaturalar dag'i' spontan magnitlengenliktin' temperaturadan g'a'rzligin esaplaymi'z. A'piwayi'li'q ushi'n $S = 1/2$ bolg'an jag'daydi' qaraymi'z. Bunday jag'dayda paramagnetizm teoriyasi'na muwapi'q magnitlengenlik J shamasini'n' B menen T dan g'a'rzligi bi'layi'nsha jazi'ladi':

$$J = n\mu_g \cdot th(\mu_g B / kT) \quad (5.8)$$

Eger $B_E \gg B_0$ sha'rti ori'nlanatug'i'n bolsa, onda $B \approx B_E = \mu_S \lambda J$ ha'm $\vec{J}$ ushi'n jazi'lg'an an'latpa to'mendegidey tu'rge iye boladi':

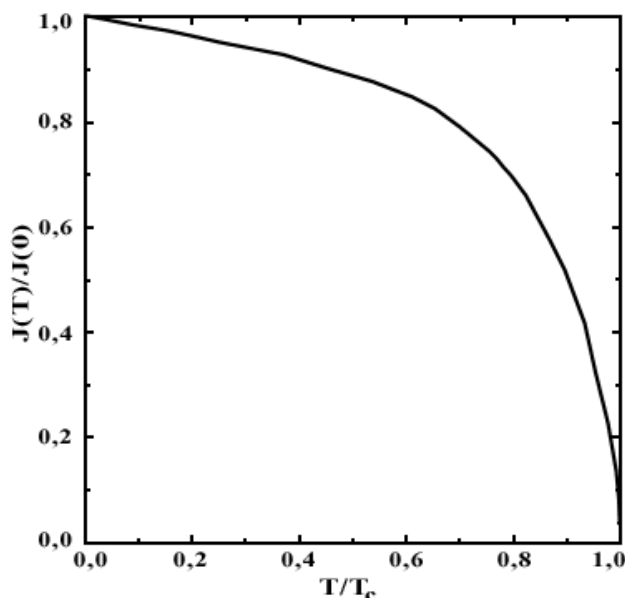
$$J = n\mu_g \cdot th(\mu_g \mu_0 \lambda J / kT) \quad (5.9)$$

Bul ten'lemeni J shamasina qarata analitikali'q sheshiw qi'yi'n matematikali'q ma'seleler qatari'na kiredi (mi'sali' Mathematica 8.0 universalli'q matematikali'q programmalaw tilinin' ja'rdeminde de ten'lemeni analitikali'q sheshiw mu'mkinshiligi bolmadi'). Soni'n' ushi'n (5.9)-ten'lemeni $\frac{1}{t} = \frac{\mu_S^2 \mu_0 n}{kT}$ ha'm $m = \frac{J}{n\mu_S}$ belgilewlerin qabi'l etip sanli' yamasa grafikali'q jollar menen g'ana sheshedi (5.5-su'wrtke qaran'i'z). Ten'leme $T < T_C$ sha'rti ori'nlang'anda nollik emes sheshimge iye boladi'. Na'tiyjeleri 5.6-su'wrette keltirilgen.



5.5-su'wret.

(5.9)-ten'lemeni grafikali'q jollar menen sheshiw na'tiyjeleri. 1 ha'm 2 iymeklikleri (0,0) noqati'nda kesilisedi, al $T < T_C$ sha'rti ori'nlang'anda su'wrettin' joqari'si'ndag'i' qara noqatta da kesilisedi. Bul si'rtqi' maydan B_0 joq bolg'an jag'daydag'i' nollik emes magnitlengenlikke sa'ykes keledi.



5.6-su'wret.
(5.9)-ten'lemeni grafikali'q jollar menen
sheshkendegi ali'natug'i'n $J(T)$
g'a'rezligi.

Temperatura Kyuri temperaturasi'nan kishi bolg'anda (yag'ni'y $T < T_c$ sha'rti ori'nlang'anda) T_c temperaturasi' a'tirapi'nda $J(T)$ g'a'rezliginin' to'mendegidey tu'rge iye bolatug'i'nli'g'i'n ko'rsetiw mu'mkin:

$$J(T) \approx J_0 (1 - T / T_c)^{3/2} \quad (5.10)$$

Shama menen usi'nday $J(T)$ g'a'rezligi (da'rejede $1/2$ emes, al 0,33 bolg'an g'a'rezlik) ko'pshilik ferromagnetikler ushi'n ta'jiriybelerde de baqlanadi'. $J(T)$ g'a'rezliginin' T_c a'tirapi'nda keskin o'zgerisinin' ori'n almawi' ferromagnetiktin' paramagnetikke o'tiwini ekinshi a'wlad fazali'q o'tiwlerine jatqari'wg'a tiykar beredi.

$J(T) = J_0 - \Delta J(T)$ g'a'rezliginin' absolyut noldin' jani'ndag'i' o'zgerislerin bahalaymi'z. Buni'n' ushi'n $\tanh(a) \approx 1 - 2 \exp(-2a)$ asimptotali'q formulasi'nan paydalani'p (5.8)-an'latpani' tu'rlendiremiz:

$$\Delta J(T) \approx 2J_0 \exp(-2(\mu\mu_0 \lambda J / kT)) = 2J_0 \exp(-2T_c / T) \quad (5.11)$$

Eksperimentler bolsa $T \rightarrow 0$ sheginde $\Delta J(T)$ shamasini'n' basqasha bolg'an to'mendegidey o'zgerisin beredi:

$$\Delta J(T) \approx J_0 C_{3/2} T^{3/2} \quad (5.12)$$

J_0 ha'm $C_{3/2}$ turaqli'lari' ha'r qi'yli' ferromagnetikler ushi'n ha'r qi'yli' boli'p shi'g'adi'.

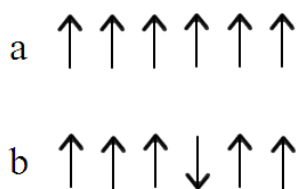
Solay etip ortasha maydan teoriyasi' Kyuri temperaturasi' a'tirapi'ndag'i' ferromagnetiklerdin' magnitlengenligin qanaatlandi'rarli'q da'rejede, biraq $\Delta J(T)$ shamasini'n' $T \rightarrow 0$ shegindegi o'zgerislerin turpayi' tu'rde ta'ripleydi. Spin tolqi'nlari' teoriyasi' (5.12)-an'latpadag'i' g'a'rezlikni tu'sindiriwge mu'mkinshilik beredi. Bul ju'da' quramali' bolg'an teoriyani'n' ferromagnetikler ushi'n ali'ng'an tiykarg'i' na'tiyjelerin to'mende qarap o'temiz.

Spin tolqi'nlari' ha'm olardi'n' ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'na qosatug'i'n u'lesi

Spin tolqi'nlari'. Spin tolqi'nlari' teoriyasi' ferromagnetikler tiykarg'i' halda turatug'i'n to'mengi temperaturalarlag'i' atomlardi'n' magnit momentlerinin' qa'siyetlerin u'yrenedi. Bunday temperaturalarda spinler bir birine parallel jaylasadi'. Biz ferromagnetiktin' magnitlik qa'siyetlerine elektronlardi'n' orbitali'q qozg'ali'slari'ni'n' aytarli'qtay u'les qospaytug'i'nli'g'i'n, al sol magnitlik qa'siyetlerdin' tiykari'nan spin momentleri (spinler) ta'repinen ani'qlanatug'i'nli'g'i'n atap o'temiz. A'piwayi'li'q ushi'n N dana spinnen turatug'i'n si'zi'qli' shi'nji'rda' qaraymi'z (5.7-a su'wret). Ha'r bir spin $\hbar S$ shamasi'na ten' spin momentine iye. Shi'nji'rda' tek jaqi'n qon'si'lar bir biri menen ta'sirlesedi dep esaplaydi'. Bunday shi'nji'rda'g'i' spinlerdin' ta'sirlesiw energiyasi'n bi'layi'nsha jazi'wg'a boladi':

$$U = -2J \sum_{p=1}^N \vec{S}_{p+1} \vec{S}_p \quad (5.13)$$

Bul an'latpadag'i' J arqali' almasi'w integrali' belgilengen (almasi'w integrali'n J arqali' belgilew da'stu'rge aylang'an). To'mengi temperaturalarlag'i' ji'lli'li'q qozg'ali'slari' bul sistemag'a «qoz'i'wlardi'» engize aladi'. Mi'sali' spinlerdin' biri bag'i'ti'n qarama-qarsi' bag'i'tqa o'zgerte aladi' (5.7-b su'wret).



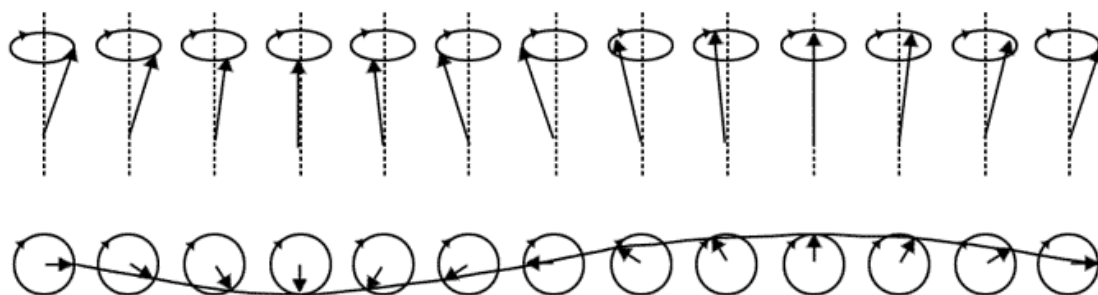
5.7-su'wret.

Atomlardi'n' si'zi'qli' shi'nji'ri'ndag'i' spinlerdin' orientaciyasi' (bag'i'ti'): barli'q spinlerdin' bag'i'tlari' birdey (a), ji'lli'li'q qozg'ali'slari'ni'n' ta'sirinde spinlerdin' biri bag'i'ti'n qarama-qarsi' ta'repke qaray burg'an (b).

Bir spin o'zinin' bag'i'ti'n qarama-qarsi' ta'repke bursa, onda eki jup spinler qarama-qarsi' bag'i'tlang'an boladi' ha'm sistema qosi'msha energiyag'a iye boladi':

$$\Delta U = 8JS^2 \quad (5.14)$$

Bul energiyani'n' shamasi' sali'sti'rmali' u'lken, 5.8-su'wrette sxema tu'rinde ko'rsetilgen spinler sistemasi'ni'n' energiyasi' kishirek ma'niske iye. Bul jag'dayda bir spinnen ekinshi spinge o'tkende ha'r bir spinnin' bag'i'ti' ju'da' kishi shamag'a o'zgeredi. Al bag'i'tlardi'n' tarqali'wi'ni'n' o'zi tolqi'ndi' eske tu'siredi. Sonli'qtan spin sistemasi'ni'n' tap usi'nday qozi'wlari'n spin tolqi'nlari' dep ataw qabi'l etilgen. Bunday qozi'wlar kvantlanadi'. Sa'ykes kvantti' magnon dep ataymi'z. Magnonlar da fotonlar menen fononlar si'yaqli' kvazibo'leksheler boli'p tabi'ladi'. Ha'r bir magnonni'n' uli'wmali'q spinnin' S_z qurawshi'si'n birge (1 shamasi'na) o'zgartetug'i'nli'g'i'n ko'rsetiwge boladi'.



5.8-su'wret. Spin tolqi'ni' jag'dayi'ndag'i' atomlardi'n' si'zi'qli' shi'nji'ri'ndag'i' spinlerdin' bag'i'tlari': barli'q spinler bir biri menen derlik parallel. Spinlerdin' bag'i'tlari'ni'n' tarqali'wi' tolqi'ndi' eske tu'siredi.

Joqari'da qarap o'tilgen shi'nji'rdag'i' yamasa haqi'yqi'y kristaldag'i' magnonlar ushi'n dispersiya nazami'n [bul g'a'rezlikni $\omega(\vec{K})$ arqali' belgileymiz] keltirip shi'g'ari'w mu'mkin. Mi'sali' si'zi'qli' shi'nji'r ushi'n (5.7-su'wret) to'mendegidey dispersiya ni'zami' ali'nadi':

$$\hbar\omega = 4JS[1 - \cos(Ka)]. \quad (5.15)$$

Kubli'q pa'njereler ushi'n tap usi'nday jollar menen dispersiya ni'zami'n ali'w mu'mkin:

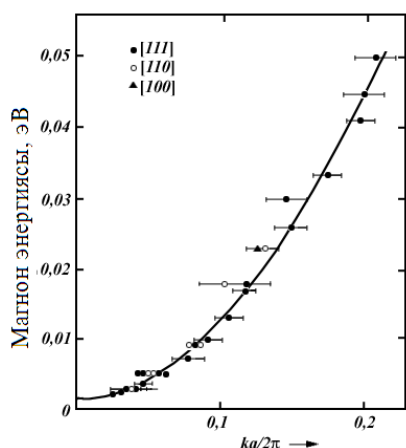
$$\hbar\omega = 2JS \left[z - \sum_{\delta} \cos(K\delta) \right]. \quad (5.16)$$

(5.6)-an'latpa boyi'nsha summalawdi' pa'njerenin' saylap ali'ng'an tu'yinin barli'q jaqi'n qon'si'lar boyi'nsha ori'nlaydi'.

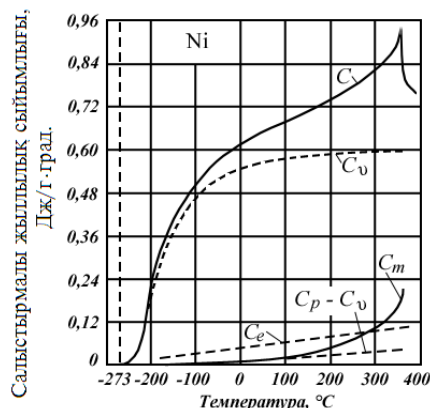
Kishi $\vec{K}$ lar ushi'n barli'q jag'daylar ushi'n $\omega(\vec{K})$ g'a'rezligi uli'wmali'q tu'rge iye:

$$\hbar\omega = 4JS[1 - \cos(Ka)] = 8JS\sin^2(Ka/2) \approx 2JS(Ka)^2. \quad (5.17)$$

Magnonni'n' energiyasi'ni'n' (yamasa jiyiligi $\omega(\vec{K})$ ni'n') tolqi'n vektori' $\vec{K}$ dan g'a'rezligi fononlar ushi'n paydalani'lg'an sxemaday sxema tiykari'nda ani'qlanadi'. 5.9-su'wrette kobalt ushi'n $\omega(\vec{K})$ g'a'rezligi ha'm sali'sti'ri'w maqsetinde (5.17)-an'latpa tiykari'nda esaplang'an na'tiyjeler keltirilgen. Kishi $\vec{K}$ larda magnonni'n' energiyasi'ni'n' $\vec{K}$ vektori'ni'n' bag'i'ti'nan derlik g'a'rezli emes ekenligi ko'rinip tur (bul spin tolqi'ni' teoriyasi'na toli'q sa'ykes keledi).



5.9-su'wret. Kobalt ushi'n $\vec{K}$ vektori'ni'n' [100], [110] ha'm [111] bag'i'tlari'na sa'ykes keliwshi $\omega(\vec{K})$ g'a'rezligi.



5.10-su'wret. Nikeldin' ha'r qi'yli' temperaturaldag'i' mollik ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'na ha'r qi'yli' u'leslerdin' temperaturali'q g'a'rezligi.

Magnonlardi'n' energiyasi' $E(\vec{K})$ shamasin fononlar ushi'n paydalani'lg'an formulalar boyi'nsha esaplaw mu'mkin. Sebebi $E(\vec{K}) = \hbar\omega(\vec{K})$. Magnonlar da bozonlar boli'p tabi'ladi' ha'm sonli'qtan olar ushi'n Boze-Eynshteyn statistikasi' formulalari'n qollanadi'. Biraq bul jerde biz dispersiya ni'zami'ni'n' (3.10)-formula menen emes, al (5.15-5.17) formulalar menen beriletug'i'nli'g'i'n eske ali'wi'mi'z kerek. Soni'n' menen birge magnonlardi'n' bir polarizaciya'g'a iye bolatug'i'nli'g'i' atap o'temiz (fononlar u'sh polarizaciya'g'a, al vakuumdag'i' fotonlar eki polarizaciya'g'a iye bolatug'i'n edi).

Tap sonday sxemalar tiykari'nda magnonlardi'n' kristallardi'n' ishki energiyasi'na ha'm ferromagnetiktin' ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'na qosatug'i'n u'lesin de esaplay alami'z. Bunday esaplawlar to'mengi temperaturalarda qatti' denelerdin' ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'na magnitlik

u'lestin' temperatura T ni'n' $3/2$ -da'rejesine (yag'ni'y $T^{3/2}$ ge) proporcional bolatug'i'nli'g'i'n ko'rsetedi. Bul eksperimentte ali'ng'an na'tiyjelerge toli'q sa'ykes keledi.

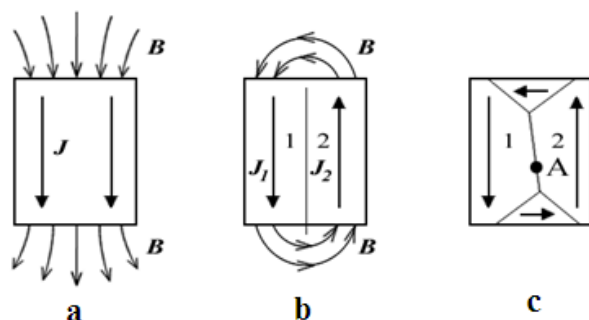
Shama menen tap usi'nday sxema tiykari'nda to'mengi temperaturalar dag'i' $J(T)$ ha'm $\Delta J(T)$ shamalari'n da esaplaw mu'mkin. Bunday jag'daylarda ha'r bir magnonni'n ferromagnetik tin' magnit momentin birdey shamag'a kishireytetug'i'nli'g'i'n esapqa aladi'. Na'tiyjede $\Delta J(T)$ shamasi' berilgen temperaturada ferromagnetik tin' bir birlik ko'lemindegi magnonlardi'n' uli'wmali'q sani'na proporcional boladi'. Al bul sandi' Boze-Eynshteyn tarqali'wi'ni'n' ja'rdeminde an'sat esaplawg'a boladi'. Soni'n' menen birge $\Delta J(T) \approx J_0 C_{3/2} T^{3/2}$ ekenligin de an'sat ko'rsetiwge boladi'. Bul an'latpada $C_{3/2}$ arqali' ferromagnetik tin' strukturasi'na baylani'sli' bolg'an konstanta belgilengen.

T_c temperaturasi' a'tirapi'ndag'i' ferromagnetiklerdin' ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'na qosi'latug'i'n u'les. Ko'plegen ferromagnetiklerde ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'na qosi'latug'i'n magnitlik u'lestin' shamasi' kristalli'q pa'njerenin' terbelisleri ta'repinen qosi'latug'i'n u'lesten de u'lken. Al T_c temperaturasi'ni'n' a'tirapi'nda bolsa ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'na magnitlik u'lestin' shamasi' ji'lli'li'q terbelisleri beretug'i'n u'lestin' shamasi'nan a'dewir u'lken. 5.10-su'wrette nikeldin' ha'r qi'yli' temperaturalar dag'i' mollik ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'na qosi'latug'i'n ha'r qi'yli' u'leslerdin' temperaturadan g'a'rezligi keltirilgen.

Kyuri temperaturasi' jani'nda $C_V(T)$ shamasi'ni'n' temperaturadan g'a'rezligi T_c temperaturasi'ni'n' jani'nda «tiske» iye ekenligi ko'rinip tur. Usi'nday g'a'rezlik tiykari'nda eksperimentte T_c ni'n' ma'nisi ani'qlanadi'. Fazali'q qurami' belgisiz bolg'an ko'p fazalardan turatug'i'n sistemalardi' izertlegende bul usi'l ju'da' paydali'. Sebebi eksperimentte ani'qlang'an T_c ni'n' ma'nisi boyi'nsha quymalardi'n' fazali'q qurami' haqqi'ndag'i' mag'li'wmatlardi' ali'wg'a boladi'. Soni'n' menen birge bul usi'ldi' antiferromagnetiklerdi izertlew ushi'n da paydalani'w mu'mkin.

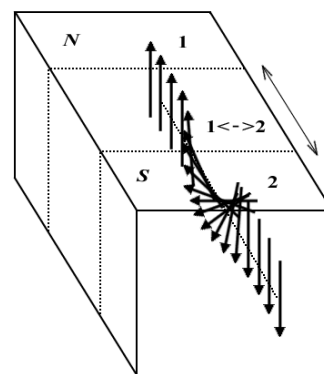
Domenler, qayta magnitleniw mexanizmleri ha'm magnitlik qa'siyetler

Joqari'da qarap o'tilgen magnit momentlerinin' jaylasi'wlari'ni'n' pu'tin kristal boyi'nsha toli'q tarqali'wi' ju'da' siyrek ushi'rasadi'. Kristallarda ko'pshilik jag'daylarda domenler dep atalatug'i'n oblastlardi'n' ishinde birdey bag'i'tqa iye bolg'an magnit momentleri jaylasadi'. Domenlerdin' si'zi'qli' o'lshemleri mikrometrlerden artpaydi'. Kristaldi'n' o'zi ko'p sandag'i' domenlerden turadi'. Al qon'si'las domenlerdegi $\vec{J}$ vektori'ni'n' bag'i'tlari'ni'n' birdey boli'wi' sha'rt emes. Domenlerdin' payda boli'wi' kristaldi'n' mu'mkin bolg'ani'nsha kishi erkin energiyag'a iye boli'wg'a umti'li'wi'ni'n' na'tiyjesi boli'p tabi'ladi'. Eger kristal tek bir domennen turatug'i'n bolsa, onda kristaldi'n' si'rti'nda a'dewir ku'shli magnit maydani' payda bolg'an bolar edi (5.11-a su'wret). Usi' maydan menen shamasi' $B^2/2\mu\mu_0$ ge ten' magnit maydani'ni'n' energiyasi'ni'n' ti'g'i'zli'g'i' ha'm a'dewir u'lken ma'niske iye magnit maydani'ni'n' energiyasi' payda bolg'an bolar edi. Eger kristal shama menen birdey eki domenge iye bolsa ha'm bul domenlerdegi $\vec{J}$ shamalari'ni'n' bag'i'ti' qarama-qarsi' bolsa, onda energiyani'n' ma'nisi a'dewir kemeyedi (5.11-b su'wret). To'rt domen bar bolg'an jag'dayda energiyani'n' ma'nisi onnan da kishireyedi (5.11-su'wret). Solay etip magnit maydani'ni'n' energiyasi'n kishireytiw ko'z-qarasi'nda kristaldi'n' domenlerge bo'liniwi uti'mli' process boli'p tabi'ladi'. Na'tiyjede $\vec{B}$ vektori'ni'n' ku'sh si'zi'qlari' kristaldi'n' ishinde «tuyi'qlanadi'».



5.11-su'wret.

Ferromagnetiktin' domenlerge bo'liniwinin' sxemasi'.



5.12-su'wret. Domenler arasi'ndag'i'

diywal jani'ndag'i' magnit momentlarining tarqali'wi'ni'n' sxemasi'.

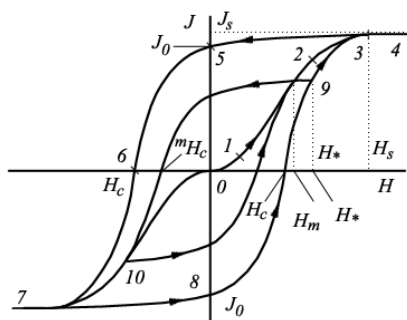
Qon'si'las domenler arasi'ndag'i' shegara domenlik diywaladi' payda etedi. Oni'n' qali'n'li'g'i' bir neshe atomlar arasi'ndag'i' qashi'qli'qqa ten'. Usi'nday arali'qti'n' ishinde magnit momentinin' bag'i'ti' toli'g'i' menen o'zgeredi (5.12-su'wret). Magnit momentinin' bag'i'ti'ni'n' usi'nday boli'p o'zgeriwinin' qosi'msha energiya menen baylani'sli' bolatug'i'nli'g'i' ani'q. Bunday energiya magnitlik anizotropiya energiyasi' menen de, domenlik diywal jani'ndag'i' da'l parallel emes magnit momentlarining ta'sirlesiwleri menen de baylani'sli'. Magnit anizotropiyasi' energiyasi'n minimumg'a ali'p keliwge ti'ri'si'w domenlik diywaladi'n' qali'n'li'g'i'ni'n' shamasin' minimumg'a (1 atomlar arasi'ndag'i' qashi'qli'qqa) ali'p keliwdi talap etedi. Sebebi oni'n' qali'n'li'g'i' u'lkeygende jen'il magnitleniw bag'i'ti'nda bag'i'tlanbag'an magnit momentlarining sani' da o'sedi. Biraq usi'ni'n' menen birge almasi'w ta'sirlesiw energiyasi'ni'n' ma'nisi de u'lkeyedi. Oni'n' ushi'n magnit momentlarining bag'i'tlari'ni'n' 5.12-su'wrette ko'rsetilgende boli'p o'zgeriwi optimalli'q xarakterge iye. Usi' eki u'lestin' minimumi' sha'rtinen domenlik diywaladi'n' qali'n'li'g'i'n esaplaw mu'mkin. [5-7].

Ju'da' mayda domenlerge bo'liniw de energiyali'q ko'z-qarastan uti'mli' emes. Sebebi domenler qanshama mayda bolg'an sayi'n domenlik diywallardi'n' «betlik» energiyasi' da artadi'. Betlik energiya menen makroskopiyali'q magnit maydani' energiyasi' arasi'ndag'i' «konkurenciya» domenlerdin' optimalli'q o'lshemlerin ani'qlaydi'. Ko'pshilik ferromagnitlik kristallardi'g'i' domenlerdin' optimalli'q o'lshemlarining 1 mkm shamasinda ekenligin joqari'da ayti'p o'tken edik. Soni'n' menen birge ju'da' mayda domenlerdin' payda boli'wi'na kristalli'q quri'li'sti'n' defektlarining de ta'sir etetug'i'nli'g'i'n atap o'temiz.

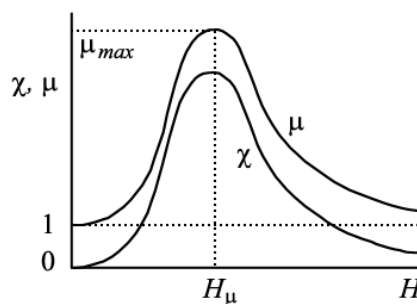
Ko'p ferromagnetiklerdin' kishi magnit maydanlari'ndag'i' qaytadan magnitleniwi domenlerdin' bar ekenligi menen tu'sindiriledi. $\vec{H}$ maydani' menen magnitlengen, $\vec{J}$ vektorlari'ni'n' bag'i'tlari' ha'r qi'yli' bolg'an bir neshe domenlerden turatug'i'n ferromagnetiktin' ushastkasi'n qaraymi'z (5.11-su'wret). A'piwayi'li'q ushi'n domenlik diywaladi'n' qali'n'li'g'i'n kishi ha'm atomlar arasi'ndag'i' qashi'qli'qtay shag'a ten' dep esaplaymi'z. 1 domeni bolsa $\vec{J}$ bag'i'ti' boyi'nsha uti'mli' bag'i'tqa iye (yag'ni'y $\vec{H}$ qa parallel), al 2 domeni bolsa uti'mli' emes bag'i'tlang'an bolsi'n. 2 domenin' 1 domenindey bag'i'tqa iye boli'wi' uti'mli'. Biraq kishi $\vec{H}$ ti'n' ma'nisinde magnit momentlarining barli'g'i'ni'n' birden bag'i'tlari'n o'zgertiwi energiyali'q jaqtan qi'yi'n ha'm statistikali'q jaqtan kishi itimalli'qqa iye. 2 domenin' ha'r bir atomi'ni'n' $\vec{H}$ bag'i'ti'nda bag'i'ti'n o'zgertiwi ushi'n qon'si'las atomlar mu'mkinshilik bermeydi. Olar buri'li'wg'a kesent jasadidi. Biraq 1 ha'm 2 domenler arasi'ndag'i' shegarag'a jaqi'n 2 domendegi A atom ayri'qsha jag'dayda turi'pti'. Oni'n' uti'mli' da, uti'mli' emes te bag'i'tlarg'a iye eki jaqi'n qon'si'si' bar. Sonli'qtan usi' atomni'n' magnit momenti o'zinin' bag'i'ti'n uti'mli' emes bag'i'ttan uti'mli' bag'i'tqa sali'sti'rmali' jen'il o'zgerte aladi' ha'm 1 domenine qosi'ladi'. Usi'ni'n' menen 1 domeni u'lkeyedi, al 2 domeni

kishireyedi. Bunday o'zgerisler domenlik diywalldi'n' atomli'q arali'qqa ten' shamag'a ji'li'sqanli'g'i' menen barabar. Eger domenlik diywalldi'n' qali'n'li'g'i'ni'n' shekli ekenligin esapqa alatug'i'n' bolsaq ta bizin' tallawlarimi'z o'zinin' duri's ekenligin saqlaydi': atomlardi'n' magnit momentlerinin' izbe-iz bag'i'tlari'n' o'zgertiwi ha'm domenlik diywalldi'n' ji'li'si'w effekti ju'zege keledi. Qaytadan magnitleniw din' usi'nday mexanizmin domenlik diywallardi'n' ji'li'wi' menen ju'retug'i'n' qayta magnitleniw dep ataydi'. Bunday qaytadan magnitleniw kishi magnit maydanlari'nda ju'redi.

Ha'r qi'yli' boli'p bag'i'tlang'an domenlerdin' domenlik diywallari' shamalari' ha'r qi'yli' bolg'an maydanlarda ju'zege keledi. Kristalli'q quri'li'sti'n' ha'r qi'yli' defektlari de domenlik diywallardi'n' qozg'ali'slari'na ha'r qi'yli' irkinish jasaydi'. Sonli'qtan ferromagnetiktin' ha'r qi'yli' oblastlari' ha'r qi'yli' $\vec{H}$ maydanlari'nda qaytadan magnitlenedi ha'm ferromagnetiktin' tutasi' menen alg'anda $\vec{J}$ vektori'ni'n' ha'r qi'yli' boli'p o'zgerisi ori'n aladi'. Usi'ni'n' saldari'nan $J(H)$ g'a'rezligi (bunday g'a'rezlikti magnitleniw iymekligi dep ataymi'z) quramali' tu'rge iye boladi' (5.13-su'wret). Sali'sti'rmali' magnitlik qabi'llag'i'shli'q $\chi = \frac{J}{H}$ penen sali'sti'rmali' sin'irgishlik $\mu = B/(\mu_0 H)$ shamalari'ni'n' da $\vec{H}$ maydani' arasi'nda quramali' tu'rdegi baylani's ori'n alg'an (5.14-su'wret).



5.13-su'wret. Ferromagnetiktin' magnitleniw iymekligi ha'm gisterezis ilmegi (toli'q ha'm toli'q emes).



5.14-su'wret. Sali'sti'rmali' magnitlik qabi'llag'i'shli'qti'n' ($\chi = J/H$) ha'm sali'sti'rmali' sin'irgishlik $\mu = B/(\mu_0 H)$ shamasini'n' H tan g'a'rezligi.

Magnitleniw iymekligi 4 tu'rli xarakterli ushastkag'a iye boladi'. 0-1 ushastkasi' ayi'ri'm ori'nlarda defektlarga bekitilgen domenlik diywallardi'n' qayti'mli' qozg'ali'wi' ushastkasi' dep ataladi'. Bunday qozg'ali'slarda domenlik diywallardi'n' maydani' menen energiyasi' artadi'. $\vec{H}$ vektori' kishireygende diywallar o'zlerinin' energiyasi'ni'n' betlik ti'g'i'zli'g'in kishireytiwge ti'ri'si'p o'zlerinin' da'slepki ori'nlari'na qayti'p keledi (sozi'lg'an prujina yamasa membrana si'yaqli'). 1-2 ushastkasi' domenlik diywallardi'n' qayti'mli' emes qozg'ali'slari'na sa'ykes keledi. Bunday qozg'ali'slardi'n' bari'si'nda domenlik diywallar qozg'ali'si'na tosqi'nli'q jasaytug'i'n' irkinishler arqali' o'tedi ha'm sonli'qtan $\vec{H}$ maydani'ni'n' kishireyiwi olardi'n' da'slepki ori'nlari'na qayti'p keliwine ali'p kelmeydi. Sebebi bul jag'dayda da domenlik diywallardi'n' keri bag'i'ttag'i' qozg'ali'si'na tosqi'nli'q jasaytug'i'n' irkinishler arqali' ekinshi ret o'tiwine tuwri' keledi. 2-3 ushastkasi' sa'tli emes bag'i'tlang'an domenlerdin' $\vec{J}$ vektorlari'ni'n' bag'i'tlari'n' o'zgertiwinin' (aylani'wi'ni'n') esabi'nan qaytadan magnitleniw mexanizminin' ju'zege keliwine sa'ykes keledi. Bunday aylani'wlar sali'sti'rmali' ku'shli $\vec{H}$ maydanlari'nda baqlanadi'. Bul jag'dayda magnitleniw vektori'ni'n' aylani'wi' mexanizmi boyi'nsha magnitleniw ju'redi dep esaplaydi'. 3-4 ushastkasi' ferromagentiktin' barli'q magnit momentlerinin' $\vec{H}$ vektori' bag'i'ti'ndag'i' buri'li'wi'na sa'ykes keledi. Og'an sa'ykes keliwshi $|\vec{J}|$ shamasini' toyi'ni'w magnitlengenligi $|\vec{J}| = J_s$, al sol toyi'ni'w magnitlengenlikke sa'ykes keliwshi $\vec{H}$ maydani'ni'n' modulin toyi'ni'w maydani' H_s

dep ataydi'. J_s shamasini'n ma'nisi ferromagnetiktin' ko'lem birligining magnit momentinin en' maksimalli'q ma'nisine ten'.

Endi H ti' H_s den nolga shekem kishireytemiz. Bunday jag'dayda toyi'ni'w kartinasi'na sa'ykes keliwshi magnit momentlerinin' jaylasi'wlari' birinshi jaqi'nlasiw'di' saqlanadi': al is ju'zinde endi domenlerdegi atomlardin' magnit momentleri bir biri menen ta'sirlesiw'din' saldari'nan saqlap turadi'. Sonli'qtan $H = 0$ bolg'an jag'dayda $|\vec{J}|$ bazi' bir shekli ma'niske iye boladi'. Bunday shekli ma'nisti J_r qaldi'q magnitleniw dep ataladi'. Eger H shamasini' H_s ten nolga shekem kemeyse ferromagnetiktin' hali' 5.13-su'wrettegi 5 noqati'na sa'ykes keledi.

Endi H ti' J_s ke qarama-qarsi' bag'i'tta u'lkeytsek qaytadan magnitleniw processi baslanadi'. Maydan $H = H_s$ ma'nisine jetkende J_s din' shamasini' nolga ten' boladi'. H_s maydani'n magnitsizlendiriw maydani' yamasa ko'pshilik jag'daylarda koercitivlik ku'sh dep ataydi'. (5.13-su'wrettegi 6 noqati'). Bunday jag'dayda ferromagnetik u'lgi magnitsizlenedi: eger da'lirek aytqanda ferromagnetiktin' ko'leminde $\vec{J}$ vektorlari' ha'r qi'yli' boli'p bag'i'tlang'an domenler boladi', biraq ferromagnetiktin' barli'q magnit momentlerinin' vektorli'q qosi'ndi'si' nolga ten' boladi'. H ti' bunnan keyin u'lkeytsek u'lgi qarama-qarsi' bag'i'tta qaytadan magnitlenedi. $H = -H_s$ bolg'anda $|\vec{J}| = J_s$ toyi'ni'wi' ori'n aladi' (5.13-su'wrettegi 7 noqati').

Eger H shamasini' $-H_s$ ten $-H_s$ ke shekem u'lkeytsek, onda $J(H)$ g'a'rezliginin' 7-8-4 ushastkalari' ali'nadi'. Na'tiyjede ilmekti eske tu'siretug'i'n g'a'rezlik ali'nadi' ha'm bul g'a'rezlikni gisterezis ilmegi dep ataydi'.

8-4 ushastka boyi'nsha 4 noqati'na jetpey 9 noqati'na shekem qozg'ali'w mu'mkin. 9 noqati'ndag'i' maydandi' H_m arqali' belgileyemiz. 9 noqati'nan H maydandi' H_m shamasini'nan $-H_m$ shamasini'na shekem kishireytemiz. Bunday jag'dayda magnetiktin' hali'n beretug'i'n 9 noqati' 10 noqati'na o'tedi. H shamasini' belgili tu'rde o'zgertiw arqali' principinde gisterezis ilmeginin' ishindegisi qa'legen noqatqa bari'w mu'mkin. H shamasini' H_m shamasini'nan $-H_m$ shamasini'na shekem ciklli'q tu'rde o'zgertsek dara jag'daydag'i' gisterezis ilmegi dep atalatug'i'n gisterezis ilmegi ali'nadi'. Bul ilmektegi maksimalli'q maydan H_m boli'p tabiladi'. Dara jag'daydag'i' gisterezis ilmeginin' ushlari' magnitleniw iymekliginin' boyi'nda jaylasadi'.

Ha'r qi'yli' du'zilislarda $H_m = H_\mu$ ten'ligi ori'nlanatug'i'n qayta magnitleniw'din' dara ciklleri qollani'ladi'. Bul ten'likte H_μ arqali' maksimalli'q sin'irgishliq μ maydani' belgilengen. μ din' shamasini' maksimalli'q bolg'anda B maydani'n ku'sheytiwde ferromagnetik effektivli tu'rde paydalani'ladi'.

$H - B$ koordinatalari'nda si'zi'lg'an gisterezis ilmeginin' maydani'ni'n ferromagnetiktin' ko'lem birligin ciklli'q qayta magnitlew ushi'n jumsalg'an energiyag'a ten' ekenligin ko'rsetiwge boladi'.

Magnit materiallar. Ha'r qanday texnikali'q maqsetler ushi'n gisterezis ilmegi ha'r qi'yli' bolg'an ferromagnit materiallar za'ru'rli. Solardi'n' ishindegisi en' a'hmiyetlilari koercitivlik ku'shinin' shamasini' 10^{-1} A/m shamasini'nan 10^6 A/m shamasini'na shekemgi materiallar boli'p tabiladi'. A'melde H_C ni'n ma'nisi ju'da' kishi bolg'an (magnitlik jaqtan jumsaq materiallar) ha'm ayri'qsha u'lken bolg'an (magnitlik jaqtan qatti' materiallar) qollani'ladi'..

Magnitlik jaqtan jumsaq materiallar kishi magnit maydanlari'nda qaytadan magnitlenetug'i'n du'zilislarda qollani'ladi'. Olar: magnit jazi'wlardi' oqi'yug'i'n magnit maydani'ni'n datshiklari, transformatorlardin' serdeshniklari ha'm basqalar. Bunday maqsetlerde μ shamasini' u'lken, al H_C tin' shamasini' ja'ne gisterezis ilmeginin' maydani' kishi materiallar kerek. Bunday materiallar ushi'n qaytadan magnitlegende domenlik diwallardi'n' qozg'ali'wi'n maksimal tu'rde jen'illestiriw, magnitlik anizotropiya menen magnitostrikiyani'n ta'sirin kishireytiw talap etiledi. Buni'n ushi'n quymalardag'i' domenlik diwallardi'n' qozg'ali'si'na kesent jasaytug'i'n defektlerdin' sani'n azayti'w,

magnitlik anizotropiyasi' menen magnitostrikiyasi' a'zzi quymalardi' paydalani'w kerek. O'zgermeli magnit maydanlari'nda magnitlik jaqtan jumsaq materiallardi' qollang'anda magnetiktin' elektr tog'i'na qarsi'li'g'i'ni'n' u'lken boli'wi'n ta'miyinlew lazi'm. Tap usi'nday talaplarga ha'zirgi zamanda ken' tu'rde paydalani'p ati'rg'an materiallar juwap beredi. Olar haqqi'ndag'i' mag'li'wmatlar to'mendegi kestdede berilgen:

Magnitlik jumsaq materiallar ha'm olardi'n' magnitlik qa'siyetleri

Materiallar topari'	$H_C, A/m$	B_S, Tl	$\mu_{max} \cdot 10^3$
Taza temir	6-70	2,15	7-60
$Fe - Si$	30-50	1,9-2,1	3-7
$Fe - Ni$	0,2-4	0,5-0,8	100-1000
Amorf quymalar	0,2-0,4	0,9-1,2	400-600
Magnitlik jumsaq ferritler	15-180	0,4	0,3-4

Da'slepki waqitlari' magnitlik jaqtan jumsaq material retinde mu'mkinshiligi bolg'ani'nsha jaqsi' tazalang'an temirdi paydalandi'. Temirdin' tazali'g'i' defektlerdin' koncentrasiyasi'ni'n' kemeyiwine ali'p keldi. Bunnan keyin kristallitlerdin' o'lshemlerin u'lkeytiwge ali'p keletug'i'n qosi'mtalardi' tapti' (kristallitlerdin' u'lkeyiwi defektlerdin' koncentrasiyalari'ni'n' a'dewir kishireyiwine ali'p keledi). Kristallitlerdin' u'lkeyiwinin' bari'si'nda buyi'mni'n' berilgen bag'i'tlari'nda kristaldi'n' jen'il magnitleniw bag'i'ti'n qoyi'w mu'mkinshiligin berdi. Usi'nday jollar menen transformatorli'q polat dep atalatug'i'n polatlardi' aladi'. Oni'n' qurami' tiykari'nan $Fe - Si$ quymasi'nan turadi'. Keyinirek $Fe - Ti$ tiykari'ndag'i' quramali' quramdag'i' magnitlik anizotropiya menen magnitostrikiyani'n' mu'mkin bolg'an minimalli'q parametrlarine iye quymalardi' saylap aldi'. Bul μ shamasini'n' bunnan da bi'lay u'lkeyiwine ali'p keldi (10^6 ha'm onnan da ko'p ese). Kelesi qa'dem amorf ha'm nanokristalli'q (kristalli'q da'neshelerinin' o'lshemleri bir neshe atomli'q tegislikler arasi'ndag'i' qashi'qli'qqa ten' polikristallar) materiallardi' paydalani'w boli'p tabi'ldi'. Bunday materiallarda magnitlik anizotropiya joqari'da atlari' atalg'an materiallardi'n' magnitlik anizotropiyasi'nan da kishi. Usi'ni'n' menen bir qatarda bunday materiallardi'n' sali'sti'rmali' qarsi'li'g'i' a'dewir u'lken. Sebebi bunday materiallardag'i' atomlardi'n' ta'rtipsiz jaylasilari' elektronlardi'n' bag'i'tlang'an qozg'ali'slari'na kesent jasadidi'.

Joqari'da atap o'tilgen magnitlik jaqtan jumsaq materiallardi'n' barli'g'i' da sali'sti'rmali' kishi magnitlik qarsi'li'qqa iye. Bul jag'day qayta magnitleniw processlerinde parazitlik u'lken Fuko toqlari'ni'n' payda boli'wi'na ali'p keledi. Sonli'qtan tez-tezden qaytadan magnitlenetug'i'n buyi'mlardag'i' magnitlik jaqtan jumsaq bolg'an materiallardi' juqa bir birinen izolyaciyalang'an plastinka tu'rinde sog'adi'. Magnitlik jaqtan jumsaq ferritler bolsa ju'da' u'lken sali'sti'rmali' qarsi'li'qqa iye ha'm sonli'qtan olardi' monolit presslengen detallar ali'w ushi'n za'ru'rli bolg'an magnitlik jaqtan jumsaq materiallar si'pati'nda texnikada ken'nen paydalanadi'. Olardi'n' en' basli' kemshiliklerin: μ , B_r , B_S shamarlari' kishi, magnitlik jaqtan jumsaq metal materiallarga sali'sti'rg'anda a'dewir mort.

Magnitlik jaqtan qatti' materiallar u'lken H_C shamasina iye boli'w menen bir qatarda to'mendegidey u'lken shamalarga iye boli'w o'zgesheliklerine iye: 1) berilgen magnittin' B vektori'ni'n' ag'i'si'n ani'qlaytug'i'n B_r ha'm 2) $(BM)_m$ ko'beymesinin' maksimal'g'i'. Bunday shama H maydani'nda jaylasqan bir birlik ko'lemge iye magnittin' maksimal'q aylanbali' momentin juwi'q tu'rde ani'qlaydi'. Joqari'da atlari' atalg'an parametrlerdin' stabiligi menen olardi'n' qanaatlandi'rarli'qtay bekkemligi menen plastikligine iye boli'w maqsetke muwapi'q keledi.

Ken' tarqalg'an magnitlik jaqtan qatti' materiallar ha'm olardi'n' magnitlik qa'siyetleri to'mendegi kestdede berilgen:

Materiallar	H_c , kA/m	B_r , Tl	$(BH)_m$, kDj/m ³
<i>Fe – Nd – B</i>	1000-1200	1,2-1,4	600-800
<i>Sm – Co</i>	1200-1500	1,0-1,1	400-600
<i>Fe – Co – Ni – Al</i>	50-120	1,0-1,2	40-60
<i>Fe – Cr – Co</i>	40-70	1,3-1,6	40-60
Ferritler	30-100	0,3-0,5	10-15

Paydali'nlg'an a'debiyatlar dizimi

1. Zaynobidinov S., Teshaboev A.T. Yarimwtkazgishlar fizikasi. T. «Wqituvshi». 1999.
 2. Teshaboev A., Zaynobiddinov S., Ermatov Sh. Qattiq jism fizikasi. T. «Moliya». 2001.
 3. Nazirov E.N., Teshaboev A.T., Nazirov D.E. Yarimwtkazgish terminlari. WzMU. 2003.
 4. Nazirov E.N., Nazirov D.E., Teshaboyev A.T. Yarimo'tkazgichlar fizikasi lug'ati. T. «Universitet». 2008.
 5. Habibullaev P.Q., Nazirov E.N., Otajonov Sh.O., Nazirov D.E. Fizika izohli lug'ati. T. «Wzbekiston milliy enciklopediyasi». 2002.
 6. Yunusov M.S., Vlasov S.I., Nazirov D.E., Tolipov D.O. Elektron asboblar. T. WzMU. 2003.
 7. Mamatkarimov O.O., Vlasov S.I., Nazirov D.E. «Yarimwtkazgish materiallar va asboblar fizikasi' praktikumi». T. WzMU. 2007.
 8. Teshaboev A., Zaynobiddinov S., Musaev E.A. Yarimwtkazgishlar va yarimwtkazgishli asboblar texnologiyasi. T. «Wzbekiston». 2005.
 9. Shalimova K.V. Fizika poluprovodnikov. M. Energiya. 1985.
 10. Fistul V.I. Vvedenie v fiziku poluprovodnikov. M. Vi'sshaya shkola. 1984.
 11. Bonsh-Bruevish V.L., Kalashnikov V.L. Fizika poluprovodnikov. M. Nauka. 1990.
- <http://window.edu.ru>.
<http://www.ziyonet.uz>.

Magistrantlardi'n' bilimin qadag'alaw ushi'n du'zilgen testlardin' variantlari'

1. Kristallar ushi'n to'mendegidey simmetriya ko'sherinin' boli'wi' mu'mkin emes.
A) 1-ta'rtpi, B) 2-ta'rtpi, V) 5-ta'rtpi, g) 6-ta'rtpi.
2. Translyaciyali'q gruppani' beriw ushi'n nelerdi ko'rsetiw kerek?
A) simmetriya ko'sherlerinin' sani'n, B) simmetriya tegisliklerin, V) translyaciyani'n' bazislik vektorlari'.
- 3) Ko'rsetilgen simmetriya elementlerinin' qaysi'si' simmetriyani'n' noqatli'q gruppasi'na kiredi?
A) simmetriya ko'sherleri, B) inversiya ko'sheri, V) translyaciya vektorlari', G) simmetriya tegislikleri.
- 4) Bazis mi'nani' ta'riypleydi:
A) simmetriyani'n' noqatli'q gruppasi'n, B) translyaciyali'q gruppani', V) noqatli'q ha'm translyaciyali'q gruppalardi'.
- 5) Qaptalda oraylsqan pa'njereni ta'riyplew ushi'n qosi'msha bolg'an qansha translyaciyalardi' beriw kerek?
A) hesh birewinin' keregi joq, B) u'sh, V) eki.
- 6) Translyaciya vektori' ha'r qi'yli' atomlardi' tutasti'ra ala ma?
A) Tutasti'radi', B) Tutasti'rmaydi'.
- 7) Elementar quti'ni' strukturali'q birliklardin' sani' ta'riypley aladi':

- A) Qa'legen, B) A'piwayi' zatlardi'n', V) Ximiyali'q birikpelerdin'.
8. To'mende keltirilgen singoniyalardi'n' qaysi'si' ortogonalli'q emes:
A) kubli'q, B) trigonalli'q, V) tetragonalli'q, G) geksagonalli'q.
9. Tegisliktin' Miller indeksleri mi'nalardi' ani'qlaydi':
A) simmetriyasi' boyi'nsha ekvivalent bolg'an tegisliklerdin' semeystvosi'n, B) bir birine parallel bolg'an tegisliklerdin' semeystvosi'n, V) ayqi'n tegislikti.
10. To'mende keltirilgen tegisliklerdin' qaysi'si' koordinatali'q ko'sherlerdin' birine parallel?
A) (111), B) (121), V) (100), G(110).
11. Keltirilgen defektlerdin' qaysi'lari' noqatli'q defektler qatari'na kiredi?
a) Shottki defekti, b) shetlik dislokaciya, v) dvoynik, v) tu'yinler arasi'ndag'i' atom.
12. Frenkel boyi'nsha defekt, bul
a) tu'yinler arasi'ndag'i' bo'lekshe (atom) ha'm vakansiya, b) vakansiya.
13. Dispersiyali'q qatnaslar bir biri menen mi'nalardi' baylani'sti'radi':
a) tolqi'nni'n' tarali'q tezligi menen fazasi'n, b) jiyilikti ha'm fazali'q tezlikti, v) jiyilikti ha'm tolqi'n uzi'nli'g'i'n.
14. Kristallardag'i' atomlardi'n' terbelislerinin' spektrinin' diskretliliginin' sebebi mi'nadan ibarat:
a) atomlardi'n' qozg'ali'si'ni'n' kvantli'q xarakteri, b) translyაციyalı'q simmetriyani'n' bar ekenligi, v) atomlardi'n' massasi'ni'n' shekli ekenligi.
15. Eynshteyn teoriyasi' mi'nani' esapqa almaydi':
a) bo'lekshelerdin' terbelmeli qozg'ali'si'n, b) ha'r qi'yli' sorttag'i' bo'lekshelerdin' bar ekenligin, v) terbelisler jiyiliginin' spektrinin' bar ekenligin.
16. Debay temperaturasi'nan kishi temperaturalarda ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'n esaplaw ushi'n mi'nani' esapqa ali'w kerek:
a) Eynshteyn teoriyasi'n, b) Debay teoriyasi'n, v) Dyulong-Pti ni'zami'n.
17. P tipidegi tetragonalli'q singoniyag'a iye kristallardag'i' qaysi' bag'i'tlardag'i' jiyilikler spektri birdey boladi?
a) [100], [010], b) [100], [010], [001], v) [100], [001], g) [010], [110].
- 18). Fonon degenimiz:
a) jaqti'li'q energiyasi'ni'n' kvanti', b) ji'lli'li'q qozg'ali'si'ni'n' energiyasi'ni'n' kvanti', v) elektronni'n' energiyasi'ni'n' kvanti'.
- 19). Noqatli'q defektler payda bolg'anda entropiya to'mendegilerge baylani'sli' o'zgeredi:
a) ji'lli'li'q terbelislerinin' amplitudasi'ni'n' u'lkeyiwinen, b) vakansiyalardi'n' payda boli'wi'ni'n' sebebini, v) tu'yinler arasi'ndag'i' atomlardi'n' payda boli'wi'ni'n' saldari'nan.
- 20) Shottki defektleri payda bolatug'i'n a'piwayi' kristall sistemasini'n' termodinamikali'q itimalli'g'i' mi'nadan ibarat:
a) kristaldi'n' bo'lekshelerinen belgili bir sandag'i' vakansiyalardi' ali'w usi'li'nan,
b) kristaldi'n' bo'lekshelerinen belgili bir sandag'i' tu'yinler arasi'nda jaylasqan bo'lekshelerdi ali'w usi'li'nan,
v) kristaldi'n' bo'lekshelerinen belgili bir sandag'i' tu'yinler arasi'nda jaylasqan bo'lekshelerdi ha'm vakansiyalardi' ali'w usi'li'nan.
21. To'mendegi jag'daylarda kvantli'q-mexanikali'q ta'riyiplew qollani'ladi':
a) bo'lekshenin' tolqi'n uzi'nli'g'i' usi' bo'lekshe qozg'alatug'i'n oblastti'n' o'lshemlerinen a'dewir u'lken bolg'anda,
b) bo'lekshenin' tolqi'n uzi'nli'g'i' usi' bo'lekshe qozg'alatug'i'n oblastti'n' o'lshemleri menen barabar bolg'anda,
22. Normirovkalang'an tolqi'n funkciyasi'ni'n' og'an kompleksli-tu'yinles bolg'an tolqi'n funkciyasi' menen ko'beymesi mi'nani' ani'qlaydi':
a) bo'leksheni usi' noqatta tabi'wdi'n' itimalli'g'i'ni'n' ti'g'i'zli'g'i'n,

b) bo'leksheni usi' noqatta tabi'wdi'n' itimalli'g'i'n,

v) bo'lekshenin' koordinatalari'n.

23. Azg'i'ni'n' da'rejesi degenimiz

a) birdey tolqi'n funkciyalari'na ha'm ha'r qi'yli' energiyalarg'a iye energiyali'q hallardi'n' sani'.

b) birdey energiyag'a, biraq ha'r qi'yli' tolqi'nli'q funkciyag'a iye energiyali'q hallardi'n' sani',

v) birdey eenrgiyag'a ha'm birdey tolqi'n funkciyalari' iye energiyali'q hallardi'n' sani'.

24. Energiya qa'ddilerinin' kvantlang'anli'g'i' to'mendegi jag'daydi'n' na'tiyjesi boli'p tabi'ladi':

a) elektronni'n' tolqi'nli'q ta'biyati' menen oni'n' qozg'alatug'i'n oblasti'ni'n' sheklengenliginen,

b) elektronni'n' tolqi'nli'q ta'biyati'ni'n',

v) elektron qozg'alatug'i'n oblastti'n' sheklengenliginin'.

25. Fermi qa'ddinin' energiyasi'n mi'nalardan g'a'rezli:

a) tek elektronlardi'n' koncentraciyasi'nan,

b) tek temperaturadan,

v) koncentraciyadan ha'm temperaturadan.

26. Elektron gazi Fermi-Dirak statistikasi'na bag'i'nadi', eger

a) Fermi qa'ddine sa'ykes keliwshi energiya kT dan a'dewir kishi bolsa,

b) Fermi qa'ddine sa'ykes keliwshi energiya kT dan a'dewir u'lken bolsa.

27. Energiyalig' hallardi'n' energiyalar boyi'nsha bo'listiriliw funkciyasi' degenimiz:

a) energiyalar ken'isligindagi hallar ti'g'i'zli'g'i',

b) energiyalar intervali' dE intervali'ndagi' energiyali'q hallardi'n' sani',

v) E menen $E+dE$ arasi'ndagi' intervalda jatatug'i'n energiyali'q hallardi'n' sani'.

28. Eger $F(E)$ elektronlardi'n' energiyalar boyi'nsha bo'listiriliw funkciyasi' boli'p

tabi'latug'i'n bolsa, onda $\int_0^{\varepsilon} F(E)EdE$ integrali' mi'nani' beredi:

a) 0 den ε ge shekemgi energiyag'a iye elektronlardi'n' koncentraciyasi'n,

b) 0 den ε ge shekemgi energiyag'a iye elektronlardi'n' ortasha energiyasi'n,

v) 0 den ε ge shekemgi energiyag'a iye elektronlardi'n' toli'q sani'n.

29. A'piwayi' pa'njerede elektr o'tkizgishlik birdey bolatug'i'n indekslerdin' kombinaciyasi'n ko'rsetin'iz:

a) [111], [100], [110],

v) [111], [100], [101],

g) [001], [100], [010],

d) [110], [101], [011].

30. En' to'mengi temperaturalarda metaldi'n' ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'na tiykarg'i' u'lesti beredi:

a) fononli'q qurawshi',

b) elektronli'q qurawshi'.

31. Elektronni'n' effektivlik massasi' to'mendegidey bola almaydi':

A) on' ma'niske iye,

B) teris ma'niske iye,

V) nolge ten',

G) sheksiz u'lken.

32. Yari'm o'tkizgishtin' o'tkizgishligine qatnasadi':

A) elektronlar, B) tesikler, V) ionlasqan donolar, G) ionlasti'ri'lg'an akseptorlar.

33. Kremniy ushi'n u'shinshi gruppani'n' elementleri:

A) donolar, B) akseptorlar boli'p tabi'ladi'.

34. Menshikli germaniyde

A) elektronli'q,

B) tesiklik o'tkizgishlik u'lkenirek boladi'.

35. Yari'm o'tkizgishte erkin elektronlar menen tesiklerdin' koncentrasiyalari' bir birine ten' ekenligi belgili. Bul jag'day yari'm o'tkizgishti menshikli dep esaplawg'a tiykar bola ala ma?

A) awa, B) joq.

36. Dielektrite ha'm menshikli yari'm o'tkizgishte zonali'q struktura bir birinen

A) qadag'an etilgen zonada qosi'mta qa'ddilerdin' bar boli'wi' menen,

B) qadag'an etilgen zonani'n' ken'ligi menen ayri'ladi'.

37. To'mendegi yari'm o'tkizgishlerdin' qayssi' 300 K temperaturada en' u'lken o'tkizgishlikke iye boladi'?

A) kremniy, B) germaniy, V) galliy arsenidi.

38. Kremniydin' eki u'lgisi bar. Olardi'n' biri bor menen, al ekinshisi alyuminiy menen legirlengen. Kosi'mtalardi'n' koncentrasiyalari' birdey. U'lgilerdin' qaysi'si' an' joqari' tawsi'li'w temperaturasi'na iye?

A) bor menen legirlengen, B) alyuminiy menen degirlengen.

39. Qadag'an etilgen zoni'ni'n' eni kristallografiyalı'q bag'i'ttan g'a'rezli me?

A) awa, B) yaq.

30. Azg'i'nbag'an yari'm o'tkizgishtegi elektron-tesiklik gaz

A) Maksvell-Bolcmanni'n',

B) Fermi-Dirakti'n'

V) Boze-Eynshteynnin' statistikasi'na bag'i'nadi'.

41. Asa o'tkizgishlerdin' xarakteristikaları:

A) kritikali'q toq penen temperatura, B) kritikali'q toq penen magnit maydani'ni'n' kernewligi, v) kritikali'q toq, temperatura ha'm magnit maydani'ni'n' kernewligi.

42. Birinshi ha'm ekinshi tu'r asa o'tkizgishler mi'na o'zgeshelikleri menen bir birinen ayri'ladi': A) magnit maydani'ndag'i' ko'rsetetug'i'n qa'siyeti boyi'nsha,

B) o'zgermeli elektr maydani'nda ko'rsetetug'i'n qa'siyeti boyi'nsha,

V) elektr ha'm magnit maydani'nda ko'rsetetug'i'n qa'siyetileri boyi'nsha.

43. Kuper jubi' degenimiz:

A) bir biri menen baylani'sqan eki fonon,

B) bir biri menen baylani'sqan eki magnon,

V) bir biri menen baylani'sqan eki elektron.

44. O'zinin' magnitlik qa'siyeti boyi'nsha asa o'tkizgishler

A) antiferromagnetikler, B) ferritler, G) Paramagnetikler, G) diamagnetikler qatari'na kiredi.

45. Abrikosov quyi'ni' mi'naday asa o'tkizgishlerde ori'n aladi': A) 1-tu'r asa o'tkizgishlerde, B) 2-tu'r asa o'tkizgishlerde, v) 1- ha'm 2-tu'r asa o'tkizgishlerde.

46. Yari'm o'tkizgishlerdin' o'tkizgishliginin' qosi'mta o'tkizgishlik oblasti'ndag'i' temperaturali'q g'a'rezligi tiykari'nan to'mendegiler boyi'nsha ani'qlanadi':

A) qadag'an etilgen zonani'n' qali'n'li'g'i' menen, B) qosi'mtani'n' ionizaciya energiyasi' menen, V) zaryad tasi'wshi'larli'n' shashi'raw mexanizmi menen.

47. Temperaturag'a baylani'sli' o'tkizgishliktin' to'menlewi oblasti'ndag'i' zaryadlardi'n' shashi'raw mexanizmi mi'nalar boli'p tabi'ladi':

A) ionlasqan qosi'mtalardag'i' shashi'raw, B) fononlardag'i' shashi'raw.

48. Metallardi'n' o'tkizgishligi mi'nadan g'a'rezli:

A) elektronni'n' effektivlik massasi'nan, B) elektronlardi'n' bir biri menen soqli'g'i'si'wi'nan, V) elektronlardi'n' pa'njere bo'leksheleri menen soqli'g'i'si'w jiyiligi menen.

49. Temperaturani'n' joqari'lawi' menen o'tkizgishlik to'menleydi:

- A) menshikli o'tkizgishlik oblasti'ndag'i' yari'm o'tkizgishlerde,
B) dielektriklerde, V) metallarda.
50. Menshikli o'tkizgishlik oblasti'nda o'tkizgishlikdin' temperaturali'q g'a'rezligi tiykari'nan mi'nani'n' menen ani'qlanadi':
A) qadag'an etilgen zonani'n' ken'ligi menen, B) qosi'mtani'n' ionlasi'w energiyasi' menen, V) zaryad tasi'wshi'lardi'n' shashi'raw mexanizmi menen.
51. Prlyarizaciyanin' qaysi' tu'ri en' a'stelik penen ju'redi?
A) elektronli'q, B) ionli'q, V) dipollik.
52. Polyarizaciyanin' qaysi' tu'ri temperaturadan en' ku'shli g'a'rezli?
A) elektronli'q, B) ionli'q, v) dipollik.
53. Dielektriklerdin' o'zgermeli maydandag'i' qi'zi'wi' mi'nani'n' menen baylani'sli':
A) o'tkizgishlik tog'i'ni'n' o'tiwi menen, B) polyarizaciyanin' a'stelik penen o'tetug'i'n tu'rlerinin' bar ekenligi menen.
54. Diamagnitlik qa'siyetke barli'q zatlar iye me?
A) awa, B) yaq.
55. Ferrittin' magnitlik kristalli'q strukturasi' mi'naday strukturalardan turadi':
A) ferromagnetik penen antiferromagnetiktin', B) ferromagnetik penen paramagnetiktin' G) paramagnetik penen diamagnetiktin'.
56. Magnon degenimiz
A) jaqti'li'q energiyasi'ni'n' kvanti', B) pa'njerenin' ji'lli'li'q energiyasi'ni'n' kvanti', V) spinlik tolqi'nni'n' energiyasi'ni'n' kvanti'.
57. Ferromagnetizm tiykari'nan mi'nag'a baylani'sli':
A) valentli elektronlaprdi'n' orbitali'q momentleri menen B) zonadag'i' elektronlardi'n' spinlik momentleri menen, V) zonadag'i' elektronlardi'n' orbitali'q ha'm spinlik momentleri menen.
58. Zatlardi'n' barli'g'i' da magnitlik qa'siyetlerge iye me?
A) awa, B) paramagnetiklerden basqalari'ni'n' barli'g'i', G) ferritler menen ferromagnetiklerden basqalari'ni'n' barli'g'i'.
59. Spontanli'q magnitlengenlikdin' joq ekenligi zattyan' ferromagnetik emes ekenliginin' da'lili bola ala ma?
A) awa, B) joq.
60. To'mendegi klasslardi'n' kaysi'si' domenlik strukturag'a iye bola aladi'?
A) ferrimagnetikler, B) paramagnetikler, V) diamagnetikler, G) segnetoelektrler.
61. Yari'm o'tkizgishtin' menshikli juti'w jolag'i'ni'n' ki'zi'l shegarasi' mi'nadan g'a'rezli:
A) qadag'an etilgen zonani'n' ken'liginen, B) donorldi'n' ionizaciya energiyasi'nan, V) elektronlardi'n' koncentraciyasi'nan.
62. Spekrdegi qosi'mtali'q juti'w jolag'i'ni'n' iyelegen orni' mi'nani' ani'qlawg'a mu'mkinshilik beredi:
A) qadag'an etilgen zonani'n' qali'n'li'g'i'n, B) donorlar menen akseptorlardi'n' ionizaciya energiyasi'n, V) Fermi qa'ddinin' iyelegen orni'n.
63. Rekombinaciyanin' mexanizmlerinin' qaysi'si' en' itimal:
A) zonalar arali'q, B) kombinaciya'li'q tutki'shlardi'n' qatnasi'wi' menen ju'zege keletug'i'n rekombinaciya.
64. Zaryad tasi'wshi'ni'n' rekombinaciya'nda bo'linip shi'g'atug'i'n energiya qadag'an etilgen zoni'nan' qali'n'li'g'i'n o'zgerte ala ma? A) awa, B) joq.
65. Eksiton degenimiz
A) o'tkizgishlik zonasi'ndag'i' elektron-tesik jubi', B) valentli zonadag'i' elektron-tesik jubi'.
66. Eksitonli'q juti'w jolag'i' mi'na oblastta jatadi':
A) menshikli juti'w jolag'i' oblasti'nda, B) qosi'mtali' juti'w jolag'i' oblasti'nda.
67. Elektronli'q juti'w mi'na jag'dayda a'hmiyetli

- A) metallardi'n' B) yari'm o'tkizgishlardan', V) dielektriklardan',
 68. Yari'm o'tkizgishlar ushi'n mi'na o'tiwler foto aktivli boli'p tabi'ladi':
 A) zona-zona B) qosi'mta qa'ddi – zona V) eki qosi'mtali'q qa'ddi arasi'ndag'i'.
 69. Ionli'q kristallardi'n' lyuminescenciya'si' mi'na jag'daylar menen baylani'sli':
 A) zaryad tasi'wshi'lardi'n' rekombinaciya energiyasi' menen, B) qosi'mta atomlardi'n' qozi'w energiyasi' menen.
 70. Ren' oraylari' (F-oraylar) mi'naday kristallarda payda boladi':
 A) a'piwayi' zatlardi'n' kristallari'nda, B) binarli'q ximiyali'q birikpelerdin' kristallari'nda, V) u'sh qurawshi'dan turatug'i'n ximiyali'q birikpelerdin'.

"Kondensaciyalang'an ortali'qlar fizikasi'" boyi'nsha juwmaqlawshi' qadag'alaw sorawlari'

1-variant

1. Fizikali'q qa'siyetleri boyi'nsha, soni'n' ishinde elektr o'tkizgishlikdin' shamasi' ha'm xarakteri boyi'nsha qatti' denelerdin' klassifikaciya'si'.
2. Qatti' denelerdin' ji'lli'li'q qa'siyetleri. Qatti' denelerdin' ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'. Dyulong ha'm Pti ni'zami'.
3. Qatti' denelerdegi atomlar ha'm molekulalar arasi'ndag'i' baylani'slar. Ionli'q baylani's.
4. Diametri 2 mm bolg'an si'mg'a massasi' 1 kg ju'k ildirilgen. Si'mda payda bolatug'i'n mexanikali'q kernew ani'qlansi'n.
5. Qatti' denelerdi polyarizaciya'li'q mikroskop penen izertlew.

2-variant

1. Qatti' deneler fizikasi'ni'n' kristallografiya, yari'm o'tkizgishlar fizikasi' menen baylani'si'.
2. Kubli'q pa'njereler ushi'n (a'piwayi', qaptaldan oraylasqan ha'm ko'lemde oraylasqan) keru pa'njeri du'ziw ha'm Brillyuen zonalarin' belgilew.
3. Qatti' denelerdegi atomlar ha'm molekulalar arasi'ndag'i' baylani'slar. Kovalentli baylani's (Gomeopolyar baylani's).
4. Diametri 2 sm, uzi'nli'g'i' 60 m bolg'an qorg'asi'n joqarg'i' ushi'nan qozg'almaytug'i'nday qi'li'p bekkemlengen. To'mengi ushi'na 100 kg massali' ju'k ildirilgen. Si'mni'n' to'mengi ushi'ndag'i' mexanikali'q kernew tabi'lsi'n.
5. Qatti' denelerdin' atomli'q-kristalli'q quri'li'si'n izertlew usi'llari'. Rentgenstrukturali'q analiz.

3-variant

1. Kristalli'q ha'm amorf qatti' denelerdin' ha'zirgi zaman ilimi menen texnikasi'ndag'i' a'hmiyeti.
2. Qatti' denelerdegi atomlar ha'm molekulalar arasi'ndag'i' baylani'slar. Ionli' baylani's (Geteropolyar baylani's).
3. Qatti' denelerdin' mexanikali'q qa'siyetleri. Serpimli ha'm elastik deformaciylar.
4. Qatti' denelerdin' atomli'q-kristalli'q quri'li'si'n izertlew usi'llari'. Elektronli'q mikroskopiya ha'm elektronografiya.

5. Diametri 2 sm, uzi'nli'g'i' 60 m bolg'an qorg'asi'n joqarg'i' ushi'nan qozg'almaytug'i'nday qi'li'p bekkemlengen. To'mengi ushi'na 100 kg massali' ju'k ildirilgen. Si'mni'n' joqarg'i' ushi'ndag'i' mexanikali'q kernew tabi'lsi'n.

4-variant

1. Kristalli'q ha'm amorfli'q qatti' deneler. Kristalli'q ha'm amorf denelerdin' bir birinen ayi'rmashi'li'g'i'. Kristalli'q quri'li's.

2. Kristaldi'n' laegrammasi' ha'm epigrammasi' tiykari'nda oni'n' kristallografiyali'q bag'i'tlari'n ani'qlaw.

3. Qatti' denelerdegi atomlar ha'm molekulalar arasi'ndag'i' baylani'slar. Van-Der-Vaals baylani'si'.

4. Qatti' denelerdin' elektrlik o'tkizgishligi. Metallar ha'm Yari'm o'tkizgishler.

5. Diametri 1 mm bolg'an polat si'mni'n' bekkemlik shegarasi' 294 MPa dan artpastan ko'bi menen qansha mug'dardag'i' ju'kke shi'dawi' mu'mkin. Usi' ju'ktin' ta'sirinde si'mni'n' sozi'li'wi' baslang'i'sh uzi'nli'g'i'ni'n' qanday bo'limin quraydi'.

5-variant

1. Kristallografiyali'q pa'renje. Pa'njerenin' tu'yinleri ha'm vektorlari'. Singoniyalar, kristallografiyali'q kategoriyalar. Strukturali'q kristallografiyani'n' tiykarg'i' ten'lemeleri.

2. Qatti' denelerdegi atomlar ha'm molekulalar arasi'ndag'i' baylani'slar. Metalliq baylani's.

3. Metalliq baylani's. Metallardi'n' ji'lli'li'q ha'm elektr tog'i'n o'tkizgishligi. Ji'lli'li'q o'tkizgishlik penen elektr o'tkizgishlik arasi'ndag'i' baylani's.

4. Terbeliw rentgenogrammalari'n tu'siriw ja'rdeminde kristalli'q pa'njere turaqli'lari'n esaplaw.

5. Qorg'asi'n si'm joqari' ushi'nan tik halatta ildirilgen. Awi'rli'q ku'shinin' ta'sirinde u'zilip ketpewi ushi'n si'm qanday en' u'lken uzi'nli'qqa iye boli'wi' mu'mkin. Qorg'asi'nni'n' bekkemlik shegarasi' 12,3 MPa.

6-variant

1. Brave pa'njereleri. Brave pa'njerelerinin' tipleri boyi'nsha kristallardi' klassifikaciyalaw. Elementar quti'sha.

2. Yari'm o'tkizgishlerdegi toqti' tasi'wshi'lardi'n' ten' salmaqli'q qa'siyetleri. Elektronlar ha'm tesiksheler. Elektronli'q ha'm tesikshelik o'tkizgishlik.

3. Metallardi'n' elektr o'tkizgishliginin' ta'biyati' ha'm oni'n' temperaturag'a g'a'rezligi.

4. Qatti' denelerdegi fazali'q o'tiwler. Birinshi ha'm ekinshi a'wlad fazali'q o'tiwleri.

5. Si'mg'a baylang'an 10 kg massali' ta'rezi tasi' 2 1/s jiylik penen gorizonta bete su'ykelissiz aylanadi'. Si'mni'n' uzi'nli'g'i' 1,2 m ha'm ko'ldenen' kese-kesimi 2 mm². Si'm materiali'ni'n' mexanikali'q kernewi tabi'lsi'n.

7-variant

1. Kristallardi'n' simmetriyasi'. Simmetriyani'n' noqatli'q ha'm ken'isliktegi toparlari'.

2. Kristalli'q denelerdegi deformaciya menen kernewlerdin' ekinshi ta'rtpili simmetriyali' tenzordin' ja'rdeminde ta'ripleniwi.

3. Menshikli ha'm qosi'mtali' yari'm o'tkizgishler. Ha'r qi'yili' yari'm o'tkizgishlerdegi elektronlar menen tesikleshelerdin' koncentraciyalari'.

4. Qatti' denelerdin' magnitlik qa'siyetleri. Paramagnetizm, diamagnetizm ha'm ferromagnetizm.

5. Uzi'nli'g'i' 5 m ha'm kese-kesimi 2 mm^2 bolg'an si'mg'a 5,1 kg massali' ju'k ildirilgen. Na'tiyjede si'm 0,6 mm ge uzaradi'. Si'm materiali' ushi'n Yung modulinin' ma'nisi tabi'lsi'n.

8-variant

1. Simmetriyasi'ni'n' tipleri boyi'nsha kristallardi' klassifikaciyalaw.

2. Qatti' denelerdin' ji'lli'li'q qa'siyetlerinin' kvantli'q teoriyasi'. Eynshteyn ha'm de Broyl modelleri.

3. Qatti' denelerdin' energiyali'q zonali'q quri'li'si'. Bir o'lshemli modeller. Derlik erkin elektronlar jaqi'nlas'i'wi'.

4. Serpimli modulleri belgili bolg'an kubli'q kristallardag'i' belgili kristallografiyali'q bag'i't boyi'nsha tarqalatug'i'n ha'm berilgen polyarizaciyadag'i' serpimli tolqi'nlardi'n' tezliklerin tabi'w.

5. Uzi'nli'g'i' 3 m ha'm diametri 2 sm bolg'an polat sterjenge massasi' 2,5 t ju'k ildirilgen. Sterjendegi mexanikali'q kernew, sterjennin' sali'sti'rmali' ha'm absolyut uzayi'wi' ani'qlansi'n.

9-variant

1. Kristallardi'n' simmetriyasi' menen olardi'n' fizikali'q qa'siyetlerin ta'ripleytug'i'n tenzorlardi'n' simmetriyalari' arasi'ndag'i' baylani's.

2. Eki atomli' si'zi'qli' shi'nji'rdi'n' kishi terbelisleri. Terbelislerdin' akustikali'q ha'm optikali'q tarmaqlari'.

3. Kristalli'q dielektriklerdin' polyarizaciyasi'. Polyarizaciya tenzori'.

4. Qatti' denelerdin' zonali'q quri'li'si'. Valentli, qadag'an etilgen ha'm o'tkizgishlik zonalari'.

5. Uzi'nli'g'i' 2 m ha'm diametri 1 mm bolg'an gorizonta halda tarti'lg'an. Si'mni'n' ortasi'na massasi' 1 kg ju'k ildirgende ju'k ildirilgen toshka 4 sm ge to'menleytug'i'n da'rejede sozi'ldi'. Si'm matriali'ni'n' Yung modulinin' shamas'i' ani'qlansi'n.

10-variant

1. Keri pa'njerenin' ani'qlamasi'. Tuwri' ha'm keri pa'njereler arasi'ndag'i' baylani's. Keri pa'njere vektorlari'ni'n' qa'siyetleri.

2. Qatti' denelerdeg'i' fazali'q o'tiwler. Ekinshi a'wlad fazali'q o'tiwlerindegi kristaldi'n' simmetriyasi'ni'n' o'zgeriwleri.

3. A'piwayi' eki o'lshemli kvadrat pa'njerenin' kishi terbelisleri. A'piwayi' kubli'q pa'njerenin' kishi terbelisleri.

4. Qatti' denelerdin' optikali'q qa'siyetleri. Optikali'q indikatriza. Qos nur si'ndi'ri'w.

5. Katti'li'qlari' 0,3 kN/m ha'm 0,8 kN/m bolg'an eki prujina izbe-iz jalg'andi'. Eger prujina 1,5 sm ge deformacialang'an bolsa, birinshi prujinani'n' absolyut deformaciyasi'n ani'qlan'i'z.

11-variant

1. Kristallografiyali'q pa'njere tegislikleri ha'm Miller indeksleri. Strukturali'q kristallografiyani'n' tiykarg'i' ten'lemeleri.

2. Kristallardag'i' rentgen nurlari'ni'n' difrakciyasi' ha'm keri pa'njere.

3. Kristallardi'n' ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'. Debay temperaturasi'. Kristallar ushi'n $C_p - C_v$ ayi'rmasi'n tabi'w.

4. Dielektriklerdin' qa'siyetleri. Dielektriklik sin'irgishlik ha'm polarizatsiyalari'wshi'li'q. Elektronli'q polarizatsiyalari'wshi'li'q.

5. Qatti'li'qlari' 2 kN/m ha'm 6 kN/m bolg'an prujinalardi'n' izbe-iz ha'm parallel jalg'ang'andag'i' qatti'li'qlari' ani'qlansi'n.

12-variant

1. Kristallardag'i' rentgen nurlari'ni'n' difraktsiyasi'. Rentgen nurlari'ni'n' shashi'rawi'ni'n' atomli'q ha'm strukturali'q faktorlari'.

2. Qatti' denelerdeg'i' fononlar ha'm pa'njerenin' terbelisleri. Pa'njere terbelislerinin' kvantli'q xarakteri. Fononni'n' impulsi ha'm energiyasi'.

3. Segnetoelektriklik kristallar. Segnetoelektriklik fazali'q aylani'slar. Piroelektrikler.

4. Kristallardag'i' baylani'slar tipleri. Inert gazler kristallari'. Van-der-Vaals-London ku'shleri.

5. Uzi'nli'g'i' 1 m ha'm kese-kesiminin' maydani' 1 sm² bolg'an polat sterjendi 1 mm ge sozi'w ushi'n qanday jumi's atqari'w kerek?

13-variant

1. Kristallardag'i' atomlar arasi'ndag'i' baylani's ku'shlerinin' ta'biyati'. Ionli'q baylani's: baylani's energiyasi', Madelung turaqli'si'. Iyterilis ku'shlerinin' ta'biyati'.

2. Kristallardi'n' serpimlik qa'siyetleri. Kristallardi'g'i' kernewler menen deformatsiyalar. Serpimli deformatsiyalardi' analizlew.

3. Qatti' denelerdeg'i' diamagnetizm menen paramagnetizm. Paramagnetizminin' kvantli'q teoriyasi'.

4. Yari'm o'tkizgish kristallar. Menshikli ha'm qosi'mtali' o'tkizgishlik. p ha'm n tipindegi yari'm o'tkizgishler.

5. Prujinani' 1 sm ge qi'si'w ushi'n 10 N ku'sh qosi'w kerek. Eger ku'sh qi'si'wg'a proporsional bolsa, prujinani' 10 sm ge qi'si'w ushi'n qanday jumi's atqari'w kerek?

14-variant

1. Kovalentlik baylani's: almasi'w ta'sirlesiw, baylani'slardi'n' bag'i'tlang'anli'g'i' ha'm toyi'ni'wshi'li'g'i'.

2. To'rtinshi rangali' serpimli berilgishlik ha'm serpimli qatti'li'q tenzorlari'.

3. Qatti' denelerdin' ji'lli'li'q o'tkizgishligi. Pa'njerenin' ji'lli'li'q qarsi'li'g'i'. Normal processler ha'm ali'p o'tiw processleri.

4. Qatti' denelerdeg'i' energiya zonalari' (energetikali'q zonalar). Energiya zonalari'ni'n' payda boli'wi'.

5. Qatti'li'g'i' 10 kN/m bolg'an prujina 200 N ku'sh penen qi'si'lg'an. Usi' prujinani' ja'ne qosi'msha 1 sm ge qi'si'wda si'rtqi' ku'shler atqaratug'i'n jumi's ani'qlansi'n.

15-variant

1. Kristallardag'i' baylani'slar tipleri. Inert gazler kristallari'. Van-der-Vaals-London ku'shleri. Molekulali'q baylani's.

2. Yari'm o'tkizgishler. Menshikli o'tkizgishlik. Qadag'an etilgen zona.

3. Ferromagnetlerdin' magnitlik quri'li'si'.

4. Qatti' denelerdegı fotoo'tkızgıshlık. Ken'isliklegi zaryad yamasa polyarizaciyalı'q effektler.

5. Qatti'li'g'i' 1 kN/m bolg'an prujina 4 sm ge qı'sı'lg'an. Prujinani'n' qı'sı'li'wi'n 18 sm ge shekem arttı'rı'w ushi'n qanday jumi's atqarı'lı'wi' kerek?

16-variant

1. Qatti' denelerdegı metallı'q baylanı's.

2. Segnetoelektriklerdin', piroelektriklerdin' ha'm pezoelektrlerdin' fizikalı'q qa'siyetleri.

3. Eki atomlı' si'zi'qli' shi'nji'rđi'n' kishi terbelisleri. Terbelislerdin' akustikalı'q ha'm optikalı'q tarmaqları'.

4. Qatti' denelerdin' magnitlik qa'siyetleri. Alması'w ha'm relyativistlik ta'sir etisiwler. Paramagnetikler, diamegnetikler, ferromagnetikler, antiferromagnetikler, ferrimagnetikler.

5. Prujinani'n' joqarg'i' ushi'nda turg'an kishkene taqta u'stine qoyı'lg'an ta'rezi tasi' prujinani' 2 mm ge qı'sadı'. Prujinani'n' ushi'na 5 sm biyiklikten tu'sken ta'rezi tasi' prujinani' qanshag'a qı'sadı'?

17-variant

1. Qatti' deneler pa'njeresindegi atomlardı'n' terbelisleri.

2. Qatti' denelerdin' atomlı'q-kristallı'q strukturasi'n izertlew usı'lları'. Rentgenografiyadı'g'i' polixromatikalı'q Laue usı'li'.

3. Qatti' denelerdegı ekinshi a'wlad fazalı'q o'tiwlerindegi kristallı'q pa'njere simmetriyasi'ni'n' o'zgerisleri.

4. Piroelektriklik kristallar ha'm olardı'n' kristallı'q qurılı'si'ni'n' o'zgeshelikleri. Orayg'a karata simmetriyalı' kristallarda piroelektriklik qa'siettin' bolmaytug'ni'li'gi'n da'lillew.

5. Massası' 10 g bolg'an oq zatvori'ni'n' massası' 200 g bolg'an mi'lti'qti'n' stvoli'ni'n' awzi'nan 300 m/s tezlik penen ushi'p shı'g'adı'. Mi'lti'qti'n' zatvori' stvolg'a qatti'li'g'i' 25 kN/m bolg'an prujina menen qı'sıladi'. Atı'wdan keyin zatvor qanday aralı'qqa jı'lji'ydi'?

18-variant

1. Kyuri ha'm Neyman principi'leri. Simmetriyani'n' sheklik toparları'. Kristallardı'n' fizikalı'q qa'siyetlerinin' simmetriyasi' menen noqatlı'q simmetriyasi' arası'ndag'i' baylanı's.

2. Bir ha'm eki atomlı' pa'njerelerdin' terbelisleri spektri. Akustikalı'q ha'm optikalı'q modalar.

3. Qatti' denelerdin' elektr o'tkızgıshlıgı. Metallar menen yari'm o'tkızgıshlerdin' elektr o'tkızgıshlikleri arası'ndag'i' ayı'rma.

4. Qatti' denelerdin' optikalı'q qa'siyetleri. Optikalı'q aktiv kristallar.

5. Qatti'li'qları' 0,3 kN/m ha'm 0,5 kN/m bolg'an eki prujina izbe-iz jalg'ang'an ha'm ekinshi prujinani'n' absolyut deformaciyasi' 3 sm ge ten' bolatug'i'nday etip sozi'ladi'. Prujinalardı' sozi'wda atqarı'lg'an jumi's esaplansın.

19-variant

1. Kristallı'q ha'm amorf qatti' denelerdin' ha'zirgi zaman ilimi menen texnikası'ndag'i' a'hmiyeti.

2. Qatti' denelerdegı atomlar ha'm molekulalar arası'ndag'i' baylanı'slar. Ionlı' baylanı's (Geteropolyar baylanı's).

3. Kristaldi'n' laegrammasi' ha'm epigrammasi' tiykari'nda oni'n' kristallografiyalı'q bag'ı'tlari'ni'n' orientaciyaları'n ani'qlaw.

4. Qatti' denelerdin' atomli'q-kristalli'q quri'li'si'n izertlew usi'llari'. Elektronli'q mikroskopiya ha'm elektronografiya.

5. Diametri 2 sm, uzi'nli'g'i' 60 m bolg'an qorg'asi'n joqarg'i' ushi'nan qozg'almaytug'i'nday qı'li'p bekkemlengen. To'mengi ushi'na 100 kg massali' ju'k ildirilgen. Si'mni'n' joqarg'i' ushi'ndag'i' mexanikalı'q kernew tabi'lsi'n.

20-variant

1. Qristallardi'n' strukturasi'. Tuwri' ha'm keri pa'njereler. Elementar quti'sha. Miller indeksleri. jaylasti'ri'w ti'g'i'zli'g'i'.

2. Qatti' denelerdegi atomlar ha'm molekular arasi'ndag'i' baylani'slar. Kovalentli baylani's (Gomeopolyar baylani's).

3. Qatti' denelerdin' mexanikalı'q qa'siyetleri. Serpimli ha'm elastik deformaciyalar.

4. Diametri 2 sm, uzi'nli'g'i' 60 m bolg'an qorg'asi'n joqarg'i' ushi'nan qozg'almaytug'i'nday qı'li'p bekkemlengen. To'mengi ushi'na 100 kg massali' ju'k ildirilgen. Si'mni'n' to'mengi ushi'ndag'i' mexanikalı'q kernew tabi'lsi'n.

5. Qatti' denelerdin' atomli'q-kristalli'q quri'li'si'n izertlew usi'llari'. Rentgenstrukturalı'q analiz.

21-varinat

1. Qatti' denelerdin' ji'lli'li'q qa'siyetleri. Qatti' denelerdin' ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'. Dyulong ha'm Pti ni'zami'.

2. Qatti' deneler fizikasi'ni'n' kristallografiya, yari'm o'tkizgishler fizikasi' menen baylani'si'.

3. Qatti' denelerdegi atomlar ha'm molekular arasi'ndag'i' baylani'slar. Ionli'q baylani's.

4. Diametri 2 mm bolg'an si'mg'a massasi' 1 kg ju'k ildirilgen. Si'mda payda bolatug'i'n mexanikalı'q kernew ani'qlansi'n.

5. Qatti' denelerdi polyarizaciya'lı'q mikroskop penen izertlew.

22-variant

1. Kristallografiyalı'q pa'renje. Pa'njerenin' tu'yinleri ha'm vektorlari'. Singoniyalar, kristallografiyalı'q kategoriyalar.

2. Qatti' deneler fizikasi'ni'n' kristallografiya, yari'm o'tkizgishler fizikasi' menen baylani'si'.

3. Qatti' denelerdin' mexanikalı'q qa'siyetleri. Serpimli ha'm elastik deformaciyalar.

4. Qatti' denelerdegi atomlar ha'm molekular arasi'ndag'i' baylani'slar. Van-Der-Vaals baylani'si'.

5. Terbeliw rentgenogrammalari'n ha'm Lauegrammalardi' tu'siriw ja'rdeminde kristalli'q pa'njere turaqli'lari'n esaplaw.

23-variant

1. Fizikalı'q qa'siyetleri boyi'nsha, soni'n' ishinde elektr o'tkizgishliktin' shaması' ha'm xarakteri boyi'nsha qatti' denelerdin' klassifikaciya'sı'.

2. Kubli'q pa'njereler ushi'n (a'piwayı', qaptaldan oraylasqan ha'm ko'lemde oraylasqan) keri pa'njereni du'ziw ha'm Brillyuen zonaları'n belgilew.

3. Metalliq baylani's. Metallardi'n' ji'lli'li'q ha'm elektr tog'i'n o'tkizgishligi. Ji'lli'li'q o'tkizgishlik penen elektr o'tkizgishlik arasi'ndag'i' baylani's.

4. Qatti' denelerdin' elektrlik o'tkizgishligi. Metallar ha'm yari'm o'tkizgishler.

5. Qorg'asi'n si'm joqari' ushi'nan tik halatta ildirilgen. Awi'rli'q ku'shinin' ta'sirinde u'zilip ketpewi ushi'n si'm qanday en' u'lken uzi'nli'qqa iye boli'wi' mu'mkin. Qorg'asi'nni'n' bekkemlik shegarasi' 12,3 MPa.

24-variant

1. Kristalli'q ha'm amorfli'q qatti' deneler. Kristalli'q ha'm amorf denelerdin' bir birinen ayi'rmashi'li'g'i'. Kristalli'q quri'li's.

2. Qatti' denelerdegi atomlar ha'm molekulalar arasi'ndag'i' baylani'slar. Van-der-Vaals ha'm kovalentlik baylani'sli'r.

3. Qatti' denelerdin' mexanikali'q qa'siyetleri. Serpimli ha'm elastik deformაციyalar.

4. Kristallardag'i' mikro - i makroskopiyali'q elektr maydanlari'. Lokalli'q maydan. Qatti' denelerdin' polyarizaciyasi'ni'n' mexanizmleri. Dielektriklik sin'irgishlik.

5. Diametri 1 mm bolg'an polat si'mni'n' bekkemlik shegarasi' 294 MPa dan artpastan ko'bi menen qansha mug'dardag'i' ju'kke shi'dawi' mu'mkin. Usi' ju'ktin' ta'sirinde si'mni'n' sozi'li'wi' baslang'i'sh uzi'nli'g'i'ni'n' qanday bo'limin quraydi'.

25-variant

1. Metallardag'i' Brillyuen zonalari'. U'sh o'lsheмли jag'day ushi'n uli'wmalasti'ri'w.

2. Garmonikali'q oscillyator haqqi'ndag'i' elementar kvantmexanikali'q ma'sele. Kristalli'q pa'njerenin' terbelislerinin' energiyalari'ni'n' kvantlani'wi'. Plank tarqali'wi'.

3. Pa'njere atomlari'ni'n' terbelislerindegi angarmonizm. Ji'lli'li'q ken'eyiwi. Qatti' denelerdin' ji'lli'li'q ken'eyiw koefficienti.

4. Fononlardi'n' o'z-ara ta'sir etisiwi. Normal processler menen asi'ri'p o'tkiziwi processleri. Ji'lli'li'q o'tkizgishlik.

5. Massasi' 3,9 kg polat sterjen o'zinin' baslang'i'sh ushi'nli'g'i'ni'n' 0,001 bo'limine sozi'lg'an. Sozi'lg'an sterjennin' potencial energiyasi' tabi'lsi'n.

26-variant

1. Qatti' denelerdegi fazali'q o'tiwler. Birinshi ha'm ekinshi a'wlad fazali'q o'tiwleri.

2. Kristallofizikadag'i' Kyuri ha'm Neyman prinsipleri. Bul prinsiplerdi qollani'w.

3. Garmonikali'q oscillyator haqqi'ndag'i' elementar kvantmexanikali'q ma'sele. Kristalli'q pa'njerenin' terbelislerinin' energiyalari'ni'n' kvantlani'wi'. Plank tarqali'wi'.

4. Ha'r qanday singoniyali' kristallardag'i' kristallografiyalig tegislikler arasi'ndag'i' qashi'qli'qlar.

5. Uzi'nli'g'i' 2 m ha'm ko'ldenen' kese-kesim maydani' 2 sm² bolg'an temir sterjen 10 kN ku'sh penen sozi'lmaqta. Sozi'lg'an sterjennin' potencial energiyasi' ha'm energiyani'n' ko'lemlik ti'g'i'zli'g'i' tabi'lsi'n.

27-variant

1. Guk ni'zami'. Yung moduli. Serpimlilik moduli tenzori'.

2. Qatti' denelerdegi baylani's energiyasi'. Metallardag'i' baylani's energiyasi'.

3. Metallardag'i' erkin elektronlar. Qatti' denelerdin' zonali'q strukturasi'.

4. Piroeffektin' ta'biyati'. Piroeffektin' ju'zege keliwinin' za'ru'rli ha'm jetkilikli sha'rtleri. Elektrostrikciya.

5. Uzi'nli'g'i' 2 m ha'm ko'ldenen' kese-kesim maydani' 2 sm^2 bolg'an temir sterjen 10 kN ku'sh penen sozi'lmaqta. Sozi'lg'an sterjennin' potencial energiyasi' ha'm energiyani'n' ko'lemlik ti'g'i'zli'g'i' tabi'lsi'n.

28-variant

1. Kristallardi'n' serpimlilik qa'siyetleri. Deformaciya ha'm mexanikali'q kernewler tenzorlari', olardi'n' qa'siyetleri.

2. Qatti' denelerdeg'i' baylani's energiyasi'. Molekulalar arali'q kristallardi'n' baylani's energiyasi'.

3. Qatti' denelerdeg'i' baylani's energiyasi'. Ionli'q ha'm kovalentlik kristallardag'i' baylani's energiyalari'.

4. Kristallardi'n' strukturasi' ha'm kristallardag'i' rentgen nurlari'ni'n' difrakciyasi'. Vulf-Bregg ten'lemesi.

5. Qatti'li'qlari' 1 kN/m ha'm 3kN/m bolg'an eki prujina parallel jalg'ang'an. Usi' sistemani'n' absolyut deformaciyasi' 5 sm bolg'an haldag'i' potencial energiyasi' ani'qlansi'n.

29-variant

1. Simmetriya haqqi'ndag'i' tu'sinik. Simmetriya elementleri. Kristallardi'n' translyaciyali'q simmetriyasi' ha'm Brillyuen zonalari'.

2. Ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'ni'n' kvant teoriyasi'. Eynshteyn ha'm Debay modelleri.

3. Dielektriklerdin' elektrlik qa'siyetleri. Polyarizaciya. Polyarizaciya vektori'.

4. Yari'm o'tkizgishlerdin' zonali'q strukturasi'. Yari'm o'tkizgishlerdeg'i' menshiklik, elektronli'q ha'm tesikshelik o'tkizgishlik.

5. Polat sterjen sozi'lg'anda sterjen materiali'ndag'i' mexanikali'q kernew 300 MPa bolg'an. Sozi'lg'an sterjen potencial energiyasi'ni'n' ko'lemlik ti'g'i'zli'g'i' tabi'lsi'n.

30-variant

1. Kovalentlik baylani's: almasi'w ta'sirlesiw, baylani'slardi'n' bag'i'tlang'anli'g'i' ha'm toyi'ni'wshi'li'g'i'.

2. To'rtinshi rangali' serpimli berilgishlik ha'm serpimli qatti'li'q tenzorlari'.

3. Kristalli'q dielektriklerdin' polyarizaciyasi'. Polyarizaciya tenzori'.

4. Qatti' denelerdin' zonali'q quri'li'si'. Valentli, qadag'an etilgen ha'm o'tkizgishlik zonalari'.

5. Uzi'nli'g'i' 5 m ha'm kese-kesimi 2 mm^2 bolg'an si'mg'a 5,1 kg massali' ju'k ildirilgen. Na'tiyjede si'm 0,6 mm ge uzaradi'. Si'm materiali' ushi'n Yung modulinin' ma'nisi tabi'lsi'n.

31 variant

1. Keri pa'njerenin' ani'qlamasi'. Tuwri' ha'm keri pa'njereler arasi'ndag'i' baylani's. Keri pa'njere vektorlari'ni'n' qa'siyetleri.

2. Qatti' denelerdeg'i' fazali'q o'tiwler. Ekinshi a'wlad fazali'q o'tiwlerindegi kristaldi'n' simmetriyasi'ni'n' o'zgeriwleri.

3. A'piwayi' eki o'lshemli kvadrat pa'njerenin' kishi terbelisleri. A'piwayi' kubli'q pa'njerenin' kishi terbelisleri.

4. Qatti' denelerdin' optikali'q qa'siyetleri. Optikali'q indikatriza. Qos nur si'ndi'ri'w.

5. Katti'li'qlari' 0,3 kN/m ha'm 0,8 kN/m bolg'an eki prujina izbe-iz jalg'andi'. Eger prujina 1,5 sm ge deformacialang'an bolsa, birinshi prujinani'n' absolyut deformaciyasi'n ani'qlan'.

32 variant

1. Kristallografiyalig' pa'njere tegisliklari ha'm Miller indeksleri.
2. Kristallardag'i' rentgen nurlari'ni'n' difrakciyasi' ha'm kerri pa'njere.
3. Kristallardi'n' jillili'q si'yi'mli'g'i'. Debay temperaturasi'. Kristallar ushi'n $C_p - C_v$ ayi'rmasi'n tabi'w.
4. Dielektriklerdin' qa'siyetleri. Dielektriklik sin'irgishlik ha'm polyarizaciyalari'wshi'li'q. Elektronli'q polyarizaciyalari'wshi'li'q.
5. Qatti'li'qlari' 2 kN/m ha'm 6 kN/m bolg'an prujinalardi'n' izbe-iz ha'm parallel jalg'ang'andag'i' qatti'li'qlari' ani'qlansi'n.

33 variant

1. Kristallardag'i' rentgen nurlari'ni'n' difrakciyasi'. Rentgen nurlari'ni'n' shashi'rawi'ni'n' atomli'q ha'm strukturali'q faktorlari'.
2. Qatti' denelerdeg'i' fononlar ha'm pa'njerenin' terbelisleri. Pa'njere terbelislerinin' kvantli'q xarakteri. Fononni'n' impulsi ha'm energiyasi'.
3. Segnetoelektriklik kristallar. Segnetoelektriklik fazali'q aylani'slar. Piroelektrikler.
4. Kristallardag'i' baylani'slar tipleri. Inert gazler kristallari'. Van-der-Vaals-London ku'shleri.
5. Uzi'nli'g'i' 1 m ha'm kese-kesiminin' maydani' 1 sm² bolg'an polat sterjendi 1 mm ge sozi'w ushi'n qanday jumi's atqari'w kerek?

34-variant

1. Kristallardag'i' atomlar arasi'ndag'i' baylani's ku'shlerinin' ta'biyati'. Ionli'q baylani's: baylani's energiyasi', Madelung turaqli'si'. Iyterilis ku'shlerinin' ta'biyati'.
2. Kristallardi'n' serpimlik qa'siyetleri. Kristallardi'g'i' kernewler menen deformaciyalar. Serpimli deformaciyalardi' analizlew.
3. Qatti' denelerdeg'i' diamagnetizm menen paramagnetizm. Paramagnetizmnin' kvantli'q teoriyasi'.
4. Yari'm o'tkizgish kristallar. Menshikli ha'm qosi'mtali' o'tkizgishlik. p ha'm n tipindegi yari'm o'tkizgishler.
5. Prujinani' 1 sm ge qi'si'w ushi'n 10 N ku'sh qosi'w kerek. Eger ku'sh qi'si'wg'a proporcional bolsa, prujinani' 10 sm ge qi'si'w ushi'n qanday jumi's atqari'w kerek?

35-variant

1. Kovalentlik baylani's: almasi'w ta'sirlesiw, baylani'slardi'n' bag'i'tlang'anli'g'i' ha'm toyi'ni'wshi'li'g'i'.
2. To'rtinshi rangali' serpimli berilgishlik ha'm serpimli qatti'li'q tenzorlari'.
3. Qatti' denelerdin' jillili'q o'tkizgishligi. Pa'njerenin' jillili'q qarsi'li'g'i'. Normal processler ha'm ali'p o'tiw processleri.
4. Qatti' denelerdeg'i' energiya zonalari' (energetikali'q zonalar). Energiya zonalari'ni'n' payda boli'wi'.
5. Qatti'li'g'i' 10 kN/m bolg'an prujina 200 N ku'sh penen qi'si'lg'an. Usi' prujinani' ja'ne qosi'msha 1 sm ge qi'si'wda si'rtqi' ku'shler atqaratug'i'n jumi's ani'qlansi'n.

36-variant

1. Kristallardag'i' baylani'slar tipleri. Inert gazler kristallari'. Van-der-Vaals-London ku'shleri. Molekulali'q baylani's.
2. Yari'm o'tkizgishler. Menshikli o'tkizgishlik. Qadag'an etilgen zona.
3. Ferromagnitlerdin' magnitlik quri'li'si'.
4. Qatti' denelerdeg'i' fotoo'tkizgishlik. Ken'islikleg'i' zaryad yamasa polyarizatsiyali'q effektlar.
5. Qatti'li'g'i' 1 kN/m bolg'an prujina 4 sm ge qi'si'lg'an. Prujinani'n' qi'si'li'wi'n 18 sm ge shekem artti'ri'w ushi'n qanday jumi's atqari'li'wi' kerek?

37-variant

1. Qatti' denelerdeg'i' metalli'q baylani's.
2. Segnetoelektriklerdin', piroelektriklerdin' ha'm pezoelektriklerdin' fizikali'q qa'siyetleri.
3. Eki atomli' si'zi'qli' shi'nji'rdi'n' kishi terbelisleri. Terbelislerdin' akustikali'q ha'm optikali'q tarmaqlari'.
4. Qatti' denelerdin' magnitlik qa'siyetleri. Almasi'w ha'm relyativistik ta'sir etisiwler. Paramagnetikler, diamagnetikler, ferromagnetikler, antiferromagnetikler, ferrimagnetikler.
5. Prujinani'n' joqarg'i' ushi'nda turg'an taxtaysha u'stine qoyi'lg'an ta'rezi tasi' prujinani' 2 mm ge qi'sadi'. Prujinani'n' ushi'na 5 sm biyiklikten tu'sken ta'rezi tasi' prujinani' qanshag'a qi'sadi'?

38-variant

1. Qatti' deneler pa'njeresindegi atomlardi'n' terbelisleri.
2. Qatti' denelerdin' atomli'q-kristalli'q strukturasi'n' izertlew usi'llari'. Rentgenografiyadig'i' polixromatikali'q Laue usi'li'.
3. Qatti' denelerdeg'i' ekinshi a'wlad fazali'q o'tiwlerindegi kristalli'q pa'njere simmetriyasi'ni'n' o'zgerisleri.
4. Piroelektriklik kristallar ha'm olardi'n' kristalli'q quri'li'si'ni'n' o'zgeshelikleri. Orayg'a karata simmetriyalı' kristallarda piroelektriklik qa'si'ettin' bolmaytug'ni'li'gi'n da'lillew.
5. Massasi' 10 g bolg'an oq zatvori'ni'n' massasi' 200 g bolg'an mi'lti'qti'n' stvoli'ni'n' awzi'nan 300 m/s tezlik penen ushi'p shi'g'adi'. Mi'lti'qti'n' zatvori' stvolg'a qatti'li'g'i' 25 kN/m bolg'an prujina menen qi'si'ladi'. Ati'wdan keyin zatvor qanday arali'qqa ji'lji'ydi'?

39-variant

1. Kyuri ha'm Neyman prinsipleri. Simmetriyani'n' sheklik toparlari'. Kristallardi'n' fizikali'q qa'siyetlerinin' simmetriyasi' menen noqatli'q simmetriyasi' arasi'ndag'i' baylani's.
2. Bir ha'm eki atomli' pa'njerelerdin' terbelisleri spektri. Akustikali'q ha'm optikali'q modalar.
3. Qatti' denelerdin' elektr o'tkizgishligi. Metallar menen yari'm o'tkizgishlerdin' elektr o'tkizgishlikleri arasi'ndag'i' ayi'rma.
4. Qatti' denelerdin' optikali'q qa'siyetleri. Optikali'q aktiv kristallar.
5. Qatti'li'qlari' 0,3 kN/m ha'm 0,5 kN/m bolg'an eki prujina izbe-iz jalg'ang'an ha'm ekinshi prujinani'n' absolyut deformatsiyasi' 3 sm ge ten' bolatug'i'nday etip sozi'ladi'. Prujinalardi' sozi'wda atqari'lg'an jumi's esaplanı'n.

40-variant

1. Kristalli'q ha'm amorf qatti' denelerdin' ha'zirgi zaman ilimi menen texnikasi'ndag'i' a'hmiyeti.
2. Qatti' denelerdegi atomlar ha'm molekulalar arasi'ndag'i' baylani'slar. Ionli' baylani's (Geteropolyar baylani's).
3. Kristaldi'n' laegrammasi' ha'm epigrammasi' tiykari'nda oni'n' kristallografiyalig' bag'i'tlari'ni'n' orientaciyalari'n ani'qlaw.
4. Qatti' denelerdin' atomli'q-kristalli'q quri'li'si'n izertlew usi'llari'. Elektronli'q mikroskopiya ha'm elektronografiya.
5. Diametri 2 sm, uzi'nli'g'i' 60 m bolg'an qorg'asi'n joqarg'i' ushi'nan qozg'almaytug'i'nday qi'li'p bekkemlengen. To'mengi ushi'na 100 kg massali' ju'k ildirilgen. Si'mni'n' joqarg'i' ushi'ndag'i' mexanikali'q kernew tabi'lsi'n.

41-variant

1. Qristallardi'n' strukturasi'. Tuwri' ha'm keri pa'njereler. Elementar quti'sha. Miller indeksleri. jaylasti'ri'w ti'g'i'zli'g'i'.
2. Qatti' denelerdegi atomlar ha'm molekulalar arasi'ndag'i' baylani'slar. Kovalentli baylani's (Gomeopolyar baylani's).
3. Qatti' denelerdin' mexanikali'q qa'siyetleri. Serpimli ha'm elastik deformaciyalar.
4. Diametri 2 sm, uzi'nli'g'i' 60 m bolg'an qorg'asi'n joqarg'i' ushi'nan qozg'almaytug'i'nday qi'li'p bekkemlengen. To'mengi ushi'na 100 kg massali' ju'k ildirilgen. Si'mni'n' to'mengi ushi'ndag'i' mexanikali'q kernew tabi'lsi'n.
5. Qatti' denelerdin' atomli'q-kristalli'q quri'li'si'n izertlew usi'llari'. Rentgenstrukturali'q analiz.

42-varinat

1. Qatti' denelerdin' ji'lli'li'q qa'siyetleri. Qatti' denelerdin' ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'. Dyulong ha'm Pti ni'zami'.
2. Qatti' deneler fizikasi'ni'n' kristallografiya, yari'm o'tkizgishler fizikasi' menen baylani'si'.
3. Qatti' denelerdegi atomlar ha'm molekulalar arasi'ndag'i' baylani'slar. Ionli'q baylani's.
4. Diametri 2 mm bolg'an si'mg'a massasi' 1 kg ju'k ildirilgen. Si'mda payda bolatug'i'n mexanikali'q kernew ani'qlansi'n.
5. Qatti' denelerdi polyarizaciyali'q mikroskop penen izertlew.

43-variant

1. Kristallografiyalig' pa'renje. Pa'njerenin' tu'yinleri ha'm vektorlari'. Kristallografiyalig' sistemalar, kategoriyalar, singoniyalar.
2. Qatti' deneler fizikasi'ni'n' kristallografiya, yari'm o'tkizgishler fizikasi' menen baylani'si'.
3. Qatti' denelerdin' mexanikali'q qa'siyetleri. Serpimli ha'm elastik deformaciyalar.
4. Qatti' denelerdegi atomlar ha'm molekulalar arasi'ndag'i' baylani'slar. Van-Der-Vaals baylani'si'.
5. Terbeliw rentgenogrammalari'n ha'm lauegrammalardi' tu'siriw ja'rdeminde kristalli'q pa'njere turaqli'lari'n esaplaw.

44-variant

1. Fizikali'q qa'siyetleri boyi'nsha, soni'n' ishinde elektr o'tkizgishliktin' shamasi' ha'm xarakteri boyi'nsha qatti' denelerdin' klassifikაციyasi'.
2. Kubli'q pa'njereler ushi'n (a'piwayi', qaptaldan oraylasqan ha'm ko'lemde oraylasqan) keru pa'njereni du'ziw ha'm Brillyuen zonalari'n belgilew.
3. Metalli'q baylani's. Metallardi'n' ji'lli'li'q ha'm elektr tog'i'n o'tkizgishligi. Ji'lli'li'q o'tkizgishlik penen elektr o'tkizgishlik arasi'ndag'i' baylani's.
4. Qatti' denelerdin' elektrlik o'tkizgishligi. Metallar ha'm yari'm o'tkizgishler.
5. Qorg'asi'n si'm joqari' ushi'nan tik halda ildirilgen. Awi'rli'q ku'shinin' ta'sirinde u'zilip ketpewi ushi'n si'm qanday en' u'lken uzi'nli'qqa iye boli'wi' mu'mkin. Qorg'asi'nni'n' bekkemlik shegarasi' 12,3 MPa.

45-variant

1. Kristalli'q ha'm amorfli'q qatti' deneler. Kristalli'q ha'm amorf denelerdin' bir birinen ayi'rmashi'li'g'i'. Kristalli'q quri'li's.
2. Qatti' denelerdegi atomlar ha'm molekulalar arasi'ndag'i' baylani'slar. Van-der-Vaals ha'm kovalentlik baylani'sli'r.
3. Qatti' denelerdin' mexanikali'q qa'siyetleri. Serpimli ha'm elastik deformაციyalar.
4. Kristallardag'i' mikro - i makroskopiyali'q elektr maydanlari'. Lokalli'q maydan. Qatti' denelerdin' polarizაციyasi'ni'n' mexanizmleri. Dielektriklik sin'irgishlik.
5. Diametri 1 mm bolg'an polat si'mni'n' bekkemlik shegarasi' 294 MPa dan artpastan ko'bi menen qansha mug'dardag'i' ju'kke shi'dawi' mu'mkin. Usi' ju'ktin' ta'sirinde si'mni'n' sozi'li'wi' baslang'i'sh uzi'nli'g'i'ni'n' qanday bo'limin quraydi'.

46-variant

1. Metallardag'i' Brillyuen zonalari'. U'sh o'lsheмли jag'day ushi'n uli'wmalasti'ri'w.
2. Garmonikali'q oscillyator haqqi'ndag'i' elementar kvantmexanikali'q ma'sele. Kristalli'q pa'njerenin' terbelislerinin' energiyalari'ni'n' kvantlani'wi'. Plank tarqali'wi'.
3. Pa'njere atomlari'ni'n' terbelislerindegi angarmonizm. Ji'lli'li'q ken'eyiw. Qatti' denelerdin' ji'lli'li'q ken'eyiw koefficienti.
4. Fononlardi'n' o'z-ara ta'sir etisiwi. Normal processler menen asi'ri'p o'tkiziw processleri. Ji'lli'li'q o'tkizgishlik.
5. Massasi' 3,9 kg polat sterjen o'zinin' baslang'i'sh ushi'nli'g'i'ni'n' 0,001 bo'limine sozi'lg'an. Sozi'lg'an sterjennin' potencial energiyasi' tabi'lsi'n.

47-variant

1. Qatti' denelerdegi fazali'q o'tiwler. Eriw ha'm qati'w. Birinshi ha'm ekinshi a'wlad fazali'q o'tiwleri.
2. Kristallofizikadag'i' Kyuri ha'm Neyman prinsipleri. Bul prinsiplerdi ayqi'n mi'sallar ushi'n qollani'w.
3. Garmonikali'q oscillyator haqqi'ndag'i' elementar kvantmexanikali'q ma'sele. Kristalli'q pa'njerenin' terbelisleri energiyalari'ni'n' kvantlani'wi'. Plank tarqali'wi'.
4. Ha'r qanday singoniyali' kristallardag'i' kristallografiyalı'q tegislikler arasi'ndag'i' qashi'qli'qlar. Strukturalı'q kristallografiyani'n' tiykarg'i' ten'lemeleri.
5. Uzi'nli'g'i' 2 m ha'm ko'ldenen' kese-kesim maydani' 2 sm² bolg'an temir sterjen 10 kN ku'sh penen sozi'lmaqta. Sozi'lg'an sterjennin' potencial energiyasi' ha'm energiyani'n' ko'lemlik ti'g'i'zli'g'i' tabi'lsi'n.

48-variant

1. Guk ni'zami'. Yung moduli. Serpimlilik moduli tenzori'.
2. Qatti' denelerdegi baylani's energiyasi'. Metallardag'i' baylani's energiyasi'.
3. Metallardag'i' erkin elektronlar. Qatti' denelerdin' zonali'q strukturasi'.
4. Piroeffektin' ta'biyati'. Piroeffektin' ju'zege keliwinin' za'ru'rli ha'm jetkilikli sha'rtleri. Elektrostrikiya.
5. Uzi'nli'g'i' 2 m ha'm ko'ldenen' kese-kesim maydani' 2 sm² bolg'an temir sterjen 10 kN ku'sh penen sozi'lmaqta. Sozi'lg'an sterjennin' potencial energiyasi' ha'm energiyani'n' ko'lemlik ti'g'i'zli'g'i' tabi'lsi'n.

49-variant

1. Kristallardi'n' serpimlilik qa'siyetleri. Deformaciya ha'm mexanikali'q kernewler tenzorlari', olardi'n' qa'siyetleri.
2. Qatti' denelerdegi baylani's energiyasi'. Molekulalar arali'q kristallardi'n' baylani's energiyasi'.
3. Qatti' denelerdegi baylani's energiyasi'. Ionli'q ha'm kovalentlik kristallardag'i' baylani's energiyalari'.
4. Kristallardi'n' strukturasi' ha'm kristallardag'i' rentgen nurlari'ni'n' difrakciyasi'. Vulf-Bregg ten'lemesi.
5. Qatti'li'qlari' 1 kN/m ha'm 3kN/m bolg'an eki prujina parallel jalg'ang'an. Usi' sistemani'n' absolyut deformaciyasi' 5 sm bolg'an haldag'i' potencial energiyasi' ani'qlansi'n.

50-variant

1. Simmetriya haqqi'ndag'i' tu'sinik. Simmetriya elementleri. Kristallardi'n' translyaciya'li'q simmetriyasi' ha'm Brillyuen zonalari'.
2. Ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'ni'n' kvant teoriyasi'. Eynshteyn ha'm Debay modelleri.
3. Dielektriklerdin' elektrlik qa'siyetleri. Polyarizaciya. Polyarizaciya vektori'.
4. Yari'm o'tkizgishlerdin' zonali'q strukturasi'. Yari'm o'tkizgishlerdegi menshiklik, elektronli'q ha'm tesikshelik o'tkizgishlik.
5. Polat sterjen sozi'lg'anda sterjen materiali'ndag'i' mexanikali'q kernew 300 MPa bolg'an. Sozi'lg'an sterjen potencial energiyasi'ni'n' ko'lemlik ti'g'i'zli'g'i' tabi'lsi'n.

Qosi'msha sorawlar

1. Kristalli'q ha'm amorf deneler. Qatti' denelerdin' simmetriyasi'.
2. Simmetriya operaciyalari': translyaciya'li'q simmetriya, bazis, elementar quti'sha, pa'njere simmetriyasi', tegis pa'njereler ha'm olardi'n' simmetriyasi'.
3. Eki o'lshemli noqatli'q toparlar ha'm ken'isliklik gruppalar.
4. U'sh o'lshemli kristalli'q sistemalar, noqatli'q gruppalar ha'm ken'isliklik gruppalar.
5. Keri pa'njere. Keri pa'njere vektorlari'. Difrakciya sha'rti. Brillyuen zonalari'.
6. Van-der-Vaals ta'sirlesiw.
7. Ionli'q baylani's, oni'n' ju'zege keliwi ha'm xarakteristikaları'. Madelung turaqli'si'. Ionli'q kristallardi'n' strukturasi'na mi'sallar.
8. Kovalentlik baylani's, oni'n' ju'zege keliwi, elektronlar almasi'wdi'n' ma'nisi.
9. Vodorodli'q baylani's.
10. Metalliq baylani's. Elektronlardi'n' kollektivlesiw ha'm metaldi'n' modeli. Metalliq baylani'sti'n' izotropli'g'i'.

11. Miller indeksleri ha'm kristallografiyali'q bag'i'tlar. Elementar quti'shadag'i' noqatlardi'n' iyelep turg'an ori'nlarini ani'qlaw. A'piwayi' kristalli'q strukturalar (xlorli' natriyding, xlorli' ceziyding strukturalari, ti'g'i'z etip jaylasti'ri'lg'an geksagonalli'q struktura).
12. Awi'si'w ha'm ta'rtplesiw tiplerindegi strukturali'q fazali'q o'tiwler. Fazali'q o'tiwlerdegi simmetriyani'n' o'zgerisleri. Ta'rtp parametri. I ha'm II a'wlad fazali'q o'tiwleri. Landaudi'n' fenomenologiyali'q teoriyasi'.
13. Difrakciya izertlew usi'li' si'pati'nda. Nurlani'wdi'n' u'sh tipin paydalani'w. Vulf-Breggtin' difrakciya sha'rti. Shashi'rawdi'n' atomli'q faktori'. Strukturali'q faktor.
14. Kristallardi'n' strukturasi'n rentgenografiyali'q izertlewdin' eksperimentalli'q usi'llari': Laue usi'li', kristallardi'n' aylani'wi' usi'li', untalg'an kristall usi'li' (Debay – Sherrer usi'li'). Amorf denelerdegi difrakciya.
15. Noqatli'q defektler, olardi'n' payda boli'wi' ha'm diffuziyasi'. Vakansiyalar ha'm tu'yinlar arasi'ndag'i' atomlar. Frenkel ha'm Shottki defektleri. Ten' salmaqli'q haldag'i' defektlerdin' ti'g'i'zli'g'i'.
16. Stexiometriya. Dislokaciya. Dislokaciyalardi'n' ti'g'i'zli'g'i'.
17. Mexanikali'q kernew. Deformaciya. Izotrop deneler ushi'n Guk ni'zami'. Anizotrop qatti' deneler ushi'n Guk ni'zami'. Deformaciya tenzori'.
18. Kristalli'q qatti' denelerdin' elastiklik qa'siyetleri. Mort qi'yraw.
19. Serpimli tolqi'nlari, atomlardi'n' awi'si'wi' ha'm fononlar. Bir atomli' pa'njerenin' terbelis modalari'. Si'zi'qli' bir atomli' shi'nji'r.
20. U'sh o'lsheмли bir atomli' kristaldi'n' terbelisleri. Modalar sani', hallardi'n' ti'g'i'zli'g'i'. Bazisi bar pa'njerenin' terbelis spektri.
21. Si'zi'qli' eki atomli' shi'nji'rini normal terbelisleri. Optikali'q shaqa. Ko'p atomli' baziske iye u'sh o'lsheмли pa'njere.
22. Ionli'q polyarizatsiyalari'wshi'li'q. Lokalli'q fononli'q modalar. Fotonlardi'n' fononlardag'i' shashi'rawi'.
23. Pa'njerenin' energiyasi'n esaplawdi'n' klassikali'q modeli. Eynshteyn modeli.
24. Debay modeli. Debay modelinin' da'lligin joqari'lati'w. Debay temperaturasi'.
25. Pa'njerelek jilli'li'q o'tkizgishlik ha'm fononlardi'n' erkin ju'riw joli'ni'n' uzi'nli'g'i'.
26. Angarmonikali'q effektlar. Normal processlar ha'm asi'ri'p o'tkeriw processleri (processi' perebrosa). Defektlerge baylani'sli' fononlardi'n' shashi'rawi'.
27. Ha'r qi'yli' processlardin' (normal processlar menen asi'ri'p o'tkeriw process) jilli'li'q o'tkizgishlikke ta'siri.
28. Metallar menen yari'm o'tkizgishlerdegi elektronli'q jilli'li'q o'tkizgishlik.
29. Erkin elektronlar ha'm on' zaryadli' atomli'q qaldi'qlar (ionlar). Elektronlardi'n' xaotikali'q ha'm ta'rtplesken qozg'ali'slari'.
30. Tezliklerdin' Maksvell-Bolcman bo'listiriliwi. Serpimli shashi'raw ha'm erkin ju'riw joli'ni'n' ortasha uzi'nli'g'i'.
31. Drude modeli. Lorenc modeli. Klassikali'q modellerdin' jaramsi'zli'g'i'.
32. Metallardi'n' jilli'li'q si'yimli'g'i'. Fermi funkciyasi'. Metallardi'n' elektr o'tkizgishligi. Relaksatsiya waqi'ti'.
33. Elektr qarsi'li'g'i'ni'n' additivlik ta'biyati'. Mattisen qag'i'ydas'i'.
34. Xoll effekti. Valentli elektronlardi'n' jilli'li'q o'tkizgishligi.
35. Azg'i'nbag'an (vi'rojdeni'y) elektron gazinin' sali'sti'rmali' jilli'li'q si'yi'mli'g'i'. Pauli paramagnetizmi.
36. Zommerfeldtin' metalli'q o'tkizgishlik modeli.
37. O'zi menen o'zi kelisilgen (samosoglasovannoe pole) maydandag'i' elektronni'n' qozg'ali'si'. Blox funktsiyalari'.
38. Ruqsat etilgen ha'm qadag'an etilgen energiya zonalari'. Zonadag'i' qa'ddiler sani'. Metallar ha'm dielektriklar.

39. Fermi betinin' quri'li'si'. Elektronlar, tesiksheler ha'm ashi'q orbitalar.
40. Elektronlardi'n' effektivlik massasi'. Hallardi'n' ti'g'i'zli'g'i'.
41. Asa o'tkizgishlik hali'. Asa o'tkizgishliktin' payda boli'wi'. Bardin – Kuper – Shriffer teoriyasi'.
42. Turaqli' ha'm o'zgermeli toqlardag'i' o'tkizgishlik. Ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'.
43. Asa o'tkizgishlik ha'm magnit maydanlari'. Meysner effekti.
44. Magnit ag'i'si'ni'n' kvantlani'wi' ha'm so'nbeytug'i'n toqlar.
45. I ha'm II a'wlad asa o'tkizgishlerdin' diamagnetizmi. Asa o'tkizgishlerdin' mikroskopiyali'q teoriyasi'. Kuperlik juplasi'w.
46. Asa o'tkizgishliktin' qollani'li'wi'. Joqari' temperaturali' asa o'tkizgishlik.
47. Toli'q ten' salmaqli'q (detalnoe ravnovesie). Menshikli ha'm aralaspali' yari'm o'tkizgishler. Elektronlardi'n' koncentraciyasi' ha'm Fermi qa'ddi.
48. Erkin tesikshelerdin' statistikasi'. Elektronli'q-tesikshelik juplardi'n' nshikli koncentraciyasi'. Menshikli yari'm o'tkizgish modelinen ti'sqari' ketiw (otklonenie).
49. Yari'm o'tkizgishlerdin' elektr o'tkizgishligine jaqti'li'qti'n' ta'siri. Lyuminescenciya.
50. Xoll effekti.
51. Shi'g'i'w jumi'si'. Eki metaldi'n' kontakti'. Potenciallardi'n' kontaktli'q ayi'rmasi'. Eki metal arasi'ndag'i' kontaktte payda bolatug'i'n eki elektrlik qatlamni'n' qali'n'li'g'i'.
52. Metal menen yari'm o'tkizgish arasi'ndag'i' kontakt. Beklengen qatlam (zaporni'y sloy).
53. Suyi'qli'q zatti'n' agregat hali' si'pati'nda.
54. Suyi'qli'qlardag'i' bo'lekshelerdin' ji'lli'li'q qozg'ali'slari'.
55. Suyi'qli'qlardi'n' ha'm molekulalar arasi'ndag'i' o'z-ara ta'sirlesiwlerdin' tipleri.
56. Molekulali'q ta'sir etiw radiusi', molekulali'q ta'sir etiw sferasi'.
57. Betlik energiya, bet kerimi.
58. Jug'i'w. Kapillyarli'q qubi'li'slar, menisk.
59. Noqatli'q simmetriya elementleri. A'piwayi' ha'm quramali' elementler.
60. Kristalli'q klasslar. Simmetriyani'n' noqatli'q gruppasi'.
61. Translyaciya'li'q gruppasi'. A'piwayi' ha'm quramali' pa'njereler.
62. Kristallografiya'li'q kategoriyalar. Singoniya ha'm Brave pa'njereleri.
63. Miller indeksleri.
64. Kristallardi'n' strukturasi'n ani'qlaw. Keri pa'njere.
65. Kristalli'q pa'njere defektlerinin' uli'wmali'q klassifikatsiyasi'.
66. Bir o'lshemli a'piwayi' pa'njeredegi terbelisler. Dispersiya'li'q qatnas. Brilluyen zonasi'.
67. A'piwayi' bir o'lshemli pa'njerenin' jiyiliklerinin' spektri.
68. Bir o'lshemli quramali' pa'njeredegi terbelisler. Optika'li'q ha'm akustika'li'q shaqalar.
69. Eynshteyn jaqi'nasi'wi'ndag'i' qatti' denelerdin' termodinamika'li'q funktsiyalari'.
70. Debay jaqi'nasi'wi'ndag'i' qatti' denelerdin' ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'.
71. Shottki boyi'nsha defektler. Noqatli'q defektlerdin' koncentraciyasi'ni'n' temperaturali'q g'a'rezligi.
72. Frenkel boyi'nsha defektler. Noqatli'q defektlerdin' koncentraciyasi'ni'n' temperaturali'q g'a'rezligi.
73. Erkin elektronlar modeli. Tolqi'nli'q funktsiyalar. Energiya qa'ddileri.
74. 0 K temperaturadag'i' Fermi qa'ddi.
75. Energiya'li'q hallardi'n' energiyalar boyi'nsha tarqali'wi' funktsiyasi'.
76. Energiya'li'q qa'ddinin' tolti'ri'li'w itimalli'g'i'. Fermi-Dirak funktsiyasi'. Azg'i'ni'w.
77. Elektronlardi'n' energiyalar boyi'nsha tarqali'w funktsiyasi'. Metallardi'n' ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'.
78. Metallardi'n' elektr o'tkizgishligi.
79. Qatti' denelerdin' zonali'q modeli. Zonalardi'n' payda boli'wi'. Brilluyen zonalari'.

80. Zonadag'i' ori'nlar sani'. Olardi'n' tolti'ri'li'wi'. O'tkizgishler, dielektrikler, yari'm o'tkizgishler.
81. Elektronlar ha'm tesiksheler. Elektronni'n' effektivlik massasi'.
82. Menshikli yari'm o'tkizgishler. Zaryad tasi'wshi'lardi'n' koncentraciyasi'. Fermi qa'ddinin' orni'.
83. p-tipidegi yari'm o'tkizgishler. Zaryad tasi'wshi'lardi'n' koncentraciyasi'. Fermi qa'ddinin' orni'.
84. n-tipidegi yari'm o'tkizgishler. Zaryad tasi'wshi'lardi'n' koncentraciyasi'. Fermi qa'ddinin' orni'.
85. Yari'm o'tkizgishlerdegi zaryad tasi'wshi'lardi'n' koncentraciyasi'n ha'm Fermi qa'ddinin' orni'n ani'qlaw boyi'nsha uli'wmali'q usi'l.
86. Boyli'q ha'm ko'ldenen' qubi'li'slar. Xoll effekti.
87. Yari'm o'tkizgishlerdin' elektr tog'i'n o'tkizgishligi. Elektr o'tkizgishliktin' temperaturadan g'a'rezligi.
88. Zaryadlardi'n' ten' salmaqli' emes tasi'wshi'lari'. Rekombinatsiya mexanizmleri, xarakteristikalar.
89. Kristallardi'n' ren'i. Ren' oraylari'.
90. Ten' salmaqli' emes toq tasi'wshi'lar ha'm olardi'n' tiykarg'i' xarakteristikalar'.
91. Kristallardi'n' jaqti'li'qti' juti'w mexanizmleri. Juti'w spektri. Eksitonlar. Fotoeffekt.
92. Lyuminescenciya ha'm oni'n' mexanizmi.
93. Asa o'tkizgishlik. Asa o'tkizgishlik penen baylani'sli' bolg'an fizikali'q mexanizmler. Asa o'tkizgishlerdin' tiykarg'i' xarakteristikalar'.
94. I ha'm II a'wlad (tu'r) asa o'tkizgishler.
93. Asa o'tkizgishlerdin' kritikali'q parametrleri.
94. Asa o'tkizgishliktin' payda boli'wi'ni'n' fizikali'q mexanizmleri.
95. Asa o'tkizgishlerdin' magnitlik qa'siyetlerinin' makroskopiya'q qa'siyetleri.
96. Atomlardi'n' magnit momentlerinin' ta'biyati'.
97. Diamagnetizmnin' fizikali'q ta'biyati'.
98. Paramagnetizmnin' fizikali'q ta'biyati'.
99. Ferromagnetikler ha'm olardi'n' tiykarg'i' xarakteristikalar'.
100. Ferromagnetizmnin' fizikali'q ta'biyati'. Spinlik tolqi'nlar.
101. Ferrimagnetikler. Olardi'n' kristalli'q strukturasi' ha'm fizikali'q qa'siyetleri.
102. Antiferromagnetikler. Olardi'n' kristalli'q strukturasi' ha'm fizikali'q qa'siyetleri.
103. Statikali'q elektr maydani'ndag'i' dielektrikler. Olardi'n' tiykarg'i' makroskopiya'q xarakteristikalar'.
104. Dielektriklerdin' polyarizatsiyasi'ni'n' tu'rleri.
105. Elektronli'q polyarizatsiyalari'wshi'li'q.
106. Ionli'q polyarizatsiyalari'wshi'li'q.
107. Orientatsiya'q polyarizatsiyalari'wshi'li'q.
108. Qatti' denelerdin' dielektriklik sin'irgishligi.
109. O'zgermeli elektr maydani'ndag'i' dielektrikler, olardi'n' tiykarg'i' makroskopiya'q xarakteristikalar'.
110. Elektromagnit energiyani' rezonansli'q juti'w.
111. Dipollik relaksatsiya. Polya dielektriklerdegi dielektriklik jog'alti'wlar.
112. Spontan polyarizatsiya. Piro- ha'm segnetoelektriklerdin' (ferroelektriklerdin') uli'wmali'q xarakteristikasi'.
113. Segnetoelektriklerdin' (ferroelektriklerdin') tiykarg'i' xarakteristikalar'.
114. Pezoelektrikler.
115. Magnitlik qa'siyetlerdin' makroskopiya'q xarakteristikalar'.