

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

**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 маҳсус талим
вазирининг 201_ йил “__”
даги “__”-сонли буйруғи
билин тасдиқланган

**«КОНДЕНСАЦИЯЛАНГАН МУҲИТЛАР ФИЗИКАСИ»
ФАНИНИНГ**

ЎҚУВ ДАСТУРИ

Билим соҳаси: 100000 - Гуманитар соҳа

Талим соҳаси: 140000 - Табиий фанлар

Мутахассислик: 5А 140204 – Конденсацияланган муҳитлар физикасы ва
материалшунослик (турлари бўйича)

Тошкент – 201_

Фаннинг ўқув дастури Олий ва ўрта маҳсус, 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.

Назиров 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 (ЎзРФА ФТИ).

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

Кириш

“Конденсацияланган мұхитлар физикасы” - күплаб әркинлик даражасига эга, үзаро кучли бөғланган зарралардан ташкил топган ва мураккаб бөғланган мұхитлар физикасини үрганувчи фандир. Ушбу фанинг тадқиқот обектларига 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 мұхитлар физикасы ва материалшунослик (турлари бўйича)” магистратура мутахассислигининг намунавий ўқув режасига “Конденсацияланган мұхитлар физикаси” фани билан бир қаторда, “Диэлектриклар физикаси”, “Полимерлар физикаси” (органик ва ноорганик полимерлар), “Суюқ кристаллар физикаси”, “Қотишмалар физикаси” каби фанлар киритилган бўлиб, қуйидаги “Конденсацияланган мұхитлар физикаси” фанинг асосий мақсади, конденсацияланган мұхитларнинг зонавий асослари, конденсацияланган мұхитларни – яримўтказгичларни тавсифлаш учун физикада фойдаланадиган асосий тушунчалар, назарий тасаввурлар ва моделлар билан магистрантларни таниширишдир. Ушбу ўқув фанида асосий этибор қаттиқ жисмлар – яримўтказгичларда кечадиган физик жараёнлар ва ҳодисаларни ўрганишга қаратилган бўлиб, ушбу ҳол “Конденсацияланган мұхитлар физикасы ва материалшунослик (турлари бўйича)” мутахассислиги бўйича навбатда ўрганиладиган навбатдаги қатор фанлар билан боғлиқдир. Ушбу фанинг вазифаси талабаларда келажақда мустақил илмий тадқиқот ва амалий ишлаб чиқариш жараёнларида конденсацияланган мұхитлар – 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 иборатdir.

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 ўтказа олиш кўникмасига эга бўлиши талаб этилади.

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

3. Семинар машғулотлари бўйича: ўқитувчи томонидан тавсия қилинган адабиётлар билан мустақил ишлаши, семинар мавзусига тегишли марзуза жараёнида физик қонуниятлар бўйича кенгроқ ва чукурроқ мулохаза килиши, 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, үзаро 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 ўқитишида замонавий ахборот ва педагогик технологиялар

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

Ушбу фанни ўқитишида конденсацияланган мұхитлар - яримүтказгичлардаги физик ҳодисалар ва қонунларнинг намойиши, ўқув кинофильмлари, тажриба натижаларини компьютерлаштирилган маҳсус дастурлар ёрдамида мультимедиялардан фойдаланиш, Интернет тармоғидан, кўргазмали материаллардан, шунингдек, илфор педагогик технологиялардан фойдаланиш мумкин.

Асосий қисм

Конденсацияланган мұхитлар физикасы фанининг предмети, вазифаси ва манбалари

“Конденсацияланган мұхитлар физикаси” фани. Фаннинг вазифаси. Фаннинг “Конденсацияланган мұхитлар физикасы 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 олинадиган малумотларни ўрганиш хусусиятлари. Предметлараро боғланиш. “Конденсацияланган мұхитлар физикаси” фанининг “Конденсацияланган мұхитлар физикасы ва материалшунослик (турлари бўйича)” мутахассислигининг бошқа бўлимлари ва бошқа табиий фанларни ўрганишдаги роли. Баҳолаш мезонлари.

Конденсацияланган мұхитлар физикаси

Кириш. Фаннинг мақсади ва вазифалари. Конденсацияланган мұхитларнинг зонавий назарияси асослари. Кристалл панжаралар. Кристалл панжаралар турлари. Кристалларда нуқсонлар. Кристаллар учун Шредингер тенгламаси. Бир электронли ва адабиатик яқинлашиш. Рухсат этилган зонадаги холатлар сони. Бриллюэн зонаси тушунчаси. Заряд ташувчиларнинг самаравий массаси. Яримүтказгичларнинг энергетик зоналари структураси. Квант холатлари. Ферми-Дирак тақсимот функцияси. Киришмавий ва хусусий ўтказувчанлик тушунчаси. Ферми сатҳи ҳолати ва унинг температуравий боғлиқлиги. Конденсацияланган мұхитларнинг электрик ўтказувчанлиги. Конденсацияланган мұхитларда 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 токлари. Токнинг узлуксизлик тенгламаси. Эйнштейн муносабати. Ноасосий заряд ташувчилар ҳаракати. Конденсацияланган мұхитларда 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. Яrimўтказгич материалнинг ўтказувчанлик турини аниқлаш.
2. Яrimўтказгич материалнинг солиштирма қаршилигини тўрт зондли усул ёрдамида аниқлаш.
3. Яrimўтказгич материалнинг солиштирма қаршилигини Ван-Дер- Пау усули ёрдамида аниқлаш.
4. Заряд ташувчилар концентрациясини ва уларнинг ҳаракатчанлигини Холл эфекти ёрдамида аниқлаш.
5. Яrimўтказгич 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 таҳминий тавсия этиладиган мавзулари:

1. Кристалларда кимёвий алоқалар турлари.
2. Кристалл панжаралар таснифи.
3. Яrimўтказгичларда нуксонлар турлари.
4. Аморф яrimўтказгичлар.
5. Яrimўтказгичларда заряд ташувчиларнинг сочилиш механизмлари.
6. Яrimўтказгич сиртида юз берувчи физик жараёнлар.
7. Киришмали яrimўтказгичлар ва уларнинг зонавий структураси.
8. Яrimўтказгичларни легирлаш усуллари.
9. Яrimўтказгичларга ишлов бериш усуллари.
10. Яrimўтказгичларда гальваномагнит, термоэлектрик ва термолагнит ҳодисалар.
11. Яrimўтказгичларни ўстириш усуллари.

Курс иши бўйича услубий кўрсатмалар

“Конденсацияланган муҳитлар физикаси” фани бўйича курс ишини тайёрлашда қўйидаги 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 хуроса ва таклифлар киритиш;
- ёзма кўринишдаги ишларни тўғри расмийлаштириш кўникмаларини ривожлантириш ва бошқалар.

Мустақил ишни ташкил этишнинг шакли ва мазмуни

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

фаннинг хусусиятларини ҳисобга олган ҳолда қуидаги шакллардан фойдаланиш тавсия этилади:

- Лаборатория ишларига тайёргарлик кўриш ва олинган натижаларни қайта ишлаш;
- Семинарга тайёргарлик кўриш;
- дарслик ва ўкув қўлланмалар бўйича фан боблари ва мавзуларини ўрганиш;
- маҳсус 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

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

Фойдаланиладиган асосий дарсликлар ва ўкув қўлланмалар рўйхати

Асосий дарсликлар ва ўкув 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. T. «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 физикасы 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. Lekciyali'q sabaqlar ko'lemi 40 saat, laboratoriyalı'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' ilimiyl-metodikali'q ken'esinin' 2012-ji'l 29-iyun ku'ngi ma'jilisinde qarap shi'g'i'ldi' ha'm maqullandı'. Protokoldi'n' qatar sani' 6.

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

Du'ziwshi professor B.Abdikamalov

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

Nº	Temalar atamalari'	Lek- ciya- lar	Labo- rat.	Semi- nar- lar	O'z betin- she
1	"Kondensaciyalang'an ortali'qlar fizikasi'" pa'ni. Pa'ndi u'yreniw processi aldi'nda turg'an wazi'ypalar. Pa'nnin' "Kondensaciyalang'an ortali'qlar fizikasi' ha'm materialtani'w (tu'rleri boyi'nsha)" qa'nigeliginin' 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'yreniwdin' o'zgeshelikleri. Predmetler arali'q baylani's. "Kondensaciyalang'an ortali'qlar fizikasi'" pa'ninin' fanining "Kondensaciyalang'an ortali'qlar fizikasi' ha'm materialtani'w (tu'rleri boyi'nsha)" qa'nigeliginin' basqa bo'limleri ha'm basqa ta'biyyiy pa'nlerdi u'yreniwdegi tutqan orni'. Bilimdi bahalaw kriteriyleri.			
3	Kirisiw. Kondensaciyalang'an ortali'qlardi'n' ha'zirgi zaman teoriyalari ni'n' tiykarları'. Kondensaciyalang'an hal tu'sinigi. Kristall ha'm kristalli'q pa'hjereeler.	2		2
4	Kristallar simmetriyasi'. Noqatli'q ha'm translyaciyalı'q simmetriya elementleri. Simmetriyalı'q operaciyalar. Simmetriya gruppaları'. Kristalli'q pa'njererenin' tu'rleri.	2	2	2
5	Kristallardag'i' defektler. Noqatli'q defektler. Bir o'lshemli defektler (dislokaciyalar).	2	2	2
6	Eki o'lshemli (jaylasti'ri'w defektleri) ha'm u'sh o'lshemli defektler. Defektlerdi eksperimentalli'q uyreniw usi'llari'. Rentgenografiya (topografiya) ha'm elektronli'q mikroskopiya.	2		2
7	Kondensaciyalang'an ortali'qlardag'i' atomlar arasi'ndag'i' ta'sirlesiwler ha'm baylani'slardı'n' tiykarg'i' tipleri. Atomlardı'n' ximiyali'q aktivliginin' energiyali'q xarakteristikaları' (ionizaciya potencialı', ximiyali'q uqsaslı'q energiyası', elektrlik jaqtan terislilik) ha'm olardi' bahalaw usi'llari'. Atomlar arasi'ndag'i' ku'shlerdin' uli'wmali'q xarakteristikası'. Atomlar menen molekulalardag'i' ximiyali'q baylani'slardı'n' elementar teoriyası'. Ionli'q, kovalent ha'm molekulalı'q kristallar, metallar. Vodorodlı'q baylani'sqa iye qattı' deneler. Qattı' denelerdegi baylani'slar tiplerinin' klassifikasiyasi'. Madelung turaqli'si'.	2	2	2
8	Kristallar ushi'n Shredinger ten'lemesi. Bir elektronli'q ja'ne adiabatalı'q jaqi'nłasi'w Qattı' denelerdin' elektrlik qa'siyetleri boyi'nsha uli'wmali'q xarakteristikası'. 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' bası'mi', termoelektronli'q emissiya. Elektronli'q gazdin' magnitlik qabi'llag'i'shli'g'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 qatt'i' denelerdin' energiya spektri. Zonali'q modeldin' qollani'li'wshi'li'g'i'. Lokalizaciyalı'q hallardi'n' payda boli'wi'.	2	4		2
11	Kristalli'q emes qatt'i' denelerdin' tiykarg'i' elektrlik qa'siyetleri. Ruqsat etilgen zonalardag'i' hallar sani'.	2		2	2
12	Brillyuen zonası' tu'sinigi. Brillyuen zonası'ni'n' kasi'ndagi' juwi'q sheshimler. Zaryad tasi'wshi'lardi'n' effektivlik massasi'. Yari'm o'tkigishlerdin' 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	Kondensaciyalang'an ortali'qlardi'n' elekt o'tkizgishligi. Kondensaciyalang'an ortali'qlardag'i' kinetikali'q qubi'li'slar. Galvanomagnitlik, termoelektrlik ha'm termomagnitik effektlər. Xoll effekti.	2	4	2	2
15	Qatt'i' denelerdegi tunnellik effekt. Zaryad tasi'wshi'lardi'n' tunnelleniwi. Franc-Keldish effekti. Generaciya-rekombinaciya qubi'li'slar. 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 qatnasları'. Tiykarg'i' emes zaryad tasi'wshi'lardi'n' qozg'ali'si'.	2		2	2
17	Kondensaciyalı'q ortali'qlardag'i' betlik qubi'li'slar. Bettin' elektronni'n' baylani's enerjiyası'na ta'siri.	2			2
18	Shi'g'i'w jumi'si'. Potenciallardı'n' kontaktlı'q ayl'rması'. Elektronlı'q betlik qa'ddiler.	2		2	2
19	Yari'm o'tkizgishlerdin' zonali'q strukturasi'. Artı'qmash elektr zaryadları' menen baylani'sli' bolg'an qubi'li'slar.	2			2
20	Germaniy menen kermniydegi energiya zonaları'. Yari'm o'tkizgishlerdegi ciklotronlı'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. Яримұтқазгичлар физикаси. Т. «Үқитувчи». 1999.
2. Тешабоев А., Зайнобидинов С., Эрматов Ш. Қаттиқ жисм физикаси. Т. «Молия». 2001.
3. Назиров Э.Н., Тешабоев А.Т., Назиров Д.Э. Яримұтқазгич терминлари. ЎзМУ. 2003.
4. Nazirov E.N., Nazirov D.E., Teshaboyev A.T. Yarimo'tkazgichlar fizikasi lug'ati. T. «Universitet». 2008.
5. Ҳабибулаев 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. «Яримұтқазгич материаллар ва асбоблар физикасы практикуми». Т. ЎзМУ. 2007.
8. Тешабоев А., Зайнобидинов С., Мусаев Э.А. Яримұтқазгичлар ва яримұтқазгичли 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/pr6jkovalprovodimosti.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 ortalı'qlar fizikasi" boyi'nsha laboratoriyalı'q jumi'slar ha'm bul jumi'slardi' ori'nlaw ushi'n mo'lsherlengen waqi't

Nº	Laboratoriyalı'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 laboratoriyalı'q praktikum).	4
3	Kristalli'q emes qattı' denelerdin' energiya spektri. Zonali'q modeldin' qollanı'li'wshi'li'g'i'. Lokalizaciyalı'q hallardi'n' payda boli'wi' (kompyuterlik laboratoriyalı'q praktikum).	4
4	Qattı' denelerdegi Galvanomagnitlik, termoelektrlik ha'm termomagnitik effektler. 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 ortali'qlar fizikasi"" boyi'nsha o'z betinshe jumi'slardi'n' temalari' ha'm jumi'slardi' ori'nlaw ushi'n mo'lsherlengen waqi't

Nº	O'z betinshe ori'nlanatug'i'n jumi'slardi'n' temalari'	Waqi't
1	<p>"Kondensaciyalang'an ortali'qlar fizikasi" pa'ni. Pa'ndi u'yreniw processi aldi'nda turg'an wazi'ypalar. Kondensaciyalang'an ortali'qlardi'n' ha'zirgi zaman teoriyalari ni'n' tiykarlari'. Kondensaciyalang'an xal tu'sinigi. Kristall ha'm kristalli'q pa'njereler.</p> <p>Kristallardag'i' atomlar menen molekulalar arasi'ndag'i' ximiyali'q baylani'slardi'n' tu'rleri.</p>	4
2	<p>Kristalli'q pa'njererin' ta'riyipleniwi. Kristallar ha'm kristalli'q pa'njere. Kristallardi'n' simmetriyasi'. Noqatli'q ha'm translyaciyalı'q simmetriya elementleri. Simmetriyalı'q operaciyalar. Simmetriya gruppaları'. Kristalli'q pa'njererin' tu'rleri.</p>	6
3	<p>Yari'm o'tkizgish kristallardag'i' strukturalı'q defektler. Noqatli'q defektler. Bir o'lshemli defektler (dislokaciyalar). 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 uqsaslı'q energiyası', elektrlik jaqtan terislilik) ha'm olardi' bahalaw usi'llari'. Atomlar arasi'ndag'i' ku'shlerdin' uli'wmali'q xarakteristikası'. Ionli'q, kovalent ha'm molekulalı'q kristallar, metallar. Yari'm o'tkizgish kristallardag'i' ximiyali'q baylani'slar. Qattı' denelerdegi baylani'slar tiplerinin' klassifikasiyası'.</p>	4
4	<p>Kristallardag'i' defektler. Defektler klassifikasiyası'. Nol o'lshemli (noqatli'q), bir o'lshemli (si'zi'qi', dislokaciyalar), eki o'lshemli (jaylasti'ri'w defektleri) ja'ne u'sh o'lshemli defektler.</p>	4
5	Amorf yari'm o'tkizgishler.	4
6	<p>Yari'm o'tkizgishlerdegi zaryad tasi'wshi'lardi'n' shashi'raw mexanizmleri. Bolcmanni'n' kinetikali'q ten'lemesi. Ten' salmaqli'q hal. Relaksaciya waqi'ti'. Shashi'rawdi'n' effektivlik kesimi. Shashi'raw oraylari ni'n' tipleri.</p>	6
7	<p>Yari'm o'tkizgishlerdin' betlik qatlami'nda ju'zege keletug'i'n fizikalı'q processler. Betlik qa'ddilerdin' ta'biyati'. Ken'isliklik zaryadti'n' katlami'ni'n' teoriyası'. Maydan effekti. Betlik rekombinaciya.</p>	4
8	<p>Qosi'mtali' yari'm o'tkizgishler ha'm olardi'n' zonali'q strukturasi'. 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.</p>	4
9	<p>Ha'zirgi zaman mikro- ha'm nanoelektronikasi'ndag'i' yari'm o'tkizgishlerdin' tutqan orni'.</p>	4
	Ja'mi	40

"Kondensaciyalang'an ortali'qlar fizikasi"" boyi'nsha seminar sabaqlari'

Nº	Temalar atamalari'	Waqi't
1	Kristallardag'i' ximiyali'q baylani'slardi'n' tu'rleri. Atomlardi'n' ximiyali'q aktivliginin' energiyali'q xarakteristikalari' (ionizaciya potenciali', ximiyali'q uqsasli'q energiyasi', elektrlik jaqtan terisilik) ha'm olardi' bahalaw usi'llari'. Atomlar arasi'ndag'i' ku'shlerdin' uli'wmali'q xarakteristikasi'. Ionli'q, kovalent ha'm molekulali'q kristallar, yari'm o'tkizgishler, metallar. Qatt'i' denelerdegi baylani'slar tiplerinin' klassifikaciysi'.	2
2	Kristalli'q pa'njereleleri ta'riyiplew. Kristallar simmetriyasi'. Noqatli'q ha'm translyaciyalı'q simmetriya elementleri. Simmetriyali'q operaciyalar. Simmetriya gruppaları'. Kristalli'q pa'njerinin' tu'rleri.	2
3	Kristallardag'i' (yari'm o'tkizgish kristallardag'i') strukturali'q defektler. Noqatli'q defektler. Bir o'lshemli defektler (dislokaciyalar). Eki o'lshemli (jaylasti'ri'w defektleri) ha'm u'sh o'lshemli defektler. Defektlerdi eksperimentalli'q uyreniw usi'llari'. Rentgenografiya (topografiya) ha'm elektronli'q mikroskopiya.	2
4	Amorfli'q yari'm o'tkizgishler. Olardi'n' strukturasi'ni'n' ha'm fizikali'q qa'siyetlerinin' o'zgeshelikleri, a'melde qollani'li'wi'.	2
5	Yari'm o'tkizgishlerdegi zaryad tasi'wshi'lardi'n' shashi'raw mexanizmleri.	2
6	Yari'm o'tkizgishlerdin' betinde ju'zege keletug'i'n fizikali'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'. Kompensaciyalang'an 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	Shegar- 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 ani'qlaw usi'llari'

Qadag'alaw tu'ri	Qadag'alaw usi'lli'	Sani'	Waqt'i'	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 ortali'qlar 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 ortali'qlar fizikasi' ha'm materialtani'w" qa'nigeligi boyi'nsha oqi'ytug'i'n magistrantlar kondensaciyalang'an ortali'qlar fizikasi' boyi'nsha kursli'q jumi'slardi'n' mazmuni', jumi'slardi' ra'simiyestiriw 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 individualli'q tapsi'rma boyi'nsha ori'nlanadi'. Jumi's arnawli' ilimiyl a'debiyat penen tani'si'wdi', esaplawlar ju'rgiziwdi, belgili bir tapsi'rmalardi' ori'nlawdi' na'zerde tutadi' ha'm "Kondensaciyalı'q ortali'qlar fizikasi"" pa'ni boyi'nsha ali'ng'an bilimlerdi paydalani'w qa'biletilgin ko'rsetiw maqsetinde islenedi. Magistraturada oqi'wshi' ali'ng'an na'tiyjelerdi 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 individualli'q 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 shi'g'i'li'wi' kerek bolg'an ma'seleler jumi'sti'n' baslang'i'sh mag'li'wmatlardı' tallawdan na'tiyje ali'naman degenshe 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 etapti' ori'nlawdi'n' ayqi'n mu'ddetleri ko'rsetilgen boladi'. Grafiki 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' qosil'i'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 sheshimlerdi qabi'l etiwge, barli'q mag'li'wmatlardi'n' duri'sli'g'i'na magistrant - berilgen jumi'sti'n' avtori' 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 sheshiwdin' 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 jazi'wg'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'h ayt'i'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 ayt'i'p berowi;
- 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'rekettegi 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 sheshiwdin' 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 sheshiwdin' 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'simiyestiriledi. Tekst printerde 1 yamasa 1,5 intervaldan jazi'ladi'. Teksttin'

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'sqartip 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 programmalardi'n' ja'rdeinde jazi'ladi'. Grafiklerdi soqqanda grafiklerdi sog'i'w ushi'n qoyi'latug'i'n sa'ykes talaplardi'n' toli'q ori'nlan'i'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 ilimiyy maqalalar jazg'anda qoyi'latug'i'n talaplarg'a toli'q sa'ykes keledi. Ma'selen a'debiy derekke ssi'lka kvadrat qawsı'rmag'a ali'ni'p jazi'ladi'. Mi'sali': "[4]", "[5-9]" yamasa "[1, 4, 18]".

Formulag'a beriletug'i'n ssi'lkalar a'dettegi qawsı'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'llimnин' 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'nlan'i'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 teoriyalı'q 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 waqtı'nda studenttin' materialdi' bilmewi bahani' qanaatlandı'rarsi'zli'qqa shekem to'menletiwge tiykar boladi', o'ytkeni kurs jumi'si' student ta'repinen o'zbetinshe ori'nlanbag'anli'g'i' ko'riniq qaladi'.

Studenttin' bilimin sapa komissiyasi' bahalaydi'. Kurs jumi'si' tekserilgennen keyin recenziyani'n' bir ekzemplifi' menen menen studentke qaytari'p beriledi. Studentke jaqlawg'a tayarlani'wg'a, tiykarg'i' material duri's dep esaplanip berilgen eskertiwlerdin' barli'g'i'n esapqa ali'w usi'ni's etiledi. Ayri'qsha ori'nlang'an kurs jumi'slari' ilimiyy basshi'si'ni'n' rekomendaciysi' ha'm komissiyani'n' sheshimi menen jaqlawsi'z bahalani'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 waqtı'nda shi'g'i'p so'ylew ani'q ha'm qi'sqa, kurs jumi'si'ni'n' tiykarg'i' bag'darları'n o'z ishine alatug'i'n boli'p, juwmaqlar ayti'ladi'. Jaqlaw waqtı'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 balli'q 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 talaplarg'a juwap beredi, jetkilikli joqari' teoriyalı'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'riniq turg'an boli'p jaqlaw waqtı'nda studenttin' temani' tu'siniwi ha'm o'zlestiriwi , a'debiyatlar menen qanaatlandı'rarlı' 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 talaplarg'a juwap bermeytug'i'n, studentti temani' tu'sinbegenligin ko'rsetetetug'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 esapanadı'. Student kurs jumi'si'n ori'nlamag'an yamasa 0-54 ball menen bahalang'an bolsa ol basqa pa'nlerden juwmaqlawshi' qadag'alawlardı' 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. T. «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. Маматкаrimov O.O., Vlasov S.I., Nazirov D.Э. «Яримўтказгич материаллар ва асбоблар физикасы 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. Калин, 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. Калин, 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. Учебных 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. МИСИС. 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 magistrantlarga usi'ni'latug'i'n temalar dizimi

1. Kristallardi'n' simmetriyasi'. Noqatli'q ha'm translyaciyalı'q simmetriya elementleri. Simmetriyali'q operaciyalar ha'm olardi' matematikali'q matricalardi'n' ja'rdeinde sa'wlenendiriw.
2. Simmetriyani'n' noqatli'q ha'm ken'isliklik gruppaları'.
3. Kristallardag'i' defektler. Noqatli'q defektler. Noqatli'q defektlerdin' koncentraciyasi'ni'n' temperaturadan g'a'rezligi.
4. Bir o'lshemli defektler (dislokaciylar). Dislokaciyalarga ta'sir etetug'i'n ku'shler menen dislokaciyalardi'n' energiyasi'ni'n' mug'dari' esaplaw.
5. Eki o'lshemli (jaylasti'ri'w defektleri) ha'm u'sh o'lshemli defektler. Strukturalı'q defektlerdin' energiyalari'n esaplaw.
6. Defektlerdi eksperimentalı'q (difrakciyalı'q) u'yreniw usi'llari'. Rentgenografiya (topografiya) ha'm elektronli'q mikroskopiya. Difrakciyalı'q kontrast ha'm oni' esaplaw.
7. Kondensaciyalang'an ortalı'qlardag'i' atomlar arasi'ndag'i' ta'sirlesiwler ha'm baylani'slardi'n' tiykarg'i' tipleri.
8. Kristalli'q denelerdegi politipizm ha'm fazali'q o'tiwler.
9. Ekinshi a'wlad fazali'q o'tiwlerindegi kristalli'q pa'njererin' simmetriyasi'ni'n' o'zgeris ni'zamlari'.
10. Atomlardi'n' ximiyali'q aktivliginin' energiyali'q xarakteristikaları' (ionizaciya potencialı', ximiyali'q uqsaslı'q energiyası', elektrlik jaqtan terislilik) ha'm olardi' bahalaw usi'llari'.
11. Atomlar arasi'ndag'i' ku'shlerdin' uli'wmali'q xarakteristikasi'. Atomlar menen molekulalardag'i' ximiyali'q baylani'slardi'n' elementar teoriyası'. Ionli'q, kovalent ha'm molekulali'q kristallar, metallar.
12. Vodorodlı'q baylani'sqa iye qatti' deneler. Segnetoelektrikler.
13. Kristalli'q pa'njererin' dinamikali'q xarakteristikaları' ha'm ji'lli'li'q qa'siyetleri. Atomlardi'n' si'zi'qli' shi'nji'ri'ndag'i' terbelisler.

14. Baziske iye pa'njeredege terbelisler. Fononlar. Modalar sani' ha'm fononlardi'n' hallari'n'i'n' ti'g'i'zli'g'i'. Ali'ng'an na'tiyelerdi baziske iye u'sh o'lshemli 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' terbelislerinde nurlardi'n' shashi'rawi'. Fononlardi'n' bir biri menen ta'sirlesowi.
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. Qatt'i' denelerdin' elektrlik qa'siyetleri. Qatt'i' 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' klassifikasiyasi' (piroelektrikler, pezoelektrikler, ferroelektrikler ha'm antiferroelektrikler) ha'm olardi'n' tiykarg'i' elektrlik qa'siyetleri.
24. Kristalli'q emes qatt'i' denelerdin' energiya spektri. Zonali'q modeldin' qollani'li'wshi'li'g'i'. Lokalizaciyalı'q hallardi'n' payda boli'wi'.
25. Kristalli'q emes qatt'i' 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 adiabatali'q jaqi'nlası'w.
27. Brillyuen zonası' tu'sinigi. Zaryad tasi'wshi'lardi'n' effektivlik massasi'. Yari'm o'tkigishlerdin' 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'lli'g'i'.
29. Kondensaciyalang'an ortali'qlardi'n' elekt o'tkizgishligi. Kondensaciyalang'an ortali'qlardag'i' kinetikali'q qubi'li'slar. Galvanomagnitlik, termoelektrlik ha'm termomagnitlik effektler. Xoll effekti.
31. Zaryad tasi'wshi'lardi'n' tunnelleniwi.
32. Franc-Keldish effekti. Generaciya-rekombinaciya qubi'li'slar'. 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 ortali'qlardag'i' kollektivlik qubi'li'slar. Magnetizm. Diamagnetizm, paramagnetizm.
35. Kondensaciyalang'an ortali'qlardag'i' kollektivlik qubi'li'slar. Ferromagnetizm, antiferromagnetizm, ferri- ha'm antiferrimagnetizm.
36. Alması'w ta'sirlesiwini' kvantli'q tiykarları'.
37. Asa o'tkizgishlik. Eksperimentalli'q faktler. Asa o'tkizgish materiallar. Meysner effekti. Izotoplı'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. Qatt'i' deneli kvantli'q elektronika.
40. Foto'o'tkizgishlik ha'm lyuminesensiya.

«Kondensaciyalang'an ortali'qlar fizikasi» pa'ni boyi'nsha oqi'latug'i'n lekciyalar tekstleri

Eskertiw: "Kondensaciyalang'an ortali'qlar fizikasi" pa'ni boyi'nsha barli'q lekciyalar noutbukti'n' ha'm elektronli'q proektrdi'n' ja'rdeinde o'tiledi.

KIRISIW

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

En' da'slep zatti'n' konlensaciyalang'an 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'nları ni'n' zatlar menen tek energiyani'n' ayi'ri'm kuantları' tu'rinde energiya almasatug'i'nli'g'i' belgili. Sonli'qtan elektromagnit tolqi'nlardı' energiyası' menen kvaziimpulsi

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

shamalari'na ten' bolg'an kvazibo'lekshelerdin' ag'i'si' dep qarawg'a boladi'. Bul an'latpalarda s arqali' jaqtılli'qtı'n' tezligi belgilengen. Bul qatnashlar fotonni'n' energiyasi' E_f penen impulsi p_f shamalari'n og'an sa'ykes keliwshi kernewligi

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

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 eksperimenterde ani'q ko'rinedi. Solay etip elektromagnit tolqi'nları' bir waqi'tta 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 $E(r,t)$ funkciyasi'ni'n' ma'nisi mi'nadan ibarat:

A'lvette, 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 waqi't momentindegi energiyasi'ni'n' ti'g'i'zli'g'i' usi' noqattag'i' ha'm usi' waqi't momentindegi elektr maydani'ni'n' kernewliginin' modulinin' kvadrati' bolg'an $|E(r,t)|^2$ shamasi'na proporsional. Al korpuskulalı'q interpretaciyada 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'rdeinde ani'qlanadi'. Demek fotonlardi'n' ti'g'i'zli'g'i' bolg'an $N_f(\mathbf{r},t)$ shamasi' $|E(r,t)|^2$ shamasi'na proporsional degen so'z. Bunnan difrakciya menen interferenciyyada ekrandag'i' fotonlardi'n' ti'g'i'zli'g'i'ni'n' bo'listiriliwi difrakciyalang'an 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'. $E(r,t)$ maksimal bolg'an ori'narda $N_f(r,t)$ shaması' da maksimalli'q ma'niske iye boladı'.

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

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 usi'l yamasa a'sbap joq. Sonli'qtan ekranda jaylasti'ri'lg'an fotonlardı'n' sshetshikleri $\hbar\omega$ energiya kvanti'n esapqa aladı' yamasa hesh na'rsemi de esapqa almaydı'. 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 $|E(r,t)|^2$ shaması'ni'n' ja'rdeinde ani'qlanadı'. Demek $|E(r,t)|^2$ shaması' fotondı'ken'isliktin' berilgen noqati'nda tabi'wdi'n' itimalli'g'i'n ani'qlaydı'.

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'raydı'. Bul da eksperimentalı'q fakt boli'p tabi'ladi'. Fotondı' ta'riyiplegen si'yaqli' erkin elektronı' da sa'ykes tolqi'n funkciyasi' ja'rdeinde ta'riyiplew mu'mkin:

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

Bul an'latpada $\omega = p^2/(2\hbar m)$, $\mathbf{k} = \mathbf{p}/\hbar$. $\Psi(\mathbf{r},t)$ funkciyasi'ni'n' fizikalı'q ma'nisi mi'nadan ibarat: Oni'n' modulinin' kvadrati' $|\Psi|^2 = \Psi\Psi^*$ elektronı' t waqi't momentinde ken'isliktin' \mathbf{r} noqati'nda tabi'wdi'n' itimalli'g'i'na ten'. Elektron ushi'n de Brogl 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'siyetlerge iye. Bul kvantlı'q-mexanikali'q dualizm boli'p tabi'ladi'.

A'dette bo'lekshenin' tipi ha'm oni'n' hali' turaqli' xarakteristikalar menen ani'qlanadı'. 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'qlaydı'. Kvantlı'q mexanikada bolsa dinamikali'q xarakteristikalarg'a Geyzenbergtin' ani'qsi'zli'q principinen kelip shi'g'atug'i'n shekler qoysi'ladi':

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

Bul an'latpalarda \hbar arqali' Plank turaqli'si' belgilengen.

Bo'lekshe noqatlı'q obekt emes. Barlı'q dinamikali'q xarakteristikalardı' 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 kvantlı'q obektlerge (bo'lekshelere) qollanı'wdi'n' shegin ko'rsetedi.

U'zliksizlik ha'm diskretlik tu'siniklerin birlestiriw ushi'n kvantlı'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'yli' 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 kvantları' maydanlardı'n' elementar qozi'wlari' dep ataladi'. Bul qozi'wlar bo'leksheler si'pati'nda ani'qlanadı'. Elementar qozi'wlardi'n' energiyasi' bo'lekshenin' massasi'n ani'qlaydı':

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

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'yli' 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 parametrди 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 ayt'i'ladi'. Birinshi jaqi'nlası'wda neytron elektromagnit maydani' menen ta'sirlespeydi. Oni'n' elektr zaryadi' nolge ten'. Solay etip elementar bo'lekshelerdi kvantli'q maydanlardı'n' elementar qozi'wlari' dep qarawg'a boladi' eken.

Zatlardi'n' strukturali'q birlikleri

Bo'lekshelerdin' korpuskulalı'q-tolqi'nli'q ta'biyati' usi' bo'leksheler ta'repinen payda etilgen kondensaciyalang'an haldi'n' u'zliksizlik ha'm diskretliktin' sintezi ekenligin ko'rsetedi. Korpuskulalı'q ha'm tolqi'nli'q ko'z-qaraslar materiya qa'siyetinin' eki proekciyasi' boli'p tabi'ladi'. Bul bir haqi'yqatli'qtı'n' eki ta'repi. Biraq zattyan' konlensaciyalang'an hali'ni'n' strukturasi'ni'n' sho'l kemlestiriliwinde 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 shekleniwe boladi'. Yadrolar menen elektronlar atomlardi', al atomlar bolsa molekulalardi' 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', molekulalardi') qarap shi'g'i'w menen sheklenip olardan zatlardi' quri'w kerek pe? A'piwayi'raq ha'm quramali'raq du'zilislerdin' (na'rselerdin', obrazovanielerdin') 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' deginizimizde 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 zattyan' baslang'i'sh strukturali'q birlikleri atomlar yamasa molekulalar boli'p tabi'latug'i'n bolsa, onda yadro menen elektron arasi'ndag'i' baylani's energiyasi' yamasa molekulalardag'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' individualli'g'i' toli'q saqlanadi'. Biraq kondensaciya bari'si'nda ta'sirlesiw ku'shlerinin' shaması' ju'da' u'lken ha'm sonli'qtan atomlar menen molekulalardi'n' individualli'g'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 atomları' emes, al Na⁺ ha'm Cl⁻ ionları' boli'p tabi'ladi'. Ekinshi mi'sal retinde metallardi' ko'rsetiw mu'mkin. Metallarda kollektivlestirilgen elektronlar on' zaryadlı' ionlı'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'.

Kondensaciyalı'q ortali'qlardi'n' qa'liplesiwinde (payda boli'wi'nda) strukturali'q birliklerdin' tutqan orni'

Qondensaciyalı'q ortali'qlardi'n' qa'siyetleri:

- a) atomlardı'n' yadroları'ni'n' qa'siyetleri,
- b) atomlardı'n' elektronlı'q qabi'qları'ni'n' strukturasi',
- v) strukturali'q birlikler arası'ndag'i' ta'sirlesiw ku'shleri,
- g) strukturali'q birlikler ansamblın ta'riyipleytug'i'n statistika boyı'nsha ani'qlanadi'.

1. Yadrolar. Strukturali'q birlikler si'pati'nda yadrolardi'n' a'hmiyetli xarakteristikaları' mi'naldan ibarat: massa (protonlar menen neytronlardı'n' sani' boyı'nsha ani'qlanadi'), zaryad (protonlardı'n' sani'), qozg'ali's mug'dari'ni'n' mexanikalı'q momenti L_N , $\hbar I$ shaması'na ten' bolg'an spin (I arqali' yadroli'q kvant sani' belgilengen). Yadronı'n' spinı nuklonlardı'n' menshikli qozg'ali's momentleri menen olardi'n' orbitalı'q momentlerinin' vektorli'q qosi'ndi'si'na ten'. Neytronlar menen protonlardı'n' spinleri $\hbar/2$ ge ten'. Orbitalı'q momentler \hbar shaması'na yamasa usı' shamadan n ese u'lken boladi'. Taq sanlı' nuklonlardan turatug'i'n yadrolar yarı'm pu'tin spinge iye boladi' ($I = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$) 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 yadroldarı'n' spinleri u'lken emes: $I < 9/2$. Ten'dey sanlag'i' protonlar menen neytronlardan turatug'i'n yadrolar ushi'n $I = 0$.

Yadroldı'n' diametri shama menen 10^{-15} metrge ten'. Elektronlardı'n', protonlardı'n' ha'm neytronlardı'n' tiykarg'i' xarakteristikaları' to'mendegi kestede keltirilgen.

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

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

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

Yadroli'q giromagnitlik qatnas γ yadronı'n' magnit momenti bolg'an μ_N shaması'ni'n' onı'n' qozg'ali's momenti L_N ge qatnasi'na ten'. Bul shamanı' giromagnitlik qatnas $\gamma_0 = e/m_p$ shaması' arqali' an'latı'w qabi'l etilgen (e menen m_p protonnı'n' zaryadi' menen massası'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 shaması' a'dette μ_B^N yadroli'q magnetonlardı' o'lshenedi.

Spin menen yadroli'q magnit momentinin' bar boli'wi' menen mi'nalar baylani'sli': 1) yadroli'q magnetizm ha'm 2) elektriklilik dipollik momentleri menen magnitlik ta'sirlesiw (bul elektronlardı'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 koordinatalardı'n' jup funkciyasi' boli'p tabi'ladi', yag'ni'y $\rho(\mathbf{r}) = \rho(-\mathbf{r})$. Conli'qtan yadrolardi'n' turaqli' elektriklilik dipollik momenti nolge ten'. Biraq $I \geq 1$ bolg'an barli'q yadrolar elektriklilik kvadrupollik momentke iye boladi'. Kvadrupollik momentler yadroni'n' formasi'ni'n' (yadroni'n' formasi' haqqı'nda ga'p etkenimizde zaryadtı'n' ken'isliktegi tarqali'wi'n na'zerde tutami'z) sferalı'q simmetriyadan o'zgesheligi menen baylani'sli'. Kvadrupollik momenttin' ma'nisi yadroni'n' o'lshemlerinin' o'siwi menen birge o'sedi. Pri $I < 1$ bolg'an jag'daylarda yadrolar sferalı'q simmetriyag'a iye boladi' ha'm sonlı'qtan olardi'n' elektriklilik kvadrupollik momentleri nolge ten'.

Elektriklilik kvadrupollik 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 taslanı'wi'na ali'p keledi. Bul yadroli'q kvadrupollik 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' elektriklilik kvadrupollik momentlerinin' elektronlar menen ta'sirlesiw dipollik magnit momentlerinin' ta'sirlesiw si'yaqli' atomlar menen molekulalardag'i' elektronlardı'n' energiya qa'ddilerinin' asa juqa tu'rde qa'ddilerge aji'rali'wi'na ali'p keledi.

Yadroni'n' zaryadi' zattag'i' relyativistlik effektlerdin' shaması'n ani'qlaydi'. Mi'sali' spin-orbitalı'q ta'sirlesiw din' shaması'n ani'qlaydi'. Spin-orbitalı'q ta'sirlesiw degenimiz elektronni'n' menshikli magnit momenti menen oni'n' orbitalı'q qozg'ali'si'nan payda bolg'an magnit momenti arasi'ndag'i' ta'sirlesiw boli'p tabi'ladi'. Bunday ta'sirlesiw din' potencialı'q energiyasi' spin-orbitalı'q baylani'sti'n' energiyasi' dep ataladi'. Spin-orbitalı'q ta'sirlesiw din' energiyasi' elektronni'n' qozg'ali's tezligi V ni'n' ja'rdeminde ani'qlanadi'. Sonlı'qtan bul ta'sirlesiw relyativistlik effekt boli'p tabi'ladi'. Atomdag'i' elektronlardı'n' qozgali's tezligi yadroni'n' zaryadi'na baylani'sli' bolg'anlı'qtan awi'r atomlarda spin-orbitalı'q baylani'sti'n' energiyasi' u'lken boladi'. Spin-orbitalı'q ta'sirlesiw din' saldarı'nan spinnin' porekciyalari' menen bir birinen ayralı'tug'i'n elektronni'n' halları' ha'r ki'yli' energiyalarg'a iye boladi'. Bul atomlardag'i', molekulalardag'i', kristallardag'i' elektronlardı'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-orbitalı'q ta'sirlesiw di qarap o'temiz. Atomda elektronlardı'n' yadroni'n' do'geregindegi orbitalı'q qozg'ali'si'na baylani'sli' barlı'q waqı'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 ornalasqan noqattag'i' bul toqtı'n' magnit maydani'

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

shamasi'na ten' boladi'. Bul an'latpada $\mathbf{l} = m[\mathbf{r}\mathbf{V}] = [\mathbf{rp}]$ 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

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

shamasi'na ten'. En' baslang'i'sh koordinatalar sistemasi'nda Lorenc tu'r lendiriwinen 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 potenciali' ushi'n

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

Cferali'q koordinatalar sistemasi'ndag'i' gradient bi'layi'nsha jazi'ladi':

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

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

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

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

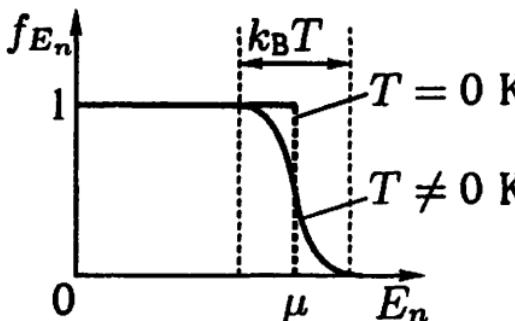
b) atomlardı'n' magnitlik orbitalı'q ha'm spinlik magnitlik momentlerin;

v) enerjiya qa'ddilerinin' strukturasi'n' ha'm atomlardı'n' optikalı'q qa'siyetlerin ani'qlaydi'.

3. Strukturalı'q birlikler ansambllerinin' statistikası'. Statistika bo'lekshelerdin' enerjiya qa'ddileri boyı'nsha bo'listiliriiwin ani'qlaydi'. Eger bo'leksheler yarı'm pu'tin spinge iye bolsa, onda olar Fermi-Dirak statistikası'na ha'm Pauli principine bag'i'nadi'. Bul princip boyı'nsha spin menen impulsin' berilgen ma'nisine iye ha'r bir halda tek bir bo'lekshe g'ana tura aladi'. Pu'tin spinge iye bo'leksheler Boze-Eynshteyn statistikası'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 shaması'na ten' bolg'anda (usi'ni'n' menen birge E_n energiyasi'na iye haldag'i' bo'leksheler sani' n_E haqqı'nda da aytı'wg'a boladi')

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

formulası' menen ani'qlanadi'. Bul an'latpada μ arqali' ximiyalı'q potencial, k_B arqali' Boltzman turaqlı'si' belgilengen. (15)-g'a'rezlik eki temperatura ushi'n to'mendegi 1-su'wrette keltirilgen.



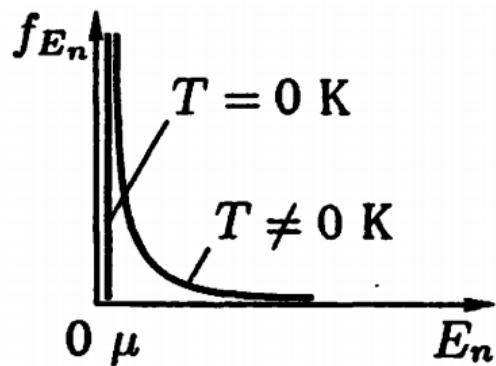
1-su'wret.
 $T = 0$ ha'm $T \neq 0$ temperaturalardag'i'
 Fermi-Dirak bo'listiriliwinin' tu'ri.

$E_n < \mu$ ha'm $T = 0$ bolg'anda $f_{E_n} = 1$, yag'ni'y energiyasi' μ energiyasi'nan kishi bolg'an hallardi'n' barlı'g'i' da toltı'ri'lg'an. $E_n > \mu$ ha'm $T = 0$ bolg'anda barlı'q hallar bos. Bunday bo'listiriliw eki talaptı'n' ori'nlanı'wi'ni'n' na'tiyjesi boli'p tabi'ladi': energiyani'n' minimalli'g'i'ni'n' ha'm Pauli principinin'. Erkin elektronlar ushi'n toltı'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'patı'nda ani'qlaydi'. $T > 0$ bolg'anda Fermi-Dirak bo'listiriliwi $\approx k_B T$ shaması'na sozi'ladi' (razmi'vaetsya). Bul jag'day 1-su'wrette keltirilgen.

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

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

formulası'ni'n' ja'rdeinde 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 arası'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' potenciali'q energiyasi'ni'n' u'lkeyiwine ali'p keledi. Tiykarg'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 ayt'i'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 magnetizmdi.

Ta'sirlesiw ku'shleri. Ta'sirlesiw ku'shleri mi'nalardi' ani'qlaydi': 1) strukturani', 2) sistemani'n' qatt'i'li'g'i'n, 3) konlensaciyalang'an ortali'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 polyarizaciyal'i'q ku'shler dep ataydi'. Dara jag'dayda bunday ta'sirlesiw din' ori'n ali'wi'ni'n' saldar'i'nan asa o'tkizgishlik qubi'li'si' ju'zege keledi.

1. Kristalli'q pa'njere

Kristalli'q qatt'i' denelerdin' en' basli' o'zgesheligi olardi' payda etiwhi atomlardi'n' yamasa molekulalardi'n' ken'isliktegi da'wirli tu'rde jaylasi'wi' boli'p tabi'ladi'. Sol atomlar menen molekulalar ken'isliklik u'sh o'lshemli kristalli'q pa'njereni payda etedi. Kristallardi'n' duri's geometriyali'q formalarg'a iye boli'wi' atomlardi'n' da'wirli jaylasi'wlari'na baylani'sli'. Kristalli'q pa'njeredegi atomlardi'n' anizotropiyali'q jaylasi'wlari' qatt'i' denelerdin' texnikada ken' tu'rde qollani'latug'i'n ko'p sandag'i' anizotropiyali'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 potenciali'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'rde minde kristallardag'i' elektronlardi'n' energiyali'q qa'ddilerinin' jaylasi'wlari'ni'n' o'zgeshelikleri ani'qlanadi'. Kristalli'q pa'njeredegi elektronlardi'n', fotonlardi'n', neytronlardi'n' difrakciyalari' qatt'i' denelerdin' quri'li'si'n izertlewdin' en' ko'p informaciyag'a iye usi'llari' boli'p tabi'ladi'. Buzi'qli'qlar, yag ni'y kristalli'q pa'njerenin' defektleri bolsa qatt'i' denelerdin' barli'q qa'siyetlerine ju'da' ku'shli ta'sir etedi.

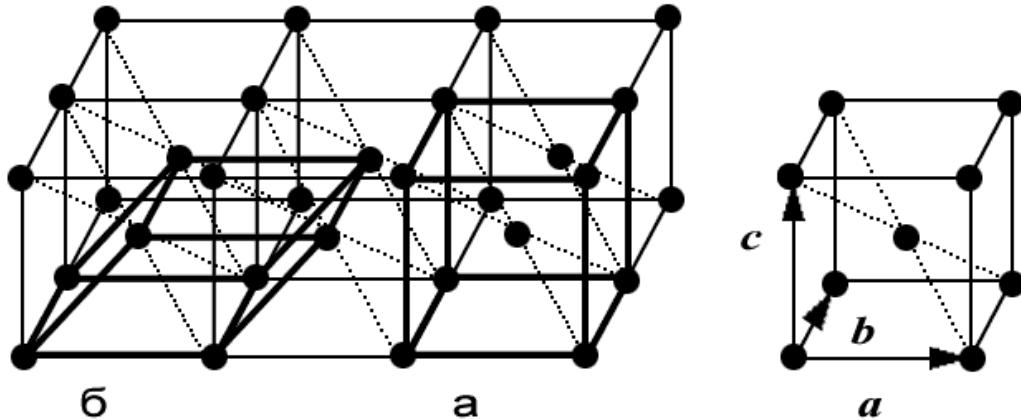
Biz to'mende kristalli'q pa'njere tu'siniginin' ja'rdeinde kristallardi' ta'riplewdin' usi'llari'n, kristallardi'n' payda boli'wi'ni'n' fizikali'q sebeplerin ha'm bo'lekshelerdin' kristallardag'i' difrakciyasi'ni'n' o'zgesheliklerin qarap shi'g'ami'z. Bunnan keyingi lekciyalarda qarap shi'g'i'latug'i'n qatt'i' denelerdin' ha'r qi'yli' qa'siyetleri usi' lekciyalardag'i' tu'sinikler menen koncepciyalarg'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 keltiriwimiz 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'n'i'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 ximiyalı'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 ilinisken molekulali'q toparlar bar boladi' (muz kristallar, ko'plegen magnitlik materiallardı'n' kristalları'). Beloklardi'n' elementar quti'shalari' bolsa o'z ishine bir neshe mi'n' atomlardı' 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'zinен 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 tolti'ri'lg'an ken'islik tu'rinde su'wretlegen qolayli'. Kublardı'n' mu'yeshlerinde (1) ha'm orayi'nda (2) temir atomlari' jaylasqan 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 atomlardı'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} translyaciyalari' 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.

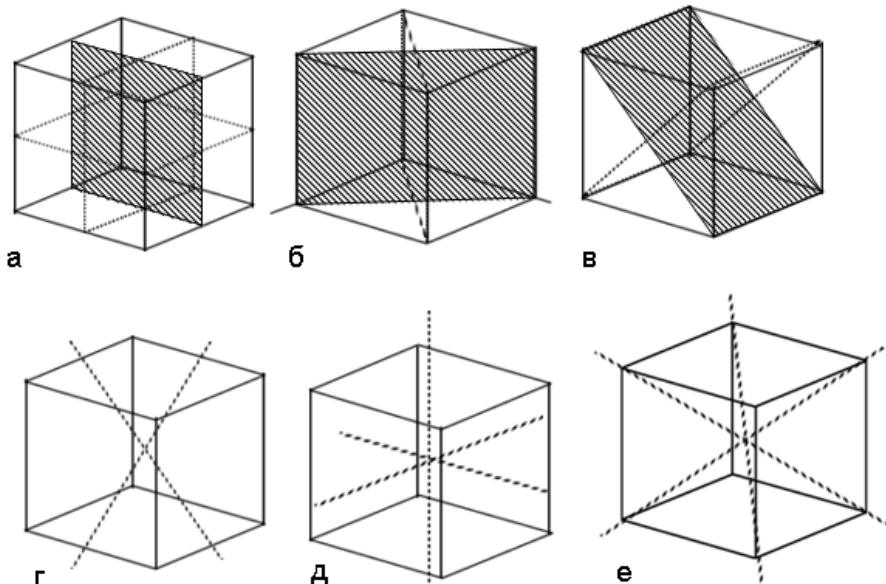
Ken'isliklik pa'njereni a'dette \vec{a} , \vec{b} , \vec{c} vektorlari' ja'rdeinde xarakterleydi. Buni'n' ushi'n usi' vektorlardi'n' uzi'nli'g'i' a, b, c shamalari'n ha'm olar arasi'ndag'i' mu'yeshler α, β, γ lardi' beriw kerek. a, b, c shamalari'n kristalli'q pa'njerinin' da'wirleri dep ataydi'. Bul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

Bazisti $\vec{r}_i = x_i\vec{a} + y_i\vec{b} + z_i\vec{c}$ radius-vektorlari'ni'n' ja'rdeinde bir quti'shada beriw arqali' ani'qlaw qabi'l etilgen. x_i, y_i, z_i sanlari' atomlardı'n' qaysi' ori'nlerda 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 atomlardı'n' sani'n esaplaw menen a'melge asi'ri'ladi'. Elementar quti'shani'n' ishindegi atomlar sani'na kaptal betler ta'repinen kesilgen yari'm, to'rtten bir, segizden bir atomlardı'n' sanlari' qosi'ladi'. 1.1 (b) su'wrette keltirilgen quti'shada to'belerde jaylasqan mu'yeshlik segizden birlilik 8 atom jaylasqan. usi'g'an baylani'sli' bunday bazis koordinatalari' 000 bolg'an 1 atomnan turadi' dep esaplaydi'. Kristallografiyada atomlardı'n' koordinatalari'n a'dettegi $\langle \rangle$ tu'rindegi qawsı'rmag'a almaydi'. Sebebi bunday qawsı'rma ja'rdeinde kristallografiyali'q 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 birlilik 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' simmetriyası'. Ko'pshilik zatlardi'n' kristalli'q pa'njereleri bir neshe simmetriya elementlerine iye boladi'. Simmetriya elementleri menen simmetriyali'q operaciyalar baylani'sqan. Simmetriyali'q operaciyalar 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'rtili 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'sinshi, ekinshi ta'rtili simmetriya ko'sherleri). Basqa tu'rdegi simmetriya elementleri qatari'na simmetriya tegisligin (bunday tegislikti 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'rtili 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'rtili 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'rtili simmetriya ko'sheri.

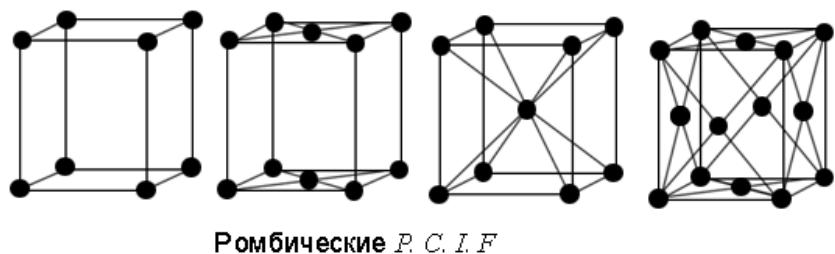
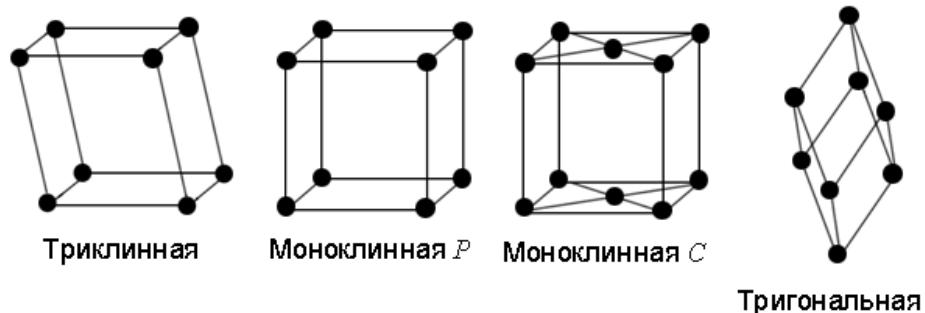
1.2-su'wrettegi kubli'q pa'njere qaptal betlerine parallel bolg'an u'sh simmetriya tegisligine, qaptal betlerdin' diagonallari'na perpendikulyar bolg'an alti' dana diagonalli'q simmetriya tegisligine, u'sh to'rtinshi ta'rtili simmetriya ko'sherine, alti' dana ekinshi ta'rtili simmetriya ko'sherine, to'rt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

Kristalli'q pa'njelerlerdin' tipleri. Toparlар teoriyası' ja'rdeinde kristallardı'n' barlı'g'i'n 14 dana kristalli'q pa'njerenin' ja'rdeinde ta'riplewdin' mu'mkin ekenligin ko'rsetti. Bunday pa'njelerlerdi Brave pa'njelerleri dep ataymi'z ha'm olardi'n' su'wretleri 1.3-su'wrette keltirilgen. Olardi' elementar qutı'shalari'ni'n' tu'ri boyi'nsha ayri'latug'i'n jeti sistemag'a bo'liw qabi'l etilgen:

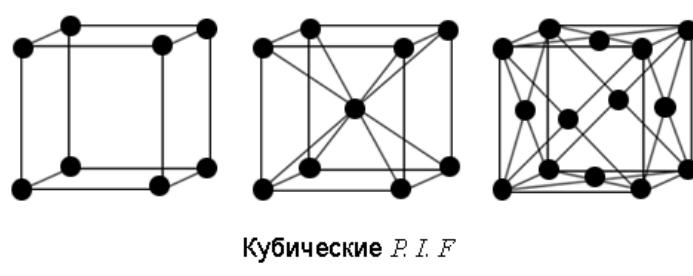
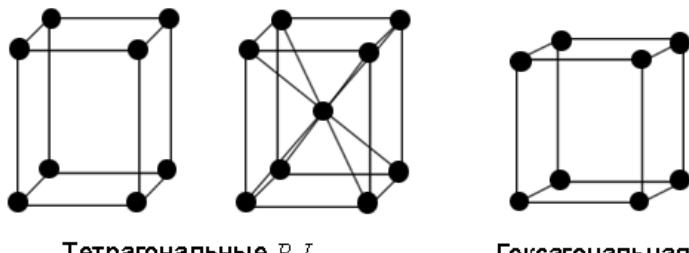
- triklinlik,
- monoklinlik,
- rombali'q,
- tetragonalli'q,

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'njereleldin' 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'rtipli simmetriya ko'sheri.

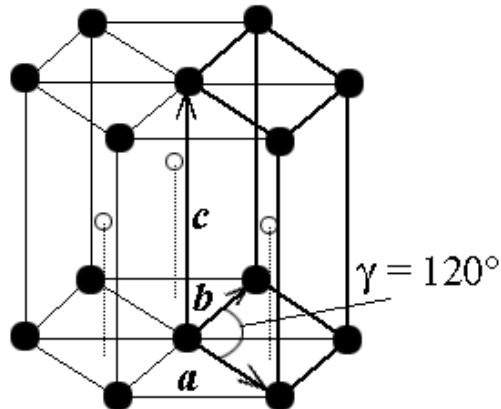
3. Rombali'q sistemada elementar quti'sha tuwri' mu'yeshli ha'm ha'r qanday uzi'nli'qtag'i' qabi'rg'alarg'a iye. Quti'sha kristalli'q pa'njererin' barli'q 4 tu'rlerine iye: P, I, F, A (B yamasa C). Bunday pa'njerede simmetriya elementlerinin' sani' ko'p: qaptallarg'a parallel bolg'an u'sh simmetriya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

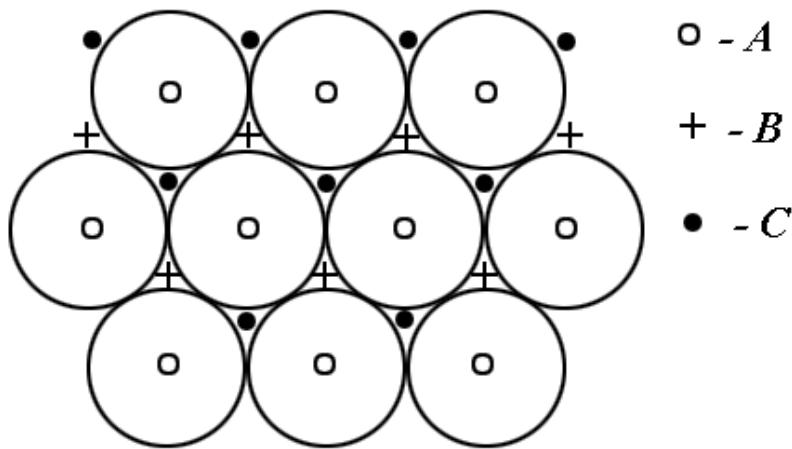
5. Kubli'q sistemada quti'sha kub tu'rine iye. Quti'shani'n' qaptal betleri oraylasqan (qaptaldan oraylasqan kub yamasa QOK), quti'shani'n' orayi' oraylasqan (ko'lemde oraylasqan kub yamasa KOK) yamasa pu'tkilley oraylaspag'an boli'wi' mu'mkin (primitivlik yamasa P-pa'njere). Bul en' joqari' simmetriyag'a 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' paydalananadi' (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'rtipli simmetriya ko'sheri ani'q ko'riniq 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'njerelerde 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'njererin' 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 (tipleri) $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ vektorlari'n saylap ali'w joli' menen joqari'da keltirilgen tiplerdin' birewine ali'p kelinedi.

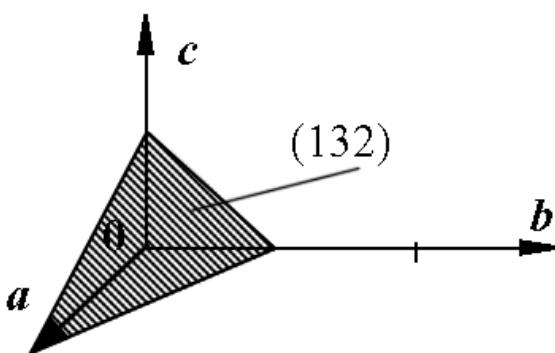
Pa'njerenin' simmetriyasi' fizikali'q qa'siyetlerdin' anizotropiyasi'n ani'qlaydi' (ha'r qi'yli' bag'i'tlar boyi'nsha fizikali'q shamalardi'n' ha'r qi'yli' boli'wi'). Bazi' bir fizikali'q qa'siyetlerdin' anizotropiyasi'n elementar quti'shani'n' tu'ri boyi'nsha boljawg'a boladi'. Mi'sali' sali'sti'rmali' az sandag'i' simmetriya elementlerine iye rombali'q, monoklinlik ha'm triklinlik pa'njereler ushi'n ko'p xarakteristikalaridi'n' anizotropiyasi' belgili (mi'sali' sali'sti'rmali' elektr sin'irgishlik, ji'lli'li'q o'tkizgishlik koefficienti ha'm basqalar). Zatlardi'n' bunday xarakteristikalarini a'dette ekinshi ta'rtipli tenzorlardi'n' ja'rdeminde ta'ripleydi. Simmetriyali' kubli'q pa'njerede bul shamalar skalyar shamalarg'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'wdi'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'qtin' 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 rombali'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.

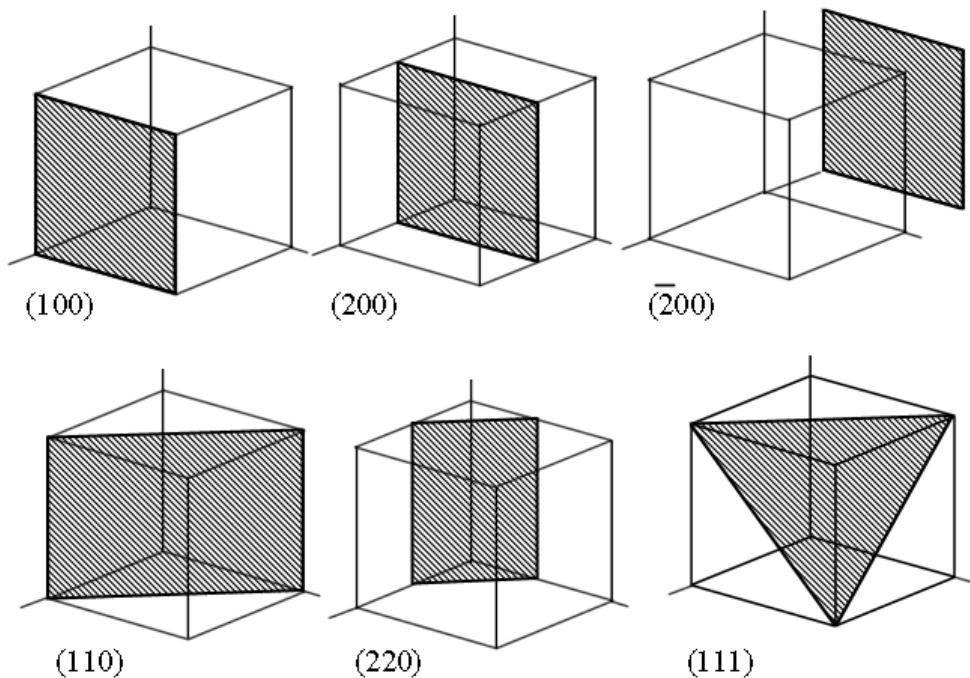
Kristalli'q pa'njeredegi bag'i't. Kristalli'q pa'njeredegi bag'i'tti' $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ bazislik vektori'ndag'i' bag'i'tlawshi' vektordi'n' koordinatalari' menen beredi. Bul koordinatalardi' a'dette kvadrat qawsir malarg'a ali'p jazadi'. Koordinatani'n' ma'nisi teris bolg'andag'i' minus belgisin sanni'n' u'stine minus belgisin qoyi'w menen a'melge asi'radi'. En' a'hmiyetlirek 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. [100] ha'm [110] bag'i'tlari' oni'n' to'mengi ultani'na parallel. Bazi' bir bag'i'tlar pa'njerenin' simmetriyali'g'i'na baylani'sli' birdey (mi'sali' kubli'q pa'njerede [110],]101], [011] ha'm [110] bag'i'tlari'). Bag'i'tlardi'n' usi'nday semeystvosi'n ta'riplew ushi'n <110> belgilewi qabi'l etilgen.

Kristallografiyali'q tegislikler. Kristalda kristalli'q pa'njerenin' tu'yinleri arqali' o'tetug'i'n kristallografiyali'q tegislikler u'lken a'hmiyetke iye boladi'. Kristalli'q pa'njerenin' tu'yinlerinin' en' ko'pshiligi jaylasqan kristallografiyali'q tegislikler kristallardi'n' qaptallari'n boljag'anda da, usi' tegislikler boyi'nsha bo'lekshelerdin' qozg'ali'slari'n qarag'anda da ju'da' u'lken a'hmiyetke iye.

Kristallografiyali'q tegisliklerdi 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 indekstin' teris belgisin joqari'si'na jazadi'. Bunday indeksler a'piwayi' geometriyali'q mag'anag'a iye. Eger $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ vektorlari' ja'rdeinde berilgen u'sh koordinatali'q ko'sheri boyi'na sa'ykes $\frac{a}{h}, \frac{b}{k}, \frac{c}{l}$ shamasi'ndag'i' kesindilerdi ju'rgizse (1.5-su'wretti qaran'i'z), onda ali'natug'i'n u'sh noqatlar arqali' o'tetug'i'n (hkl) tegislikleri bir ma'nislani'qlaydi'. 1.6-su'wrette (100), (200), ($\bar{1}10$), (110), (111) tegislikleri ko'rsetilgen. 1.5-su'wrettegi tegislikke parallel etip kristalli'q pa'njere tu'yinleri arqali' o'tiwshi ha'm bir birinen $na/h, nb/k, nc/l$ qashi'qli'g'i'nda turg'an (n arqali' pu'tin san belgilengen) ko'p sandag'i' tegisliklerdi saylap ali'w mu'mkin ekenligin an'g'ari'wg'a boladi'. Sonday tegislikler arasi'ndag'i' qashi'qli'qti' d_{hkl} arqali' belgileydi ha'm (hkl) tegislikler semeystvosi' ushi'n tegislikler arasi'ndag'i' qashi'qli'q dep ataydi'. d_{hkl} shamasi'n (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). Kubli'q quti'shadag'i' iye kristallarda Miller indekslerinin' ma'nisleri usi' tegisliklerge tu'sirilgen normaldi'n' bag'i'ti'ndag'i' vektordi'n' indekslerine sa'ykes keledi. Biraq basqa tu'rdegi elementar quti'shalar jag'dayi'nda bunday sa'ykeslik ori'n almaydi'.



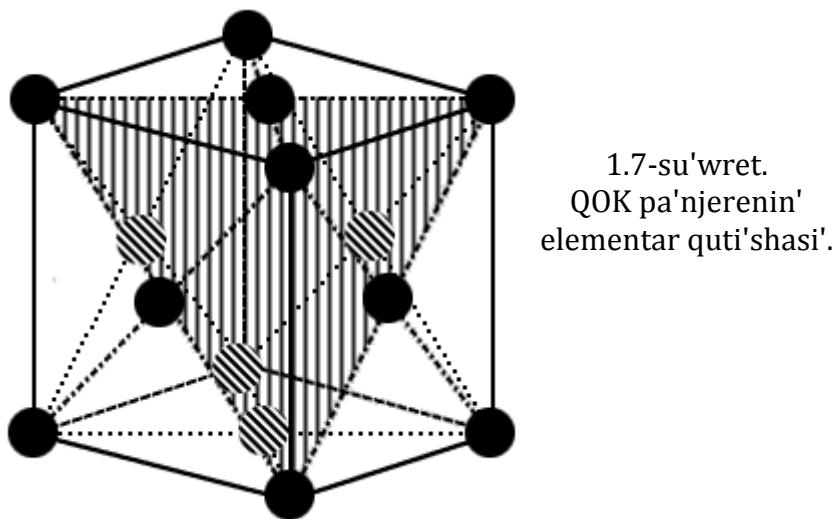
1.5-su'wret.
Kristaldag'i' Miller
indeksinin' geometriyali'q ma'nisi.



1.6-su'wret. Kubli'q pa'njerenin' bazi' bir kristallografiyali'q tegislikleri.

Jiyi ushi'rastug'i'n strukturalar menen tanı'sami'z.

Qaptalda oraylasqan kubli'q pa'njere 1.7-su'wrette keltirilgen elementar quti'shag'a iye boladi'. Tu'yinler kubti'n' to'belerinde 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'rinipli 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'yinlerinde jaylasqan.

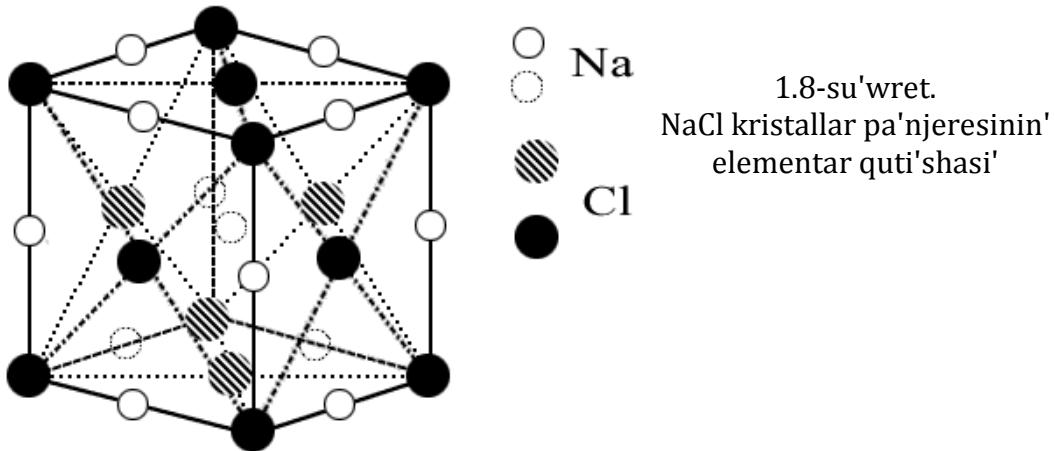


NaCl tipindegi quri'li'sti' (1.8-su'wret) QOK pa'njere tu'rinde ko'rsetiw mu'mkin. Bunday pa'njerede natriy ionlari' tu'yinlerge sa'ykes keledi, al xlor ionlari' bolsa Na ionlari'na sali'sti'rg'anda kubti'n' ko'lemlilik diagonali' boyi'nsha $a/2$ shaması'na ji'li'sqan. Bul jag'dayda Bravenin' QOK pa'njeresinin' 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:

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

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

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'.



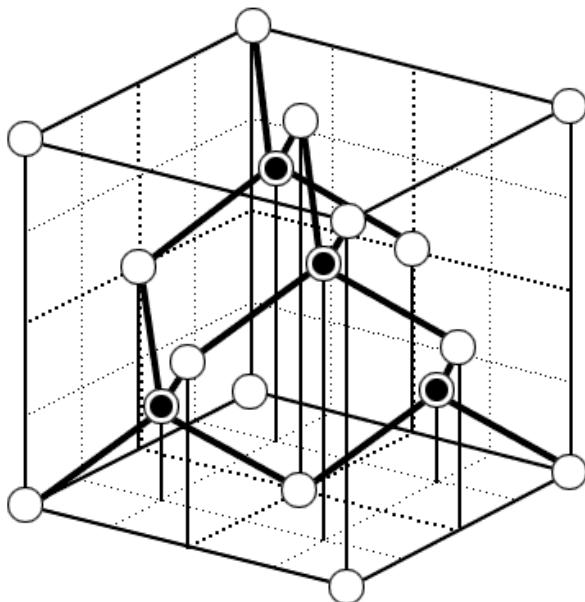
Almazdi'n' strukturasi' (1.9-su'wret) QOK pa'njere si'pati'nda ko'rsetiwge boladi'. Bul jag'dayda pa'njereni atomlari' tu'yinlerde ha'm ko'lemlik diagonal boyi'nsha olarg'a sali'sti'rg'anda ken'isliklik diagonaldi'n' $\frac{1}{4}$ bo'legine ji'li'sti'ri'lq'an eki pa'njerenin' qos'i'ndi'si' tu'rinde ko'z 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:

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



1.9-su'wret.

Almazdi'n' (aq sharikler de, qara sharikler de uglerod atomlari') ha'm cink sulfidinin' (qara sharikler ku'kirt atomlari', aq sharikler cink atomlari') elementar quti'shasi'.

Ha'r bir uglerod atomi'ni'n' ken'isliklik diametrin' $\frac{1}{4}$ shamasina 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' tetraedrin' orayi'nda jaylasqan boli'p, sol tetraedrin' to'belerinde de uglerod atomlari' ornalasqan. 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 tipindegi 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' jayiasi'wlari'ni'n' da'wirligi payda boladi'. Bunday da'wirli quri'li'sti' bi'layi'nsha jazami'z: ABABAB ... 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' $\frac{c}{a} = (8/3)^{1/2} = 1,633$ shamasi'n 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' kobalitta $\frac{c}{a} = 1,622$, 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 ... izbe-izligindegi jaylasti'ri'wlari' ju'zege keledi. Bunday jag'dayda da jaqi'n qon'i'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 ayt'i'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'njerelerge 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'njererin' 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'lgermeggen halda saqlani'p qaladi'. Bunday situaciya shi'ni'qt'i'ri'wdan (birden salqi'nlati'wdan) keyingi polatlarda (Fe-C quymalari'nda) ori'n aladi'. Shi'ni'qt'i'ri'wdi'n' aqi'betinde QOK ha'm KOK pa'njerelerge iye oblastlardi'n' quramali' sistemasi' payda boladi'. Ha'r qi'yli' pa'njerelerge 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'njererin' 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 shaması'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'rdeinde esaplaymi'z. \vec{a} ha'm \vec{b} vektorlari' arasi'ndag'i' φ mu'yeshinin' kosinusu'n

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

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

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

Quti'shani'n' ko'lemi eki atomg'a iye KOK pa'njererin' 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 shamasi'na ten' kubti'n' qabi'rg'alari' boyi'nsha alsaq). Saylap ali'ng'an atomnan usi' atomlarg'a shekemgi qashi'qli'q analitikali'q geometriyani'n'

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

formulası'ni'n' ja'rdeinde esaplanadi' ha'm barli'q jaqi'n jaylasqan qon'i'si'lar ushi'n $a^{\frac{\sqrt{3}}{4}}$ shamasi'na 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 $\text{Cos}[\varphi]$ shamasi'n

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

formulası'ni'n' ja'rdeinde 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' atomlardı'n' ayri'qsha tu'rde jaylası'wlari' menen baylani'sli'. biraq usi' jag'daylarg'a 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 atomlardı'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'sirlesiwinin' elektrostatikali'q energiyasi' tiykarg'i' ori'ndi' iyeleydi. Ayi'ri'm jag'daylarda magnitlik ta'sirlesiwdin' de u'lesi ko'rinedi. Biraq magnitlik ta'sirlesiwdin' u'lesi elektrostatikali'q ta'sirlesiwdin' 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 simmetriyag'a iye boladi'. Sonli'qtan atomlar da bir biri menen simmetriyali' bolg'an quri'li'slardı' 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' xarakteristikaları' boyi'nsha bir birine jaqi'n atomlar atomları'ni'n' jaylası'wi' bir birine sa'ykes keletug'i'n strukturalardi' payda etedi. Kristallardi'n' du'zilisinin' uli'wmali'q ni'zamli'qları'n bile oti'ri'p jan'a quri'li'slardı' boljaw, qolda bar kristalli'q materiallardı'n' fizikali'q ha'm texnologiyali'q qa'siyetlerin jaqsı'law mu'mkin.

Ha'zirgi waqi'tlari' atomlardı'n' bir biri menen baylani'si'ni'n' xarakteri 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'nlardı' iyeleydi.

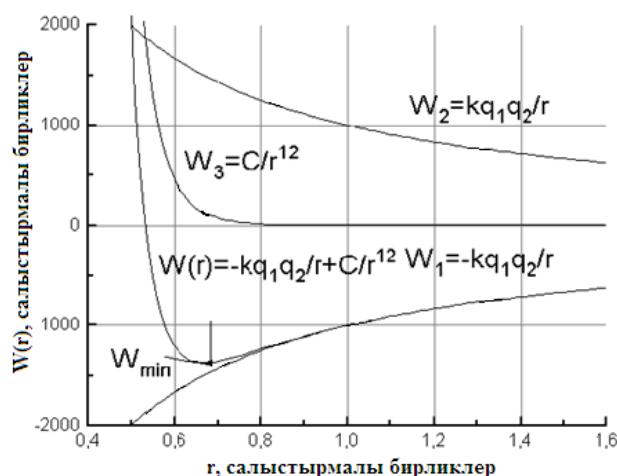
Kristallardi' joqari'dag'i'day ta'rтиpte bo'liwdin' qatan' tu'rdegi qag'i'ydasi' joq. Sebebi sonday tiplerdin' arasi'ndag'i' baylani'sqa iye kristallar da az emes. Baylani'sti'n' bir bo'legi kovalentlik, al qalg'an bo'legi vodorodli'q bolg'an kristalli'q zatlar de bar. Endi kristallardi' baylani'sti'n'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

Ionli'q kristallar. Ionli'q kristallar birdey beglige iye ionlardi'n' iyterisiwinin' ha'm qarama-qarsi' belgilerge iye zaryadlarg'a iye ionlardi'n' bir birine tarti'si'wi'ni'n' na'tiyjesinde qa'lipesedi. 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 iyteriw ku'shleri payda boladi'. Usi'ni'n' saldari'nan 1- ha'm 8-su'wretlerde keltirilgen strukturalarday strukturalar jiyi 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 tendencyasi' ko'rinp 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'nli'g'i'n esaplaymi'z. Bunnan keyin usi'nday esaplawlar na'tiyjeleri paydalani'p ionlardi'n' kristallardi'g'i' baylani's energiyasi'n tabami'z. Esaplawi' bir birinen r qashi'qli'g'i'nda turg'an q_1 ha'm q_2 zaryadli' ionlar jubi' arasi'ndag'i' potencialli'q energiyani' qaraymi'z:

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

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



1.10-su'wret.

Eki ionni'n' ta'sirlesiw energiyasi' $W(r)$ shamas'i 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 qosip shi'g'adi' (summatalaydi'). Esaplawlarda kristaldi' ju'da' u'lken dep esaplaydi' ha'm betlik effektlerdi esapqa almaydi'. Esaplang'an qosipndi' (summa) kristaldag'i' saylap ali'ng'an ionni'n' energiyasi'n beredi. Bunnan keyin bul energiyani'

pa'njere turaqli'si' *a* ni'n' funkciyasi' dep esaplap energiya minimumg'a iye bolatug'i'n *a* shamasi'ni'n' ten' salmaqli'q ma'nisin ani'qlaydi'. Esaplang'an energiyani'n' *a* boyi'nsha ekinshi ta'rtipli tuwi'ndi'si'n da esaplaw mu'mkin. Bunday jag'dayda serpimliktin' ko'lemlik moduli bolg'an $B = -V(dp/dV)$ shamasi'n esaplaw mu'mkinshilige 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'lq'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'tiyjesinde elektronlardi'n' bir atomnan ekinshisine o'tiwinin' na'tiyjesinde payda boladi'. Usi'ni'n' aqi'betinen atomlar arasi'nda eki atomdi' bir birine tartatug'i'n teris zaryadti'n' qoyi'wlas'i'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'njereleri 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'i'tlari' 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'yaql'i' tu'siniklerdi jiyi 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.

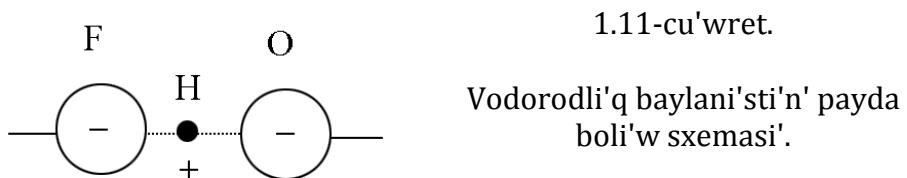
Kovalent ha'm ionli'q kristallar arasi'nda kristallardi'n' ko'p sanli' arali'qli'q tipleri bar. Bunday kristallardag'i' baylani's kovalentlik ha'm polyar. Bunday baylani'sta kovalentlik baylani'sqa juwap beretug'i'n elektronli'q ti'g'i'zli'qt'i'n' u'lkenirek ma'niske iye bolg'an ori'nlerda ionlardi'n' birine qaray awi'sqan. Usi'ni'n' saldar'i'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 tolg'an atomlar arasi'nda payda boladi' (siltli 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 eksperimenterde 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 eksperimenterde). 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'sirlesowi metaldag'i' atomlardi'n' jaylas'i'wi'ni'n' ta'rtiplesiwine 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'yin ma'seleler qatari'na kiredi ha'm sonli'qtan bunday esaplawlardi' keltirmeymiz.

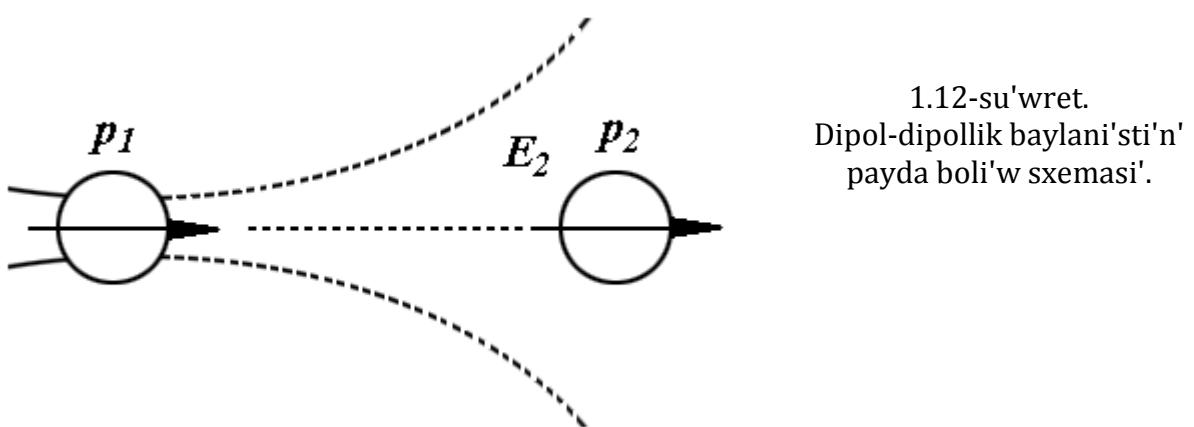
A'dette metallar ti'g'i'z jaylasti'ri'lg'an kristalli'q pa'njerelerdi payda etedi (ti'g'i'z etip jaylasti'ri'lg'an geksagonalli'q, QOK yamasa KOK).

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' saldarisi'nan vodorod atomi' shekli jag'dayda protong'a aylanadi'. Bul protong'a ko'pshilik jag'daylarda eki teris zaryadlang'an ion arasi'nda ornalaşqan 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 ioni' menen tartasi'wi'ni'n' saldarisi'nan energiyasi' shama menen 0,1 eV bolg'an bekkem baylani's payda boladi'. Vodorod ioni'ni'n' kishiliginen ol tek eki atomdi' bir biri menen baylani'sti'radi'.



Vodorodli'q baylani's biologiyali'q molekulalarda ha'm kristallarda a'hmiyetli ori'ndi' iyeleydi. Mi'sali' DNK molekulasi'ni'n' eki spirali'ni'n' bir biri menen baylani'si'wi' vodorodli'q baylani'sti'n' ori'n ali'wi'ni'n' saldarisi'nan ju'zege keledi. Ayi'ri'm kristallardi'n' segnetoelektriklik (ferroelektriklik) qa'siyetleri ha'm suw menen muzdi'n' molekulalari'ni'n' 0°S temperaturadag'i' qa'siyetleri olarda vodorodli'q baylani'slardi'n' ori'n alatug'i'nli'g'i'n 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' ishindigi 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 aqqi'n ko'rinedi.



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'sirlesiwin qarayimi'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 zamatl'i'q dipol momenti p_1 shamas'i'ni'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' polyarizaciyal'i'wshi'li'g'i' belgilengen. Eki dipol arasi'ndag'i' ta'sirlesiw energiyasi' $p_1 p_2 / r^3$ shamas'i'na proporsional. Sonli'qtan eki atom arasi'ndag'i' ta'sirlesiw energiyasi' $1/r^6$ shamas'i'na proporsional boli'p, ma'nisi ju'da' kishi ha'm qashi'qli'qtin'o'siwi menen tez kemeyetug'i'n shama boladi'. Sonli'qtan Van-der-Vaals ta'sirlesowi 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' $1/r^6$ shamas'i'na proporsional bolg'an ta'sirlesiw energiyasi'na $1/r^{12}$ shamas'i'na proporsional bolg'an atomlar arasi'ndag'i' iyterilis energiyasi'n qosip kristalli'q pa'njererin' 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'hadan 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'jar 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 potencialli'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' $W(r) = 12 \left(\frac{C}{r^{12}} - b/r^6 \right)$ formulas'i' 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 Boltzman turaqli'si'na bo'lip eriw (balqi'w) termperaturasi'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'nlerda 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'rdeinde 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'rdeinde bir neshe atomlardi'n' o'lshemlerindey bolg'an bir tekli emes ori'nardi' baqlawg'a boladi'. Ionli'q mikroskoplar principinde iri atomlardi' baqlaw mu'mkinshilige iye bolsa da olardi' paydalani'w og'ada qi'yi'n. Bunday asbap-u'skenelerdin' ja'rdeinde atomlar arasi'ndag'i' qashi'qli'qlardi' ani'qlaw ma'selesi 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'yreniwdin' en' effektivlik usi'lli' mikrobo'leksheler: fotonlardi'n', elektronlardi'n', neytronlardi'n' difrakciyasi' boli'p tabi'ladi'. Kristallar menen molekulalardi'n' quri'li'si' haqqi'nda spravoshnikerde keltirilgen mag'li'wmatlardi'n' barli'g'i' da tap usi' usi'ldi'n' ja'rdeinde ali'ng'an.

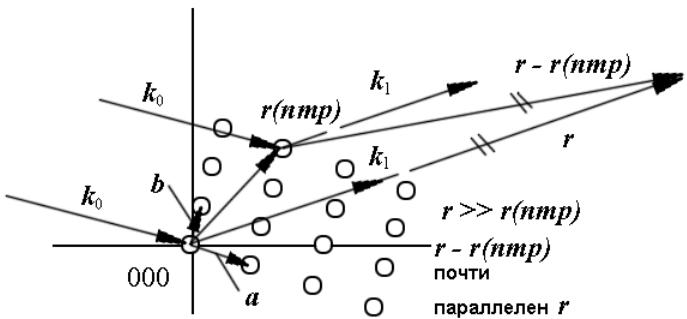
Kristallardi' difrakciyali'q usi'llar menen izertlegende kristalli'q u'lgiye bo'lekshelerdin' derlik parallel da'stesin bag'i'tlaydi', usi' bo'lekshelerdin' difrakciyasi'ni'n' ha'r qi'yli' bag'i'tlar boyi'nsha intensivliginin' tarqali'wi'n u'yrenedi (geypara jag'daylarda kristaldi'n' ha'r qi'yli' orientirovkalarini'nda), al bunnan keyin difrakciyali'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'rdeinde kristalli'q pa'njerenin' da'wirlerin 4-5 belgige shekemgi da'llikte ha'm bazistegi atomlardi'n' jaylasi'wlari'n ani'qlaydi'.

Kristalli'q denelerdegi 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 energiyaları' $E = 5-20$ keV shaması'ndag'i' fotonlar (rentgen ha'm gamma nurları'), energiyası' $E = 10-100$ eV bolg'an elektronlar ha'm energiyası' $E = 0,01-0,1$ eV bolg'an neytronlar iye boladi' (bunday neytronlardı' ji'lli'li'q neytronları' dep ataydi' ha'm oni'n' energiyası'ni'n' shaması' kT g'a barabar). Joqari'da atlari' atap o'tilgen u'sh tu'rli bo'leksheler (fotonlar, elektronlar ha'm neytronlar) kristallardi' difrakciyali'q izrtlewlerde qollani'ladi'. Fotonlardı'n' difrakciyasi'n baqlaw en' an'sat difrakciyali'q usi'llardi'n' biri boli'p tabi'ladi'. Sonli'qtan fotonlardı'n' (rentgen nurları'ni'n') difrakciyasi' elektronlardı'n' difrakciyasi'n paydalani'wg'a sali'sti'rg'anda ju'da' ko'p qollani'ladi'. Elektronlardı'n' difrakciyasi' baqlaw ushi'n joqari' vakuum (bunday vakuum elektron mikroskopı'ni'n' ishinde ali'nadi'), al neytronlardı' paydalani'w ushi'n olardi'n' deregi retinde u'lken yadroli'q reaktor talap etiledi. Neytronlar menen elektronlardı'n' difrakciyasi' fotonlardı'n' difrakciyasi'na ju'da' uqsas. Sonli'qtan biz to'mende kristalli'q pa'njerenin' quri'li'si'n u'yreniwsı ushi'n fotonlardı'n' difrakciyasi'ni'n' qollani'li'wi' menen toli'g'i'raq tani'sami'z. Bul juwmaqlardi' kristallardag'i' neytronlar menen elektronlardı'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'lshemli difrakciyali'q pa'njerenin' orni'n iyeleydi. Elektromagnit tolqi'nleri'ni'n' kvantları' bolg'an fotonlardı'n' u'sh o'lshemli pa'njeredegi difrakciyasi'ni'n' ni'zamli'qları'ni'n u'yreniwsı ushi'n N dana san'laqqa iye bir o'lshemli difrakciyali'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'laqtin' sheklerindegi intensivliktin' tarqali'wi'ni'n' xarakterine baylani'sli' boli'p shi'qtı'.

Da'slep tuwri' mu'yeshlik emes primitivlik elementar quti'shab'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'rdeinde 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'nları 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 , jiyiliği 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' jiyiliği o'zgermeytug'i'n jag'daydi' qarayı'q, yag'ni'y $\omega_0 = \omega_1 = \omega$. Ani'qlama boyi'nsha $\omega = kc$. Sonli'qtan $|\vec{k}_0| = |\vec{k}_1| = k$. Kristalga kelip tu'siwsı tolqi'nni'n' $\vec{r} = (0,0,0)$ noqati'ndag'i' kernewligi $\vec{E}_0(\vec{r}, t)$ to'mendegidey an'latpani'n' ja'rdeinde 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' jutu'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'rdeinde esaplaw mu'mkin:

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

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

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

\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 teoriyası'nda ju'da' u'lken a'hmiyetke iye ha'm shashi'rawdi'n' saldarı'nan tolqi'n vektori'ni'n' qanshag'a o'zgergenligin an'g'artadi'.

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

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

Bul formula boyi'nsha summalar pa'njererin' 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 $\vec{E}_1 = const \cdot \vec{E}_0(\vec{r} \cdot t) \cdot \exp\{i[\omega t - (\vec{k}_0 - \vec{k}_1) \cdot \vec{r}]\} \cdot \frac{1}{|\vec{r}|}$ 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 $\exp[i\vec{G}\vec{a}]$ 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 shaması' ushi'n \vec{E} ni oni'n' kompleksli tu'yinlesi \vec{E}^* ge ko'beytip bir qansha tu'r lendiriwlerden keyin mi'na an'latpani' alami'z:

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

Eger bir waqi'tta

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

sha'rtleri ori'nlanatug'i'n bolsa, onda I din' ma'nisi maksimali'q ha'm (*NMP*)² shaması'na ten' boladi'. Bul an'latpada H, K, L shamalari' pu'tin sanlar. Eger $\frac{\vec{c}}{2}, \frac{\vec{a}}{2}, \frac{\vec{b}}{2}$ ha'm $\frac{\vec{c}}{2}$ 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' translyaciyalari' bolg'an $\vec{A}, \vec{B}, \vec{C}$ vektorlari' bi'layi'nsha ani'qlanadi':

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

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 translyaciylar 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'ynlerin, 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'lillegwe boladi'. Al oni'n' uzi'nli'g'i' bolsa $2\pi/d$ shaması'na 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 mikroskopiyasi'nda 2π ko'beytiwshisi paydalani'lmaydi' ha'm $2\pi/d$ shaması'ni'n' orni'na $1/d$ shaması' paydalani'ladi' (demek masshtab 2π ko'beytiwshisine pari'q qi'ladi' degen so'z).

Rombali'q elementar quti'shası' 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 keri pa'njererin' quti'shasi'n'i'n' en' kelte ta'repinin' sa'ykes keletug'i'nli'g'i' ko'riniq tur. Tap usi'nday jollar menen primitivlik kubli'q pa'njere ushi'n elementar quti'shani'n' qabi'rg'asi'n'i'n' uzi'nli'g'i' $1/a$ shaması'na 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' keri 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 keri pa'njererin' 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' geometriyali'q ma'nis beriw mu'mkin. Meyli \vec{G} vektorlari' $\vec{A}, \vec{B}, \vec{C}$ vektorlari' boyi'nsha jayi'lg'an bolsi'n:

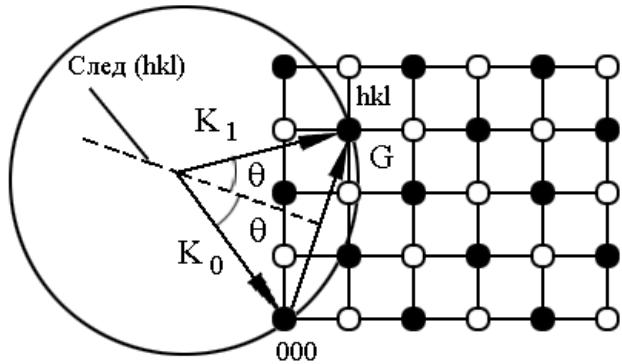
$$\vec{G} = h\vec{A} + k\vec{B} + l\vec{C}. \quad (1.17)$$

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' keri pa'njererin' translyaciya vektorlari' bolg'an \vec{T}^* vektori'na ten' bolg'anda difrakciyani'n' maksimumi' ori'n aladi' eken.

Keri pa'njererin' u'sh o'lshemli pa'njereden ali'natug'i'n difrakciyali'q su'wretti sa'wlelendiretug'i'nli'g'i'n ko'rsetiwge boladi'. Optika kursi'nda Fraunhoferdin' difrakciyali'q 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 keri pa'njere sheksiz u'lken kristaldi'n' Fure-obrazi', al shekli o'lshemli tu'ynlerge iye keri pa'njere shekli o'lshemlerge iye kristaldi'n' Fure-obrazi' boli'p tabi'ladi'. Bunday keri pa'njererin' 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 keri proporsional. Sonli'qtan difrakciyali'q su'wrettin' tu'rin kristalli'q pa'njererin' Fure tu'r lendiriwin 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

Keri pa'njere kristaldi'n' kristalli'q pa'njeresi menen bekkem baylani'sqan. Kristaldi' bursa oni'n' keri pa'njeresi de buri'ladi'. Difrakciyani' baqlaw ushi'n shashi'raw vektori'n keri pa'njererin' qanday da bir tu'ynine 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'nlanı'wi'n ha'm difrakciyag'a ushi'rag'an tolqi'nlardı'n' bag'i'ti'n ani'qlaw ushi'n Evald quri'lmasi'nan paydalani'w ju'da' qolaylı' (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 keri pa'njererin' 000 tu'yininde jaylasti'rami'z. Tu'siwshi ha'm shashi'rag'an tolqi'nlardı'n' tezlikleri de, jiyilikleri 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 ten' 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' birinin' keri pa'njererin' tu'yinlerinin' birine sa'ykes keletug'i'nli'g'i'n yamasa kelmeytug'i'nli'g'i'n tekseremiz. Buni'n' ushi'n keri pa'njererin' 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 noqatlı'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 tiydiriw ushi'n) kristaldi', oni'n' menen baylani'sqan keri pa'njereni buri'w kerek. Endi geometriyani'n' ja'rdeminde keri pa'njereni (kristaldi'n' o'zin) qansha mu'yeshke buri'wdi'n' za'ru'rligi 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'qtı'ri'lg'an. Olar kristaldi', difrakciyag'a ushi'rag'an tolqi'nlardı' registraciyalawshi' detektordı' qansha shamag'a buri'wdi' avtomat tu'rde ani'qlay aladi'.

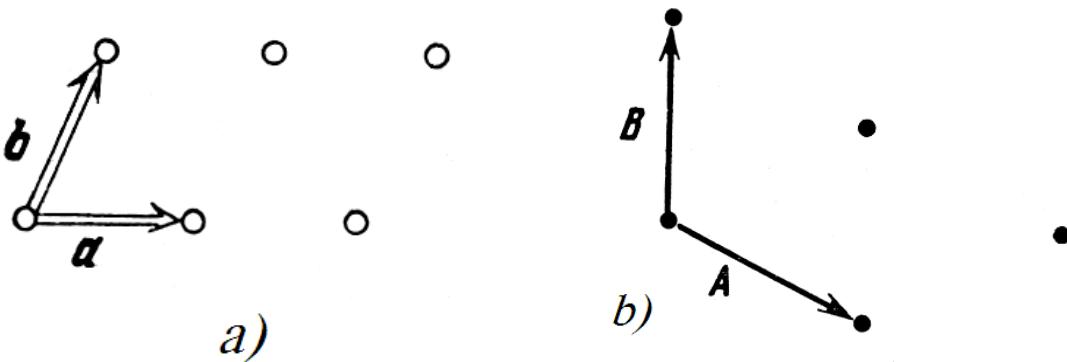
1.14-su'wrette \vec{k}_0 menen \vec{G} vektorlari'ni'n' uzi'nli'qlari' arasi'nda

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

an'latpasi' menen esaplanatug'i'n baylani'sti'n' bar ekenligi ko'rinipli tur. Bul an'latpada Θ arqali' difrakciyali'q mu'yesh dep atalatug'i'n mu'yeshtin' 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 ishine aladi'. Sebebi qanday da bir sen eselengen hkl shamalari' shashi'raw ta'rtibi n di o'z ishine 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 keri pa'njere (b)

Polikristaldi'n' keri pa'njeresi. Joqari'da ga'p etilgendey, polikristalli'q material bir birine sali'sti'rg'anda i'qtı'yarlı' tu'rde bag'i'tlang'an og'ada ko'p sanlı' mayda kristalli'q da'neshelerden turadi'. Usı'nday ha'r bir da'neshege keri pa'njere sa'ykes keledi. Ha'r qı'yı'ı da'neshelerge juwap beretug'i'n keri pa'njereler birdey da'wirlerge, birdey boli'p jaylasqan tu'yinlerge iye boladi'. Biraq olardi'n' barlı'g'i' da keri pa'njerenin' 000 tu'yinine sali'sti'rg'anda i'qtı'yarlı' tu'rde bag'i'tlang'an boladi'. Bunday jag'dayda keri pa'nejerenin' hkl tu'yinine keri ken'isliktegi radiusi' T_{hkl}^* ge ten' bolg'an bette jaylasqan ko'p sanlı' tu'yinler sa'ykes keledi. I'qtı'yarlı' tu'rde bagi'tlarga iye da'neshelerge iye ideal polikristall jag'dayı'nda keri pa'njerenin' tu'yinin sferag'a aylanadi' dep esaplawg'a boladi'. Keri pa'njerenin' barlı'q tu'yinlerinin' ji'ynag'i'na radiusları' T_{hkl}^* shaması'na ten' bolg'an, kristallografiyalı'q tegisliklerdin' ma'nisine baylani'sli' izbe-iz jaylasqan sferalar ji'ynag'i' sa'ykes keledi. Bunday jag'dayda Evald quri'lması'nda Evald sferasi'n keri pa'njere tu'yinlerinin' sferalar ji'ynag'i' bazi' bir shen'berler boyı'nsha kesip o'tedi (1.14-su'wret). Sonlı'qtan usı'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 nurları'n yamasa rentgen spektrinin' xarakteristikali'q si'zi'qları'nan paydalananadi'.

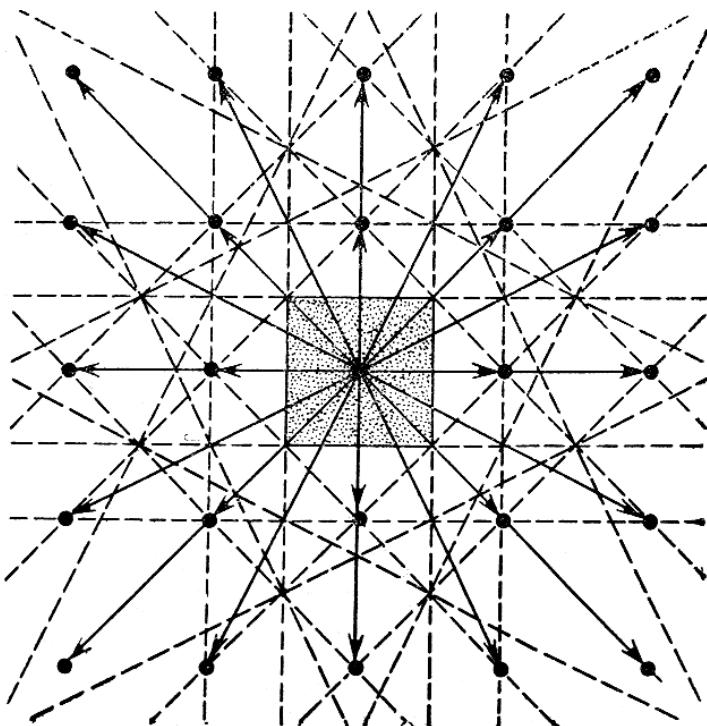
Brillyuen zonalari'. Kristallarda difrakciya sha'rtin qanaatlandı'ratug'i'n tolqi'nlar menen bo'lekshelerdin' tolqi'n vektorları' bolg'an \vec{k}_0 vektorları'ni'n' ko'pligin tapqan paydali' boladi'. (1.18)-ten'lemeni bi'layı'nsha jazı'wg'a boladi':

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

Keyingi ten'leme \vec{G} vektorı'na perpendikulyar ha'm koordinata bası'nan $|\vec{G}|/2$ qashi'qli'g'i'nda jaylasqan tegislik ushi'n jazı'lg'an ten'leme boli'p tabi'ladi'. Sonı'n' menen birge bul ten'lemenin' difrakciya sha'rtin qanaatlandı'ratug'i'n barlı'q \vec{k}_0 vektorları' ushi'n jazı'lg'an ten'leme ekenligin itibarg'a alami'z. Bunday jag'dayda difrakciya sha'rtine juwap beretug'i'n \vec{k}_0 vektorları'ni'n' ushlari'ni'n' ko'pligi bir tegislikte jatadi' ha'm bul tegislik keri pa'njerenin' barlı'q vektorları'ni'n' ortası' arqali' o'tedi ha'm olardi'n' barlı'g'i'na da perpendikulyar bag'i'tlang'an. Tap usı'nday jollar menen joqari'da Vigner-Zeytc qutı'shası' sog'i'lg'an (du'zilgen) edi. Keri ken'islikte du'zilgen Vigner-Zeytc qutı'shası'n Brillyuennin' birinshi zonası' dep ataw qabi'l etilgen. Bul zona a'hmiyetli qa'siyetke iye: tolqi'n vektorı' onı'n' shegarası'na sa'ykes keletug'i'n tolqi'nlar menen bo'leksheler difrakciya sha'rtin qanaatlandı'radi'. Brillyuen zonaları' elektronlardı'n', fononlardı'n' ha'm basqa da bo'lekshelerdin' kristallarda qozg'ali'wi'n, kristallardag'i' energiyali'q zonalardı'n'

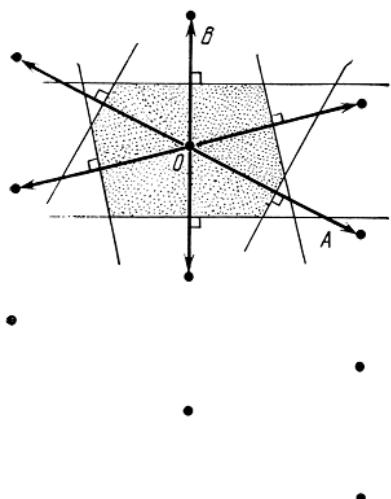
quri'li'si'n izertlegende a'hmiyetli ori'ndi' iyeleydi. Bul haqqi'nda keyinirek toli'q tu'rde ga'p etiledi.

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.

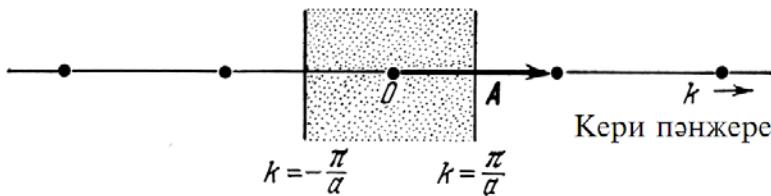
Kvadrat keri pa'njere. Jin'ishke tutas si'zi'qlardi'n' ja'rdeminde keri pa'njererin' vektorlari' belgilengen. Usi' vektorlarg'a perpendikulyar punktir si'zi'qlar olardi' ten'dey ekige bo'ledi. Su'wrettin' orayi'nda jaylasqan kvadrat en' kishi maydang'a iye boladi' ha'm punktir si'zi'qlar menen toli'q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



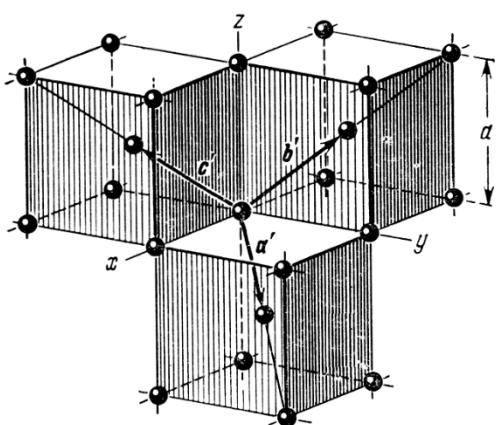
1.14 s su'wret.

Eki o'lshemli qi'ya mu'yeshli (tuwri' mu'yeshli emes pa'njere ushi'n Brillyuennin' birinshi zonası'n sog'i'w. Da'slep O noqati'n keri pa'njererin' jaqi'n jaylasqan tu'yinleri menen tutasti'ratug'i'n vektorlardi' tu'siremiz. Bunnan keyin bul vektorlarg'a 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 zonası' boli'p tabi'ladi'.

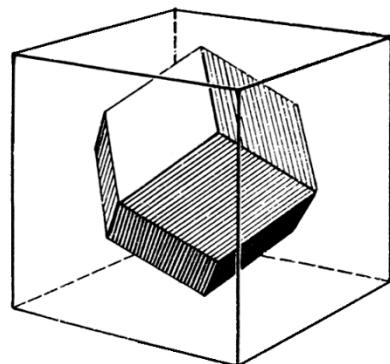
α
Сызықты кристаллық
пәнжере



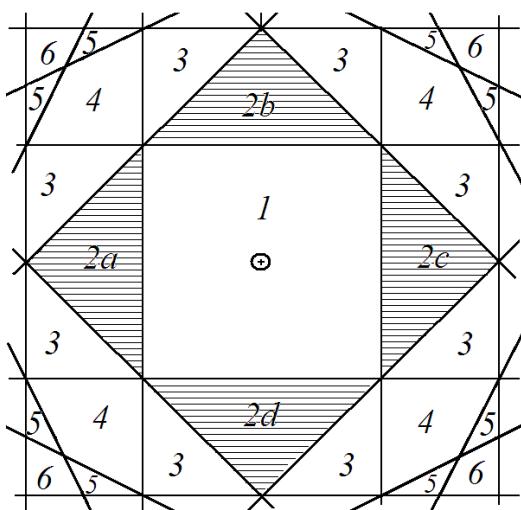
1.14 d su'wret. Bir o'lshemli kristalli'q pa'njere menen keri pa'njere. Uzi'nli'g'i' $2\pi/a$ bolg'an \mathbf{A} vektori' keri pa'njerenin' bazislik vektori', al \mathbf{A} ha'm $-\mathbf{A}$ vektorlari' koordinata basi'nan tu'sirilgen en' qi'sqa vektorlar boli'p tabi'ladi'. Usi' vektorlarg'a perpendikulyar ha'm usi' vektorlardi' ten'dey ekige bo'letug'i'n si'zi'qlar Brillyuennin' birinshi zonası'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 zonası'. Bul zona duri's rombododekaedrdin' 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'shinski zonası' 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'ratı'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 jaylasqan atom baylani'sli'. Bazistin' ha'r qi'yli' atomlari'nda shashi'rag'an tolqi'nlar atomlardı'n' bir birine sali'sti'rg'anda qalayı'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'njererin' 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 alsi'n. Sol atomlardi'n' birewinin' nomerini 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 shamasini'na proporsional 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':

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

$\vec{G} = h\vec{A} + k\vec{B} + l\vec{C}$ 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:

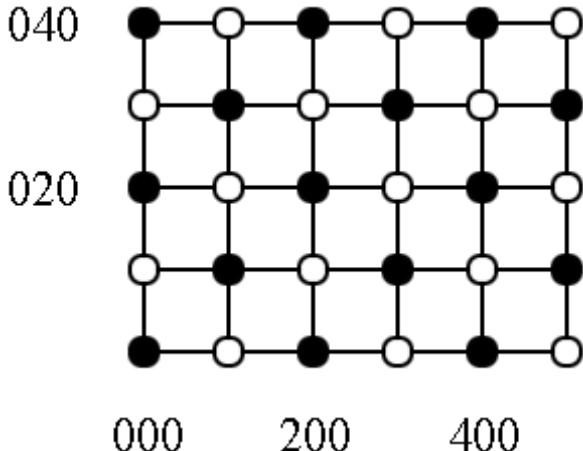
$$F(hkl) = \sum_j f_i \cdot \exp[2\pi i(hx_j + ky_j + lz_j)]. \quad (1.23)$$

$F(hkl)$ shamasini' 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'lshemli 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'njererin' bazi' bir tu'yini ushi'n bul shamanini' 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'nlardi'n' amplitudaları' 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' berowi kerek (eger shashi'raw vektori' oni'n' keri pa'njererin'in 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'njererin' indeksleri hkl bolg'an tu'yini ushi'n (1.23)-formula ja'rdeinde esaplanadi' ha'm to'mendegidey tu'rge iye boladi':

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

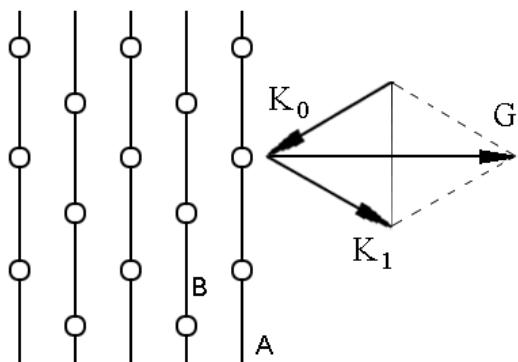
Bul formulada $F(hkl)$ shamasini'ni'n' indekslerdin' summasi' bolg'an $h + k + l$ qosi'ndi'si'nan g'a'rezli ekenligi ko'rinipli tur. Eger $h + k + l$ qosi'ndi'si' jup bolsa $F(hkl) = 2$, al taq bolsa $F(hkl) = 0$. Endi strukturali'q faktorlari' nolge ten' emes tu'yinlerdi do'n'gelekler menen belgilep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



1.15-su'wret.

KOK kristallardi'g'i ha'm CsCl tipindegi strukturalar ushi'n keri pa'njerenin' tu'yinlerinin' jaylas'i'wi'.

1.15-su'wrette boyalmag'an do'n'gelekler menen belgilengen tu'yinler ushi'n difrakciya baqlanbaydi'. Sebebi kubli'q qutu'shani'n' orayi'nda jaylasqan atomlarda shashi'rag'an tolqi'nlar kubti'n' to'belerinde shashi'rag'an tolqi'nlar menen qarama-qarsı' fazada boladi'. Bul qubi'li'sti' 1.16-su'wrettin' ja'rdeinde an'sat tu'sindiriwge boladi'. 1.16-su'wrette KOK qutu'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 jiyi jaylasqan boli'p shi'g'adi'. V tipindegi tegislikler bolmag'anda A tipindegi tegisliklerde shashi'rag'an tolqi'nlar bir birin ku'sheytken bolar edi. V tipindegi tegisliklerinde de tolqi'nlar shashi'raydi', olardi'n' amplitudalari'ni'n' qosi'ndi'si' A tipindegi tegisliklerde shashi'rag'an tolqi'nlardı'n' amplitudalari'ni'n' qosi'ndi'si'na ten'. Biraq V tipindegi shashi'rag'an tolqi'nlardı'n' fazasi' menen A tipindegi tegisliklerde shashi'rag'an tolqi'nlardı'n' fazalari' qarama-qarsı' boladi' (fazalar ayi'rmasi' π ge ten'). Sonli'qtan A ha'm V tipindegi 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'nlardı'n' KOK pa'njerenin' (100) tegisligi ta'repinen shag'i'li'sti'ri'li'wi'.

Endi xlорli' ceziy tipindegi quri'li'sti' qaraymi'z (1.1-su'wret). Bul quri'li's kubli'q qutu'shang'a iye ha'm eki bazisi bar. Birinshisinin' koordinatası' 000 (Cs ushi'n), ekinshisiniki $\frac{1}{2}\frac{1}{2}\frac{1}{2}$ (Cl ushi'n). (1.23)-formula ja'rdeinde esaplang'an oni'n' strukturalı'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'nlardı' 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' atomlarga iye boladi'. Olar shashi'rag'an tolqi'nlardı'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 difrakciyali'q maksimumlar, al taq bolg'anda (xlor menen ceziyidin' bergen u'leslerinin' belgileri ha'r qi'yli') a'zzi difrakciyali'q maksimumlar payda boladi'. Keri pa'njeredegi tu'yinlerdin' bir birine sali'sti'rg'andag'i' jaylasi'wlari' boyi'nsha pa'njenenin' da'wirin, al ku'shli ha'm ha'liz maksumlardi'n' izbe-izligi boyi'nsha pa'njenenin' bazislerindegi atomlardi'n' iyelegen ori'nları'n ani'qlaydi'.

Endi QOK pa'njenenin' 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'njenenin' 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 inleksler de, jup indekslerde bar bolsa.

Solay etip birdey jupli'qtag'i' indeksler ushi'n QOK pa'njenenin' strukturali'q faktori'n 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'njeneni payda etedi (buni' geometriyali'q jaqtan ko'rsetiw qi'yin' emes). QOK pa'njenenin' rentgenogrammalari'nda (111), (200), (113), (220), (133), (222) ha'm tap sonday indekslerge iye kristallografiyali'q tegisliklerde difrakciyag'a ushi'ri'g'an tolqi'nlardı'n' refleksleri boladi'. Rentgenogrammada ha'r qi'yli' jupli'qqa iye indekslerge iye shashi'rawlardı'n' (reflekslerdin' yamasa difrakciyali'q daqlardi'n') bolmawi' QOK pa'njenenin' belgisi si'pati'nda qabi'l etiledi.

Bazisler quramali'raq quri'li'sqa iye bolg'anda strukturali'q faktordi'n' kompleks shamag'a aylani'wi', keri pa'njenenin' 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' kristallografiyali'q tegisliklerde shashi'rag'an tolqi'nlardı'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'nlardı'n' intensivligin o'lshew arqali' bazistegi atomlardi'n' iyelegen ori'nları'n ani'qlaw. Bul kristaldi'n' strukturasi'n 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 atomlarga iye kristallardi'n' quri'li'si' ani'qlandi'

Shashi'rawdi'n' atomli'q faktori'. Ayi'ri'm atomlarda shashi'rag'an tolqi'nlardı'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 teoriyalı'q jollar menen esaplaydi'. Bunday esaplawlardi' ju'rgiziwi 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'nlardı'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 esaplawi'n' sxemasi' boyi'nsha):

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

f shaması' elektronlar menen fotonlardi'n' difrakciyasi'nda $|\vec{G}|$ vektori'ni'n' modulinen g'a'rezli. A'dette $|\vec{G}|$ shaması' o'sse f tin' ma'nisi kemeyedi. f shaması' u'lken nomerge iye atomlarda u'lken. Qara berse f shaması' $|\vec{G}|$ 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. Difrakciyali'q eksperimentler o'tkerilgende f funkciyasi'ni'n' shaması'n spravoshniklerde keltirilgen kestelerden aladi'.

Ma'seleler:

1-ma'sele. (1.14)-formula ja'rdeinde ani'qlang'an keri 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' modulinin' $2\pi/d$ shaması'na ten' ekenligin ko'rsetin'iz. Bul jerde d arqali' \vec{c} ha'm \vec{b} vektorlari' jatatug'i'n kristallografiyali'q 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 parallelolopipeditin' ko'leminin' olardi'n' aralas ko'beymesine, ekinshiden parallelolopipeditin' ultani'ni'n' (yag'ni'y \vec{c} ha'm \vec{b} vektoralari'ni'n' vektorli'q ko'beymesinin' moduline) 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 shaması'ni'n' ma'nisinin' (1.14)-an'latpa boyi'nsha esaplang'an \vec{A} vektori'ni'n' moduline 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 kristallografiyali'q tegisliklerge perpendikulyar ekenligin ha'm usi' tegislikten koordinatalar basi'na shekemgi qashi'qli'qtin' $d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}}$ formulası'ni'n' ja'rdeinde 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 keri pa'njererin' vektori'ni'n' uzi'nli'g'i'n esaplaw za'ru'rliyi payda boladi'.

3-ma'sele. Parametrleri a ha'm s bolg'an ($a < c$) tetragonalli'q pa'njere ushi'n keri pa'njererin' vektorlari'n sog'i'n'i'z. Brillyuennin' birinshi zonası'ni'n' su'wretin sali'n'i'z. Indeksleri (hkl) bolg'an kristallografiyali'q 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 ($a < c$) geksagonalli'q pa'njere ushi'n keri pa'njererin' vektorlari'n sog'i'n'i'z. Brillyuennin' birinshi zonası'ni'n' su'wretin sali'n'i'z. Indeksleri (hkl) bolg'an kristallografiyali'q 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. Keri pa'njererin' 000, 110, 200 tu'yinleri arqali' o'tetug'i'n tegisliktegi KOK kristallar ushi'n Brillyuennin' birinshi zonası'ni'n' kese-kesiminin' su'wretin sali'n'i'z.

2-bap. Kristalli'q pa'njererin' defektleri

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 defektleri dep ataw qabi'l etilgen. Quri'li's defektlerin dinamikali'q ha'm statikali'q dep ayi'radi'. Dinamikali'q defektlerge ji'lli'li'q terbelislerinin' aqi'betinde yamasa kristallar arqali' elektromagnit tolqi'nлari' 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 toparlasip irirek defektti payda etiwi mu'mkin.

Statikali'q defektlerdi sol defektlerdin' formaları' 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 dislokaciylar. Bunday defektlerde da'wirliktig'in buzi'li'wi' bir si'zi'qli'n' boyi'nda ori'n aladi';
- 3). Betlik defektler. Bunday defektlerge kristaldi'n' beti yamasa polikristaldi'n' da'neshelerinin' betleri kireti;
- 4). Ko'lemlik defektler bolg'an quwi'sli'qlar, mikrojari'qlar, basqa fazani'n' kishkene qaldi'qlari'ni'n' yamasa zarodi'shlari'ni'n' boli'wi' ha'm basqalar.

Kristallardi'n' ko'plegen fizikalı'q qa'siyetleri ha'r qi'lyi' toparlardag'i' defektlerge baylani'sli' ku'shli o'zgeredi. Mi'sali' materialdi'n' bekkemligi menen plastikligi 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 situaciylar 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'lyi' noqatli'q defektlerdi qaraymi'z

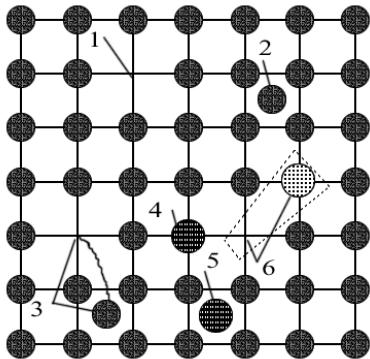
Vakansiya. Atom kristalli'q pa'njerenin' bazi' bir tu'yininde bolmawi' mu'mkin (2.1 (1)-su'wretti qaran'i'z). Usi'nday bos ori'n vakansiya dep ataladi'. Vakansiya kristallizaciya processinde jiyirek payda boladi', bir tu'yin tosi'nnan bos qaladi'. Eger eritpedegi kelesi atom baska atom ushi'n joldi' 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' sebebinen 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' temperaturalardag'i' ji'lli'li'q qozg'ali'slari' bunday sekirip o'tiwdin' tiykarg'i' sebebi 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' (radiaciyalı'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'nlar bolg'an jag'daylarda ju'zege keledi. Vodorod, bor, uglerod atomlari' ko'pshilik jag'daylarda endirilgen qosi'msha atomlardi'n' ori'nlarini 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 defektlardin' 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' orni'n 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 shaması'n quraydi'.

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

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

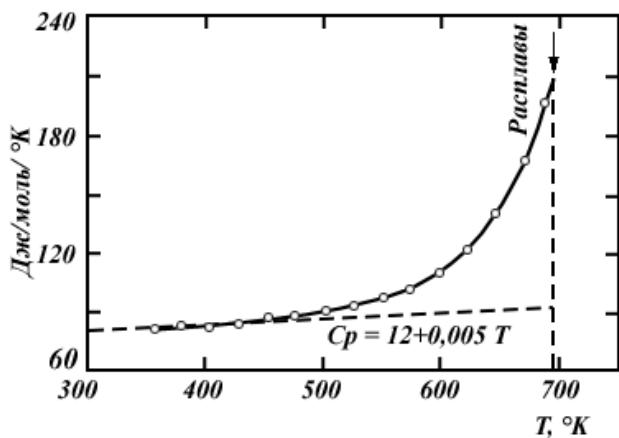
Bul formula boyi'nsha esaplang'an itimalli'qtin' ma'nisinin' qanday bolatug'i'nli'g'i'n ani'qlaymi'z. Meyli $E_V = 1$ eV, $T = 1000$ K bolsi'n. Bunday jag'dayda $P \approx 10^{-5}$. To'menirek temperaturalarda defektlardin' ti'g'i'zli'g'i' eksponencialli'q ni'zam boyi'nsha kemeyedi ha'm o'jire temperaturalari'nan kishi temperaturalarda ju'da' kishi shamag'a aylanadi'. Biraq to'mengi temperaturalarda da noqatli'q defektlardin' koncentraciyasi'n joqari' etiwe 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'qtirami'z, taplaymi'z). Bunday jag'dayda noqatli'q defektlardin' koncentraciyasi' joqari' temperaturalardag'i' koncentraciyag'a sa'ykes keledi.

Frenkel boyi'nsha defektlerde 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' belgileymiz. Oni'n' san shaması' 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 defektlardin' sani'ni'n' to'mendegidey formulani'n' ja'rdeinde 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'ndagi' ori'nlari 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.



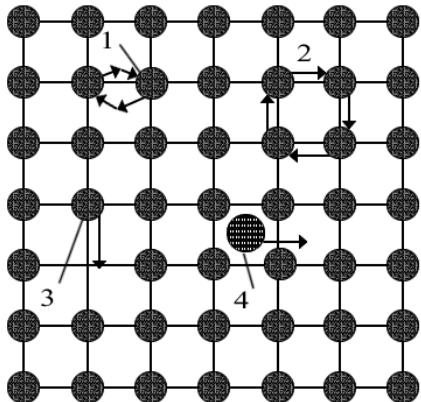
2.2-su'wret.
Balqi'w (eriw) temperaturasi' jani'nda noqatli'q defektlerdin' payda boli'wi'ni'n' ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'na qosatug'i'n u'lesi.

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 qatt'i denelerdegi diffuziyani'n' tiykarg'i' mexanizmi mi'nalar boli'p tabi'ladi':

Vakansiyali'q mexanizm. Bul mexanizm vakansiyalardi'n' a'tirapi'nda atomlardini'n' qaytadan toparlas'iwi' menen baylani'sli' (2.3 (3)-su'wret);

Tu'yinler arali'q mexanizm. Bul jag'day tu'yinler arasi'nda sali'sti'rmali' mayda atomlardini'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.

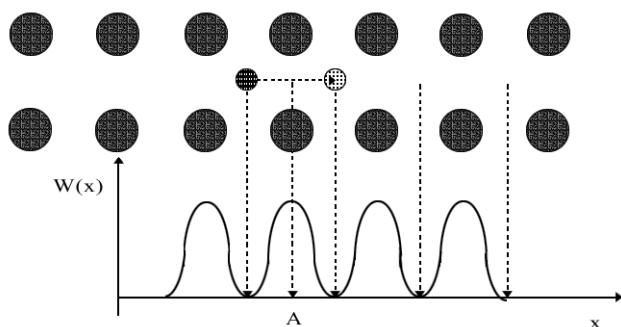
Barli'q jag'daylarda da atomlar potencialli'q barer arqali' o'tedi. Potencialli'q barerdin' payda boli'wi' atomlar bir birine jaqi'nlag'anda payda bolatug'i'n kvantli'q iyterilis ku'shleri menen baylani'sli'. Tu'yinler arasi'nda turg'an atomni'n' qon'si'las tu'yinlerdin' arasi'na ko'ship o'tiwin tallaw 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' shaması 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 Boltzman formulası' 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 jiyiliği 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'tiwlardin' jiyiligin f arqali' belgileymiz ha'm bul shama bi'layi'nsha ani'qlanadi':

$$f = \nu P. \quad (2.4)$$

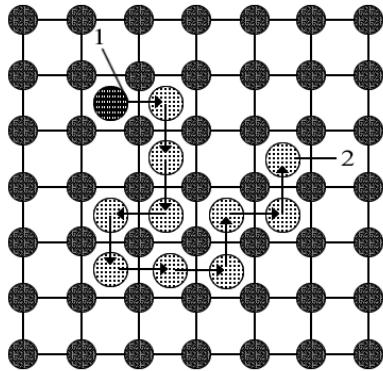
Solay etip qatti' denelerdegi atom siyrek bolatug'i'n sekiriwler joli' menen bir ori'nnan a qashi'qli'g'i'ndag'i' ekinshi ori'ng'a f jiyiliği menen ko'shedi. Bul jag'day 2.5-su'wrette keltirilgen.



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 koefficientin esaplaymi'z. Meyli berilgen tu'yinler arasi'ndag'i' ori'nnan qon'si'las sonday ori'ng'a ko'shiwdin' jiyiliği f shaması'na ten' bolsi'n.



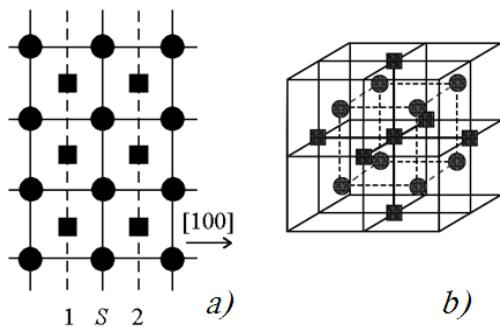
2.5-su'wret.

A'piwayi' (primitivlik) kubli'q pa'njeredegei tu'yinler 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 koefficineti 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'njererin' tu'yinleri 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 tegislikleri arasi'ndag'i' qashi'qli'q (bul kashi'qli'q qon'si'las tu'yinler arasi'ndag'i' ori'nlar arasi'ndag'i' qashi'qli'qqa ten') a shamasi'na ten' («ko'ship o'tiw uzi'nli'g'i'»). Meyli 1 tegisliginin' S tu'yinler 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'njeredegei tu'yinler menen tu'yinler arasi'ndag'i' ori'nlardı'n' jaylas'wlari' (a). Usi' pa'njerege jaqi'n jaylasqan tu'yinler arasi'ndag'i' ori'nlar (b).

Endi x noqtatlari'ndag'i' diffuziya ni'zami'na kiriwshi tu'yinler arasi'ndag'i' atomlardı'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 waqi'ti' ishinde S beti arqali' shep ta'repten on' ta'repke qaray kesip o'tetug'i'n atomlar sani' ΔN_1 shamasi'n esaplaymi'z. Birinshi tegisliktegi ha'r bir atom en' jaqi'n jaylasqan alti' 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:

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

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 vakansiyani'n' a'tirapi'nda ori'nlarini'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 parametrlerinin' 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.

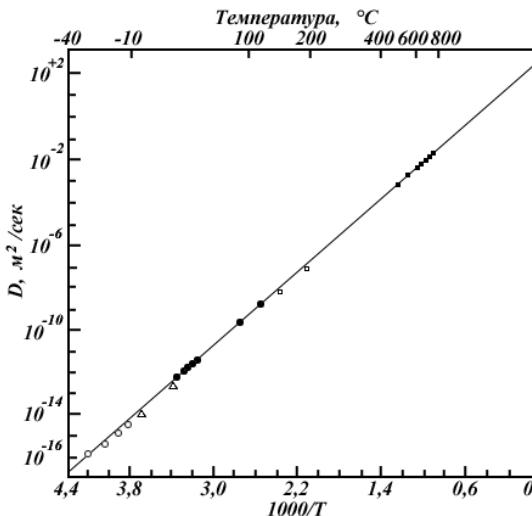
2.1-keste.

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 ishindegi Ge	$7,8 \cdot 10^{-4}$	3,0
Ge ishindegi As	$6,0 \cdot 10^{-4}$	2,5
Ge ishindegi P	$2,0 \cdot 10^{-4}$	2,5
Ge ishindegi In	$6,0 \cdot 10^{-6}$	2,5
Ge ishindegi B	$4,0 \cdot 10^{-4}$	4,5
Al ishindegi Cu	$2,3 \cdot 10^{-4}$	1,45

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

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



2.7-su'wret.

Uglerodti'n' KOK temirdegi diffuziyasi' koefficientinin' temperaturadan g'a'rezligi.

Joqari'da ko'rip o'tilgen modeldin' ja'rdeinde 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 $\langle x^2 \rangle$ shaması'ni'n' ma'nisin esaplaw mu'mkin. Bul jerde $t_1 = 1/f$ arqali' birinen son' biri bolatug'i'n eki ko'shiw arasi'ndagi'i' ortasha waqi't belgilengen. Buni'n' ushi'n' $\langle x^2 \rangle$ shaması'n buri'ng'i' ko'shiwlerden pu'tkilley g'a'rezsiz dep esaplaymi'z. Bunday jag'dayda

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

formulası'n alami'z. Bul formula D shaması'n eksperimentte ani'qlaw ushi'n paydalani'ladi'.

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

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

diffuziyani' ja'rdeinde payda etedi eken. Yari'm o'tkizgishke ha'r qanday aralaspalari' kirgiziw (legirovanie poluprovodnika, yari'm o'tkizgishti legiruy) ushi'n qi'sqa waqi'tlar 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'qtiri'w bari'si'nda. Defektlerdin' ti'g'i'zli'g'i' kem-kemnen kishireyedi. Bul qubi'li's tu'yinler arasi'nda turg'an atomlardi'n' vakansiyalarg'a o'tiwinin' (buni' defektlerdin' rekombinacyasi' dep ataydi') yamasa defektlerdin' kristaldi'n' betine yamasa kristaldag'i' da'nesheler arasi'ndag'i' shegarag'a o'tiwinin' saldarı'nan ju'zege keledi. Ayi'ri'm jag'daylarda noqatli'q defektler bolg'an qosı'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 qosı'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' keri bag'i'ti'nda qozg'alg'an uti'mli'raq. Soni'n' ushi'n teris zaryadlang'an ionlar \vec{E} nin' bag'i'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'qli' 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 zaryadlardı' ko'shiriw ushi'n a'dewir kishi potencialli'q barerden o'tiwdi talap etedi. Al elektrondi' ionnan iong'a o'tkeriw ushi'n u'lken potencialli'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 qosı'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 (sapfir 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 rentgenografiyalı'q usi'llardi'n' ja'rdeminde ali'ng'an pa'njere parametrinin' da'l ma'nisi, ekinshisi zatti'n' ti'g'i'zli'g'i'n da'l ani'qlaw (kristaldi'n' massasi'ni'n' ko'lemin qatnasi'ni'n' shaması'n' da'l ani'qlaw). Vakansiyalardi'n' kristalli'q pa'njererin' parametrin 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' atomlardı'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'njererin' parametrinin' shaması'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'rması'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'lshew, soni'n' menen birge ha'r qi'yli' elektromagnit nurları'ni'n' juti'li'w koefficientlerinin' ma'nisin o'lshew 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' shaması' 1 eV qa ten' bolsa 300 K ha'm 900 K temperaturaları'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 atomları'ni'n' qanday teren'likke o'te alatug'i'nli'g'i'n bahalan'i'z. Uglerodi' o'z ishine alatug'i'n ortali'qtı' temirdin' betine tiyip tur dep esaplaw kerek. Diffuziya koefficientinin' ma'nisin 2.1-kestede keltirilgen mag'li'wmatlar boyi'nsha esaplaw talap etiledi. Shi'ni'qtı'ri'w menen juwmaqlanatug'i'n tap usi'nday operaciya beti qattı', 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 shaması'na ten'.

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

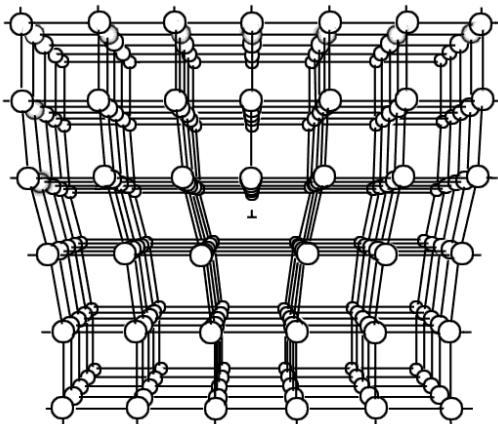
2.2. Dislokaciylar

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

Dislokaciylardi'n' tipleri. Dislokaciylardi' shetlik ha'm vintlik dep ekige bo'ledi. Biraq eksperimenterde baqlani'p ju'rgen dislokaciylar tek ayi'ri'm jag'daylarda g'ana sol dislokaciylardi'n' modellik tiplerinin' ekewinin' biri boli'wi' mu'mkin. Sebebi a'dette dislokaciylar eki tiptin' de elementlerine iye boladi'. Ko'rgizbelilik ushi'n modellik dislokaciylardi' 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'njereler ushi'n da duri's boladi'.

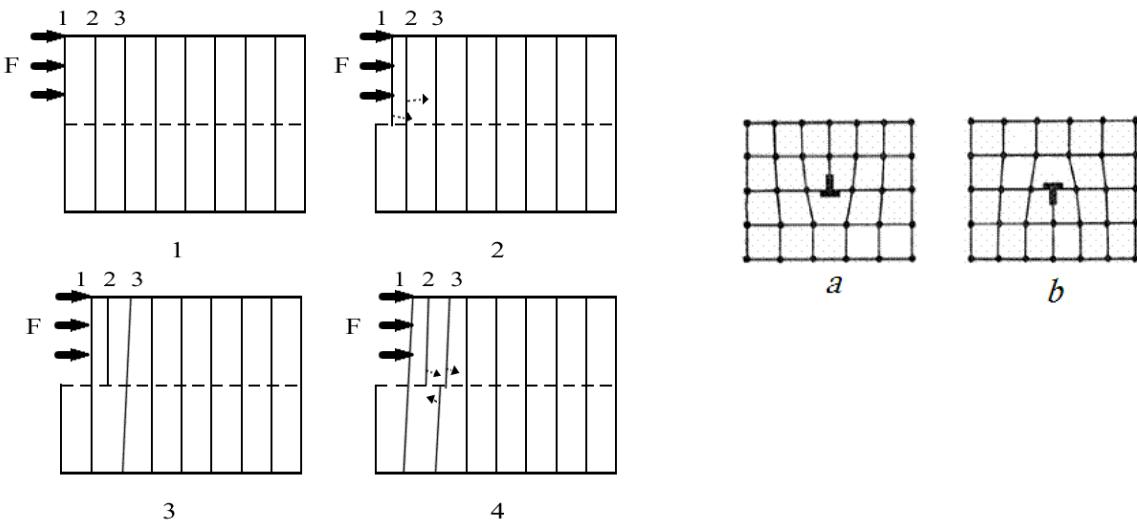
Shetlik dislokaciya ha'm oni'n' a'tirapi'nda atomlardı'n' jaylasi'w sxemasi' 2.8-su'wrette a'piwayi' kubli'q pa'njere mi'sali'nda keltirilgen. Bul su'wrette 100 tipindegi qon'si'las toli'q

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



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

Shetlik dislokaciylar ko'binese kristallardi' 2.9-su'wrette keltirilgendey etip deformaciyaq'anda payda boladi'. Dislokaciylar ko'binese ji'lji'w deformaciyalari'nda ji'lji'w tegislikleri dep atalatug'i'n ti'g'i'z jaylasqan atomlarg'a iye tegisliklerde payda boladi'. Biz a'piwayi' kubli'q pa'njereni ha'm oni'n' {100} tegisligin qaraymi'z. KOK kristallarda {110}, {112} ha'm {123} tegisliklerinin', al QOK kristallardi' {111} tegisliklerinin' ji'lji'w tegislikleri 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) tegisligi punktir menen belgilengen ori'nda «ji'rti'ladi» (2.9 (2)-su'wret), bunnan keyin 1 tegisliginin' joqarg'i' yari'mi' 2 tegisliktin' to'mengi yari'mi' menen tutasadi' (2.9 (3)-su'wret). Al 2 tegisliginin' joqarg'i' yari'mi' «arti'q» tegislik boli'p qaladi'. Eger kristalg'a ta'sir etiwdi dawam etsek, onda kelesi tegislik «ji'rti'ladi», bunnan keyin 2 tegisliginin' joqarg'i' yari'mi' 3 tegisliginin' to'mengi yari'mi'na qosiladi' (2.9 (4)-su'wret). Process tap usi'nday izbe-izlikte dawam etedi. Solay etip kristalda arti'q (100) yari'm tegisligi payda boladi'. Ol \vec{F} ku'shinin' ta'sirinde ji'lji'w tegisligi boyi'nsha qon'si' tegisliklerdin' «ji'rti'li'wi'ni'n» esabi'nan qozg'ala aladi'. Jan'a tegisliktin' ji'rti'li'wi' dislokaciya 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'njererin' mayi'si'wi' tap sol ori'nda maksimali'q ma'niske iye (2.8-su'wret).

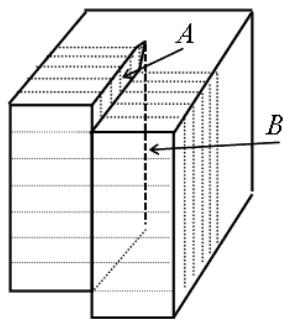


2.9-su'wret. Kristaldi'n' ji'lji'w deformaciyasi'ni'n' bari'si'nda shetlik dislokaciyanı'n' payda boli'wi'ni'n' ha'm qozg'ali'wi'ni'n' sxemasi'.

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

Shetlik dislokaciyalardi' sha'rtli tu'rde on' ha'm teris shetlik dislokaciyalardan dep ekige bo'ledi. On' belgige iye dislokaciyada (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 dislokaciyalardi'n' belgileniwleri de keltirilgen. Eki dislokaciyanı'n' bir birinen tek 180° qa ayi'rmasi'ni'n' bar ekenligin an'g'ari'w q'i'yı'n emes. Sonli'qtan tek bir dislokaciya bar jag'dayda oni'n' belgisi haqqi'nda ga'p etiwdin' keregi joq. Eger dislokaciyanı'n' qasi'nda basqa dislokaciya jaylasqan bolsa, onda dislokaciyalardi'n' belgisin aytı'w za'ru'rliyi payda boladi'. Dislokaciyalardan arasi'ndag'i' serpimli ta'sirlesiw ku'shleri dislokaciyanı'n' belgisine baylani'sli': birdey belgige iye dislokaciyalardan bir biri menen iyterisedi, al ha'r q'i'yli' belgige iye bir biri menen tartı'sadi'.

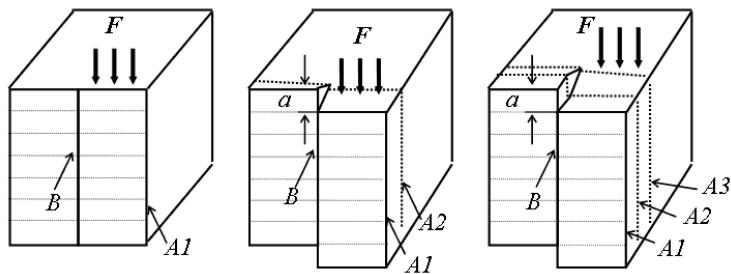
Vintlik dislokaciya. A'piwayi' kubli'q kristal ushi'n vintlik dislokaciya sxema tu'rinde 2.10-su'wrette keltirilgen. Bul su'wrette A tegisliginin' shep ta'repinde jaylasqan atomlar o'zlerinin' ori'nları'nda qalg'an, al on' ta'repindegi atomlar on' ta'reptegige salı'sti'rg'anda to'menge qaray bir tegislikler arasi'ndag'i' qashi'qli'qqa ji'lji'g'an. Usı'ni'n' saldarı'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' shegarası' arqali' o'tiwshi B si'zi'g'i'n vintlik dislokaciya dep ataydi'. 2.10-su'wrette ko'rinipli 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'njererin' 1 da'wirine joqari'g'a ko'teriliwge, al B si'zi'g'i'ni'n' do'geregide bir neshe ret aylani'p shi'qsa pa'njererin' 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'. Usı'nnan vintlik dislokaciya ataması' kelip shi'qsan. Vintlik dislokaciyada barlı'q (010) tegislikleri bo'leklengen bolmay shi'g'atug'i'nli'g'i'n an'g'aramı'z. Sebebi olardı'n' barlı'g'i' da ko'sheri B bolg'an bir quramalı' 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'teriliwde ta'miyinleydi (eger joqarı'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 joqarı'g'a ko'teriliwde 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 joqarı'g'a qaray ji'lji'ti'w kerek). Sonli'qtan vintlik dislokaciyalardan on' vintlik ha'm teris vintlik bola aladi'.



2.10-su'wret.

Vintlik dislokaciyanı'n' a'tirapi'nda atomlı'q tegisliklerdin' jaylasi'wi'ni'n' sxemasi'.

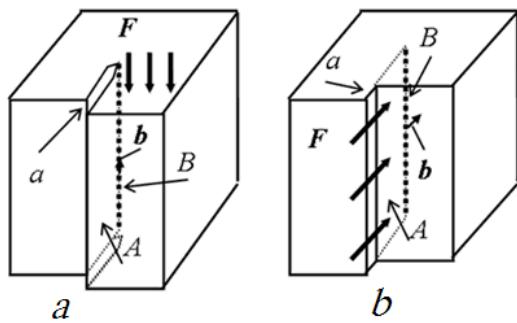
Vintlik dislokaciya kristaldi' 2.11-su'wrette ko'rsetilgendey etip deformaciyalag'anda payda boladi'. A'piwayi' kubli'q pa'njeredege {100} tipindegi tegislikti qaraymi'z. Eger kristalg'a \vec{F} ku'shi menen ta'sir jasasaq (2.11 a su'wret), onda A1 tegisligi strelka menen belgilengen ori'nda B si'zi'g'i' 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 etiwdi dawam ete bersek, onda kelesi tegislik «ji'rti'ladi», bunnan keyin A2 tegisliginin' to'mengi ha'm joqarg'i' bo'limleri 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 etiwdin' aqi'betinde tegisliklerdin' 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'i'n 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 deformaciysi'ndag'i' vintlik dislokaciyanı'n' payda boli'wi' ha'm ji'lji'wi'.

Byurgers vektori'. Vintlik dislokaciyanı' ali'w ushi'n kristaldi'n' u'stinen to'mendegidey modellilik operaciya ju'rgizemiz (2.12 a su'wretti qaran'i'z). Kristalda pa'njerenin' tu'yinleri 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'repindegi atomlardı' bir tegislikler arasi'ndag'i' qashi'qli'qqa to'menge qaray ji'lji'tami'z ha'm A arqali' 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 dislokaciyanı'n' Byurgers vektori' boli'p tabi'ladi'. Oni' \vec{b} arqali' belgileymiz. Vintlik dislokaciyanı'n' Byurgers vektori'ni'n' usi' dislokaciyanı'n' o'zine parallel ekenligi ko'rinipli tur.

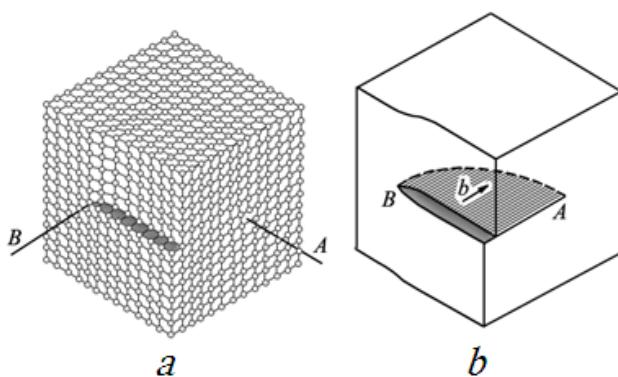


Ris. 2.12.
Vintlik ha'm shetlik dislokaciyalardag'i' kristaldi'n' atomlari'n'i'n' awi'si'wi'ni'n' sxemasi'.
 \vec{b} arqali' Byurgers vektori' belgilengen.

Tap sonday jollar menen shetlik dislokaciyanı' da ali'wg'a boladi'. Buni'n' ushi'n kristaldi'n' «on» ta'repin A beti boyi'nsha «bizden arman qaray» ji'lji'ti'w kerek ha'm B dislokaciysi' si'zi'g'i'nan basqa ori'nlardag'i' baylani'slardı' biriktiriw kerek boladi' (2.12 a su'wret). Kristaldi'n' bul bo'liminin' awi'si'w vektori' Byurgers vektori' boli'p tabi'ladi'. Shetlik dislokaciyanı' Byurgers vektori'ni'n' dislokaciyanı'ni' o'zine perpendikulyar ekenligi ko'rinipli tur.

Aralas tiptegi dislokaciylar. 2.13-su'wrette A ha'm B noqatlari'n tutasti'ri'wshi' aralas tiptegi qi'ysi'q si'zi'qli' dislokaciyaq'a mi'sal keltirilgen. A noqati'nda atomlardi'n' jaylası'wi' shetlik, al B noqati'nda vintlik dislokaciyaq'a sa'ykes keledi. Bunday dislokaciya \vec{b} bag'i'ti'nda ta'sir etetug'i'n \vec{F} ku'shinin' ta'sirinde ju'retug'i'n bir tekli emes ji'lji'w deformaciysi'ni'n' aq'i'betinde payda boladi' (2.13-su'wretti qaran'i'z). Ta'sir etiwdi dawam etsek A - B dislokaciysi' ji'lji'ydi' ha'm shtrixlang'an oblastti'n' maydani' u'lkeyedi. Tap usi'nday aralas tiptegi quramali' dislokaciylar kristallarda jiyi ushi'rasadi'.

Dislokaciyalardi'n' ti'g'i'zli'g'i'. **Dislokaciyalardi' baqlaw usi'llari'.** Dislokaciyalardi'n' ti'g'i'zli'g'i' kristaldi'n' ishinde ali'ng'an maydani' bir birlik bolg'an betti kesip o'tetug'i'n dislokaciyalardi'n' sani'na ten'. Bul shama kristaldi'n' ko'leminin' bir birligindegi barli'q dislokaciyalardi'n' uzi'nli'g'i'na ten'. Dislokaciyalardi'n' ti'g'i'zli'qlari'ni'n' jiyi ushi'rasatug'i'n ma'nisleri ha'm dislokaciyalardi'n' usi'nday ti'g'i'zli'qlari'n u'yreniw ushi'n qollani'latug'i'n usi'llar 2.2-keste berilgen.



2.13-su'wret.
Aralas tiptegi qi'ysi'q si'zi'qli' dislokaciya.

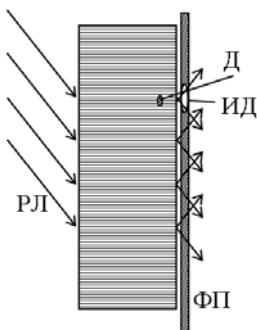
2.2-keste.

Dislokaciyalardi'n' ti'g'i'zli'qlari'ni'n' ma'nisleri ha'm olardi' baqlaw usi'llari'

Dislokaciyalardi' u'yreniw usi'lli'	U'lginin' kali'n'l'i'g'i', mkm	Dislokaciyalardi'n' su'wretinin' ken'ligi, mkm	Dislokaciyalardi'n' maksimalli'q ti'g'i'zli'g'i' (1 sm ² maydandag'i')
Elektron mikroskopiyasi'	$10^{-0} \text{--} 10^{-1}$	10^{-2}	$10^{11} \text{--} 10^{12}$

Rentgen topografiyasi' (kristall arqali' 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 oyi'qlari' boyi'nsha)	qa'legen qali'n'li'qtag'i' u'lgi	0,3-0,5	$10^{-6}-10^{-7}$

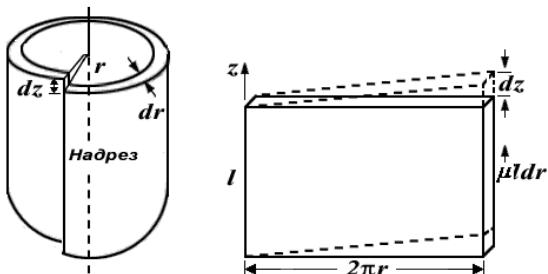
Elektron mikroskoplari'ni'n' ja'rdeinde qa'legen ti'g'i'zli'qtag'i' dislokaciyalardi' baqlaw mu'mkin. Quri'l'i'si' jetkilikli da'rejede jetilisken kristallardag'i' dislokaciyalardi' rentgen topografiyasi'ni'n' ja'rdeinde baqlaydi'. Dislokaciyalardi' baqlaytug'i'n usi'llardi'n' barli'g'i' da dislokaciyalardi'n'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



2.14-su'wret.

Rentgen topografiyasi' ja'rdeinde monokristaldag'i' dislokaciyanı'n' su'wretin payda etiw sxemasi' (kristall arqali' o'tiwshi tolqi'nlardag'i' rentgen topografiyasi').

Dislokaciyalardi'n' energiyasi'. Dislokaciya usi' dislokaciya payda etken kristalli'q pa'njeresinin' mayi'si'w energiyasi' baylani'sli'. Bul energiyani'n' shaması'n dislokaciyanın qashi'qlasqan tutas ortali'q jaqi'nlası'wi'n (priblijenie) ha'm dislokaciyalarg'a jaqi'n qashi'qlı'qlardag'i' bir biri menen ta'sirlesiwshi atomlar modelin qollani'p esaplawg'a boladi'.



2.15-su'wret.

Vintlik dislokaciya jani'ndag'i' kristaldi'n' deformaciyalı'ni'wi'.

Bunday esaplawdi' vintlik dislokaciylar ushi'n ori'nlag'an an'sat. Kristaldi' tutas izotrop ortali'q dep esaplaymi'z. 2.15-su'wrette vintlik dislokaciya jani'ndag'i' serpimli deformaciylar kartinasi' ko'rsetilgen. Bunday jag'dayda dislokaciyanı'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 shaması'na ji'l'i'si'w menen baylani'sqan. Bunday jag'dayda ha'r bir qatlam $\varepsilon = b/2\pi r$ shaması'na ji'l'i'w menen deformaciyalang'an dep esaplay alami'z (ko'rsetpelilik ushi'n 2.15-su'wrette ha'r bir cilindrди burawg'a ha'm payda bolg'an ji'l'i'w deformaciysi'ni'n' shaması'n ani'qlawg'a boladi'). Ji'l'i'w deformaciysi'ni'n' energiyasi'ni'n' ti'g'i'zli'g'i'n sali'sti'rmali' deformaciya ha'm ji'l'i'w moduli μ arqali' to'mendegi formulani'n' ja'rdeminde tabi'wg'a boladi':

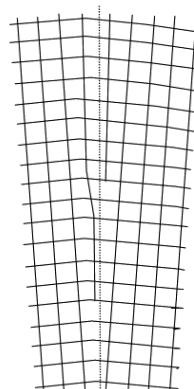
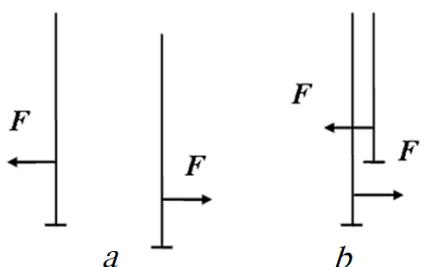
$$w = \mu \varepsilon^2 / 2 = (\mu/2)(b/2\pi r)^2 \quad (2.14)$$

Eger bul formulani' ha'r bir cilindrdrin' 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 dislokaciysi'ni'n' energiyasi'ni'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 esaplwg'a boladi'. R_0 bolsa dislokaciylar arasi'ndag'i' ortasha qashi'qli'q. Oni'n' ma'nisi pa'njere da'wirinin' ma'nisin 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 dislokaciysi'ni'n' «yadrosi'ni'n'» energiyasi' esapqa ali'nbag'an. «Yadro» da bolsa kristalli'q pa'njere ku'shil 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 dislokaciysi'ni'n' 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) $\frac{U}{b} = 10^{-18} \text{ Dj/atom}$ shaması'na ten' bolatug'i'nli'g'i'n ko'remiz. Bul u'lken shama ha'm atomlardı'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'. Dislokaciyalardi' payda etiw ushi'n ten' salmaqli' emes processler (mi'sali' kristallardi' deformaciyalaw) kerek.

Dislokaciyalardi'n' bir biri menen ta'sirlesivi. Dislokaciya deformaciylar maydani'n payda etedi ha'm usi' maydan arqali' basqa dislokaciyalarg'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. Dislokaciyalardi'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.

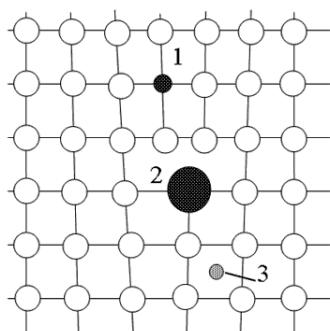
Bir biri menen iyterisetug'i'n (a) ha'm tarti'satug'i'n (b) jag'daylardag'i' eki shetlik dislokaciyanı'n' jaylasi'wi'.

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) dislokaciylar.

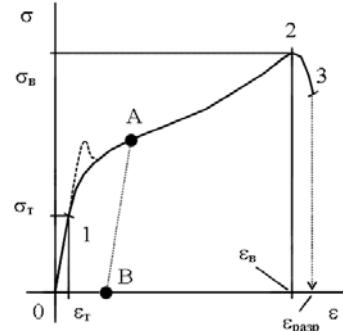
2.16 (b) ha'm 2.17-su'wretlerde keltirilgen dislokaciylar monokristallardi'n' o'siw processinde payda bolatug'i'n kristalli'q pa'njereleri bir birinen azmaz buri/lg'an eki monokristaldi' bir birinen ayi'ri'p turatug'i'n betlerde payda boladi'. Esaplawlar dislokaciylar tap usi'nday boli'p jaylasqanda 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.

Dislokaciylar menen noqatli'q defektlerdin' bir biri menen ta'sirlesowi.
 Dislokaciya, a'sirese shetlik dislokaciya kristalli'q pa'njererenin' 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'nlerda almasti'ri'wshi' iri qosi'mta atomlardı'n', al qi'si'lg'an ori'nlerda almasti'ri'wshi' mayda atomlardı'n' jaylasi'wi' energiyali'q jaqtan uti'mli'. Tu'ynler arasi'na endirilgen iri atomlardı'n' sozi'lg'an ori'nlerda, al qi'si'lg'an ori'nlerda tu'ynler arasi'na endirilgen mayda atomlardı'n' jaylasi'wi' uti'mli'. usi'nday jag'dayda dislokaciyalardi'n' a'tirapi'nda qosi'mta atomlardı'n' ji'ynag'i' payda boli'p, oni' «dislokaciyanı'n' posti'ni'» dep ataydi'. Bul dislokaciylar a'tirapi'ndag'i' lokalli'q deformaciyalardi' ha'm dislokaciyanı'n' energiyasi'n kemeytedi. Plastikali'q deformaciyyada «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' joqarı'raq bolg'an ori'ng'a ko'shedi. Ayi'ri'm noqatli'q defektleri yamasa olardı'n' ji'ynaqları' dislokaciyalardi' turg'an orni'na bekitedi dep esaplaydi'. Elektro mikroskopı'nda dislokaciyalardi'n' a'tirapi'ndag'i' iri ji'ynaqlar baqlanadi'. To'mende keltirilgen mi'salda bekkemlik teoriyası'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), almasti'ri'w qosi'mtasi' bolg'an irirek atom (2), endirilgen atom (3).



Ris. 2.19.

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

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

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

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

Kristallardi'n' plastiklik (elastik) deformaciyasi' ha'm dislokaciyalar. Detalg'a berilgen o'lshemlerdi ha'm formani' beriw ushi'n ko'p materiallardı' texnologiyali'q qayta islew processinde qayti'msi'z tu'rde deformaciyalaydi'. Qayti'msi'z deformaciyalar Guk ni'zami' ori'nlanbaytug'i'n jag'daylarda baqlanadi'. Bul jag'daylarda detallardag'i' kernewlerdin' ma'nisleri sali'sti'rmali' deformaciyan dan quramali' tu'rdegi si'zi'qli' emes g'a'rezlikke iye.

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

- a) mexanikali'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:

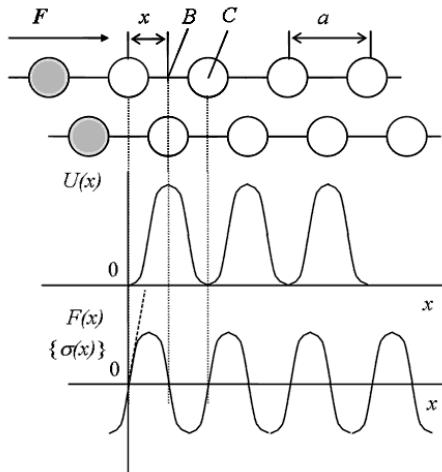
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{l - l_0}{l_0}. \quad (2.16)$$

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'lginin sozg'anda mexanikali'q kernew σ menen sali'sti'rmali' uzayi'w ε shaması' arasi'ndag'i' baylani's ko'rsetilgen. Iymeklik o'zine ta'n u'sh ushastkag'a iye. 0-1 ushastkasi' serpimli qayti'mli' deformaciyaq'a sa'ykes keledi. Bul ushastkada Guk ni'zami' ori'nlanadi'. 1-2 ushastkasi' qayti'mli' emes plastikali'q deformaciyaq'a tiyisli; eger A noqati'nda deformaciyalawdi' 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' dislokaciyalardi'n' a'tirapi'nda topertasqan noqatli'q defektler menen baylani'sli'. Bunday ori'nlerda dislokaciyalardi' orni'nan ji'lji'ti'w qi'yi'ni'raq. Sebebi jan'a ori'nda oni'n' energiyasi'ni'n' joqari'lawi' kerek.

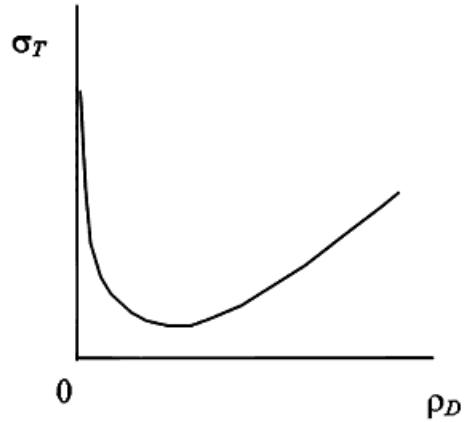
1 noqati'na sa'ykes keliwshi σ shaması'n aqqi'shli'q shegi σ_t dep ataydi', al 2 noqati'na sa'ykes keliwshi kernewdi bekkemlik shegi dep atap, oni' σ_B arqali' belgileydi.

Dislokaciyalardi' esapqa almay kristalli'q denelerdin' bekkemlik shegin esaplaza (bekkemliktin' teoriyalı'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 deformaciysi'ndag'i' aqqi'shli'q shegin esaplawg'a ti'ri'sami'z.

Eksperimentler plastikali'q deformaciyanı'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'nları'nan ji'lji'ydi' ha'm shaması' tu'sirilgen ku'shtin' shaması'na ten' serpimlilik ku'shi payda boladi'. Deformaciya energiyasi'ni'n' ma'nisı usı'ku'shtin' ma'nisı menen baylani'sli'. Deformaciyanı'n' energiyasi' joqari'dag'i' tegisliktegi atomları' to'mengi tegisliktegi atomlardı'n' u'stinde jaylasqang'a shekem (yag'ni'y 2.20-su'wrettegi B noqati'nda) joqari'laydi'. Bunnan keyingi ji'l'i'si'wlarda atomlarg'a S awhali'na «tu'siw» utı'mli' boladi'. Solay etip joqari'da jaylasqan tegislik jan'a ori'ng'a ji'l'i'si'p o'te aladi'. Eger plastikali'q deformaciyan dan keyin monokristallardi'n' betin abaylap tegislese sonday ji'l'i'si'wlardi'n' izlerin «baspaldaqlar» tu'rinde ko'riwge boladi'.



2.20-su'wret. Atomlardı'n' joqarı'da jaylasqan tegisliginin' to'mende jaylasqan tegisligine salı'sti'rg'andag'i' ji'lji'wi'ni'n' esabi'nan ju'retug'i'n deformaciyanı'n' sxemasi'.



2.21-su'wret. Aqqı'shli'q sheginin' dislokaciyalardı'n' ti'g'i'zli'g'i'nan sxema tu'rindegi g'a'rezligi.

Joqarg'i' tegislikti to'mengi tegislikke salı'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 onı'n' menen baylani'sli' bolg'an potencial energiyadan paydalanami'z. 2.20-su'wrette usı' ku'sh ha'm onı'n' menen baylani'sli' potencialı'q energiyani'n' x koordinatasi'nan g'a'rezligi keltirilgen. $\sigma_c(x)$ 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 arqali' tegislikler arasi'ndag'i' qashi'qli'q belgilengen. Bul sinusoidani'n' amplitudasi'ni'n' ma'nisin biz esapladi'q. Buni'n' ushi'n x ti'n' kishi ma'nislerinde sinusoidani'n' qi'yali'g'i'ni'n' tangensi $\mu \varepsilon = \mu(\frac{x}{d})$ shaması'na ten' boli'wi' kerekligin 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 $\sigma_c(x)$ shaması' o'zinin' maksimalı'q ma'nisine iye boladi'. (2.17)-formula ja'rdeinde 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 beredi. Bunday ku'shli ayı'rmanı'n' sebebi mi'nadan ibarat: joqarı'dag'i' tegislikte jaylasqan atomlardı'n' barlı'g'i'ni'n' to'mengi tegislikte jaylasqan atomlarg'a salı'sti'rg'anda bir waqı'tta ji'li'sadi' dep esapladi'q. Bul duri's emes. Sebebi joqarı'dag'i' yarı'm tegisliktin' 1 atomlar arası'ndag'i' qashi'qli'qqa ji'lji'wi' dislokaciyanı'n' ji'lji'wi' menen de a'melge asadi' (bul 2.9-su'wrette ko'rsetilgen). Bunday ji'lji'w ushi'n a'dewir kishi ku'sh kerek boladi'. Sebebi endi ji'lji'wda barlı'q atomlı'q baylani'slardi'n' bir waqı'ttag'i' u'ziliwi ori'n almaydi', al dislokaciyanı'n' qasi'ndag'i' baylani'slar g'ana u'ziledi.

Plastikali'q deformaciyanı'n' dislokaciyalı'q mexanizmi ta'jiriybelerde baqlanatug'i'n ag'i'w sheginin' ma'nislerin (σ_T ha'm σ_B shamaları'n), 2.19-su'wretteki 1-2 ushastkasi'ndag'i' $\sigma(\varepsilon)$ g'a'rezliginin' o'siwin de tu'sindire aladi'. Deformaciyada da'slep a'zzi berkigen dislokaciylar, al keyin ku'shlirek berkigen dislokaciylar qozg'ala baslaydi'. Sonı'n' menen birge deformaciyanı'n' bari'si'nda dislokaciyalardı'n' sani' ha'm basqa da defektler ko'beyedi.

Materialdı'n' ag'i'w shegi usı' materialdag'i' dislokaciyalardı'n' ti'g'i'zli'g'i'nan ju'da' ku'shli g'a'rezli. 2.21-su'wrette usı'nday g'a'rezlik ko'rsetilgen. Dislokaciyalardı'n' ti'g'i'zli'g'i' (ρ_D) kishi bolg'anda ag'i'w shegi σ_T shaması'ni'n' u'lken bolatug'i'nli'g'i', al ρ_D

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

Materiallardı'n' bekkemligin joqari'lati'w jolları'. Ha'zirgi waqi'tlari' bekkemlik shegin 0,01 μ ge shekem jetkeriwge mu'mkinshilik beretug'i'n materiallardı'n' bekkemligin joqari'latatug'i'n ko'p sanlı' usi'llar bar. Olardi'n' ko'pshılıgi dislokaciyalardi'n' qozg'ali'wi'na mu'mkinshilik bermeytug'i'n qosı'msha tosqı'nli'qlardi' kirgiziw menen baylani'sli'. Usı'nday tosqı'nli'qlarg'a mi'sal retinde kristalli'q pa'njererin' to'mendegidey defektlerin ko'rsetemiz:

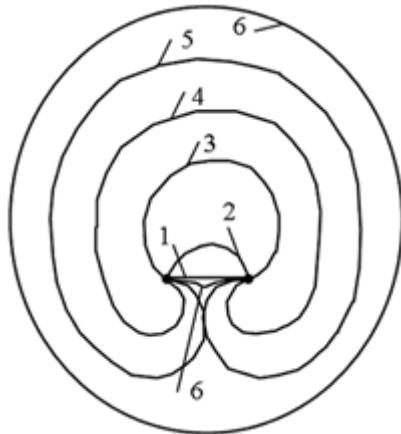
- 1) basqa fazani'n' ayri'li'p shi'g'i'wi' (bul haqqı'nda to'menirekte ga'p etiledi);
- 2) noqatlı'q defektler ha'm olardi'n' toparlari' (dara jag'dayda joqari'da ga'p etilgen «dislokaciyalar postı'ni'»);
- 3) dislokaciyalardi'n' qozg'ali'wi'n qi'yi'nlastı'ratug'i'n dislokaciyalardi'n' o'zlerinin' ko'p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

Qo'pshılık 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' atomlardı'n' qorshap turi'wi'na ti'ri'sadi'. Usı'nday jollar menen quymani'n' kishi energiyag'a iye boli'wi' ta'miyinlenedi. dislokaciyalardi'n' qozg'ali'w bari'si'nda atomlar arası'ndag'i' energiyali'q jaqtan utı'mli' baylani'slar u'ziledi ha'm energiyali'q jaqtan utı'mli' emes baylani'slar qa'liplesedi. Buni'n' ushi'n u'lken energiya talap etiledi, al bul o'z gezeginde dislokaciyalardi' ji'liji'ti'w ushi'n za'ru'rli bolg'an ku'shlerdin' o'siwine, aqı'rg'i' esapta kristalli'q materialdi'n' bekkemliginin' artı'wi'na ali'p keledi.

Joqari'da keltirilgen usi'llar bekkemlikti a'dewir joqari'latatug'i'n bolsa da, a'dette materialdi'n' plastikligin ku'shli to'menletedi.

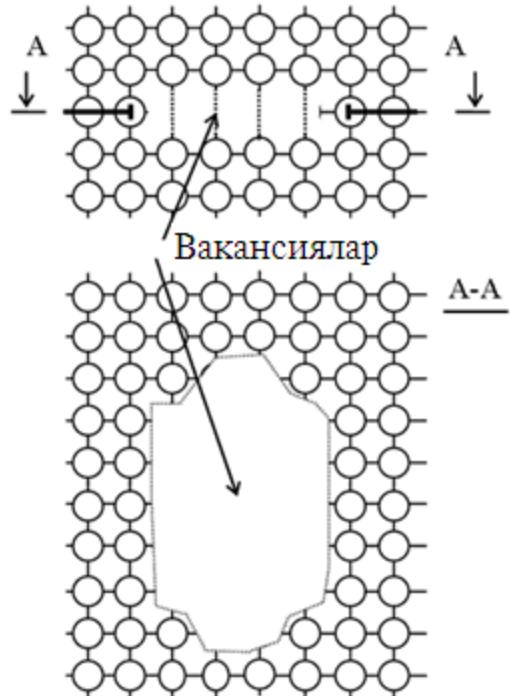
Kristaldi'n' bekkemligi dislokaciyalardi'n' ti'g'i'zli'g'i' kishi bolg'an jag'daylarda da ori'n aladi'. Bunday jag'daydarda kristallardi'n' dislokaciyalı'q mexanizm menen deformacyalani'wi' qi'yi'nshi'li'q penen ju'zege keledi (dislokaciyalar az bolg'anlı'qtan).

Dislokaciyalardi'n' payda boli'wi'. Joqari'da aytı'li'p o'tilgenindey, dislokaciyalar tiykari'nan kristallardi'n' plastiklik deformacyasi'ni'n' na'tiyjesinde payda boladi'. Plastikali'q deformacyadag'i' dislokaciyalardi'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 atomlardı'n' ji'ynaqları', basqa faza oblastları' ha'm basqalar boli'wi' mu'mkin. Si'rttan mexanikali'q kernew tu'sirilgende dislokaciya ji'liji'ydi' ha'm 2, 3, 4 awhallari'nan izbe-iz o'tedi. En' aqı'ri'nda 5-awhalda dislokaciyanı' shıp ha'm on' ta'replerdegi yarı'm ilmekleri bir biri menen tiyisedi, do'n'gelek formag'a iye (6) dislokaciyalı'q ilmekti payda etedi. Bul ilmek bolsa mexanikali'q kernewdin' ta'sirinde 1 forması'na keledi. Bunnan keyin process qaytalanadi' ha'm kelesi dislokaciya payda boladi'.



2.22-su'wret.

Dislokaciyalardi'n' Frank-Rid istoshnigi
(deregisi)

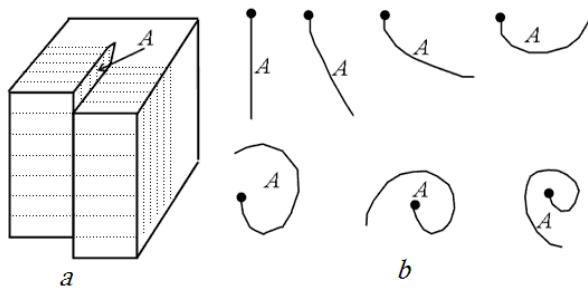


2.23-su'wret. Aralas tiptegi

dislokaciyalarg'a ekvivalent bolg'an tuyi'q
si'zi'q tu'rindegi vakansiyalardi'n' disk
ta'rızlı ji'ynag'i' (toparlası'wi').

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

Dislokaciylar ha'm kristallardi'n' o'siwi. Vintlik dislokaciyalari' kristallardi'n' (balqi'g'an suyi'q fazadan, eritpeden ha'm puwlardan) o'siwin jen'illestiredi. Sebebi vintlik dislokaciyg'a baylani'sli' kristaldi'n' betinde payda bolg'an tekshe 2.24-su'wrette A arqali' 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 dislokaciyanı'n' kristaldi'n' o'siwin
jen'illestiriwi (a) ha'm A tekshesinin'
asti'ndag'i' oblastqa atomlar kelip
kristalg'a qosı'lg'anda dislokaciyanı'n'
formasi'ni'n' o'zgeriwinin' izbe-izligi (b).

Jetkilikli da'rejede jetilisken kristallardi'n' betinde sonday teksheler jiyi baqlanadi'.
Ma'sele.

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

Betlik ha'm ko'lemlik defektler

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'wirlilik buzi/lg'an oblastlar bazi' bir denenin' (mi'sali' ellipsoidti'n') formasi'na iye boladi'. Oni'n' barli'q o'lshemleri 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'qtin' 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'lli'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'pshiliqi bir biri menen baylani'spag'an bir neshe kristalliziciyalani'w orayi'nda o'se baslaydi'. Sonli'qtan olar kristalli'q pa'njerelerinin' orientaciyalari' bir birine jaqi'n da'neshelerden turadi'. Bul da'neshelerdin' arasi'ndag'i' shegarada atomlardi'n' jaylasi'wlari'ndag'i' da'wirlilik 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'qt'i'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 unamlı' aqibetlerge ali'p kelmeytug'i'n reakciyag'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. Reakciyalardi'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 korroziyali'q qa'siyetine unamsi'z ta'sirlerin kemeytiwdin' ko'p sanli' usi'llari' bar.

Birinshi usi'll 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' migraciysi' ori'n aladi' ha'm da'nesheler arasi'ndag'i' shegaralardag'i' kernewlerdin' ma'nisni kemeyedi. Usi'ni'n' aqibetinde shegara boylap diffuziyani'n' o'towi ki'yi'nlasadi' ha'm kristaldi'n' korroziyali'q 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 paydalanimi'. 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'lemdi 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' bekkevligi menen plastikligin a'dewir to'menletedi.

Kishi (mikro) ko'lemdi iyeleytug'i'n basqa kristalli'q fazalar materiallardi'n' bekkevligin 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'rtipli 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 iyerisiw 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' shaması' 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 teoriyası'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' superpoziciyasi' si'pati'nda tabi'ladi'.

Kristallardi'n' ha'm molekulalardi'n' ji'lli'li'q qa'siyetlerinin' klassikali'q teoriyası'nda da, kvant teoriyası'nda da kristaldi' ω_i individuali'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' $C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V = N_A 3k = 3R$ shaması'na ten' boladi'. Bul Dyulong ha'm Ptı 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 $3R$ shaması'na ten'. Bul ni'zam sali'sti'rmali' joqari' temperaturalarda (700-2000 K) g'ana jaqsı' 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 teoriyası' a'dewir joqari' da'llikte ta'ripleydi. Bul kvantli'q teoriyanı'n' tiykari'nda ji'lli'li'q nurlani'wi' teoriyası'ndag'i' elektrömagnit terbelislerdin' energiyasi'ni'n' kvantlang'anlı'g'i' si'yaqli' atomlardi'n' terbelis energiyasi'ni'n' kvantlani'wi' haqqi'ndag'i' boljaw jatadi'.

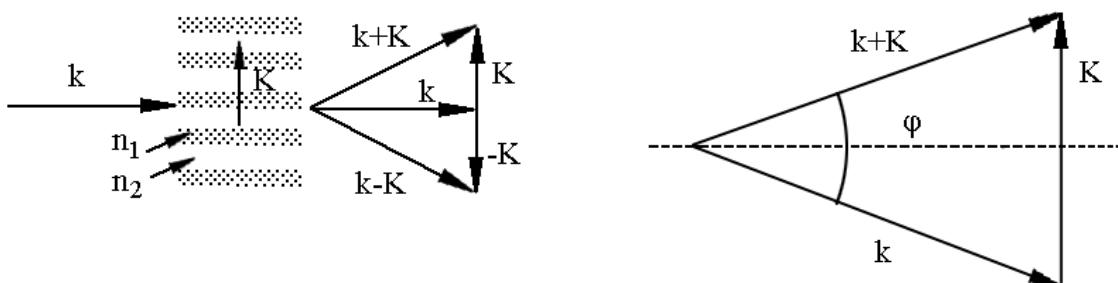
Kvant teoriyası'na sa'ykes ha'r bir normal terbelistin' energiyasi' jeke oscillyatordi'n' energiyasi' si'yaqli' kvantlanadi'. $\hbar\omega$ energiyasi'n oscillyatordi'n' terbelislerinin' energiyasi'ni'n' kvanti' (porciyasi') dep esaplaydi'. Al kvantti'n' o'zin fonon dep ataw, oni' energiyasi' $E = \hbar\omega$, impulsı $\vec{p} = \hbar\vec{K}$ shaması'na ten' bo'lekshe dep qaraw qabi'l etilgen. Normal terbelislerdin' bir birinen g'a'rezsizligin paydalani'p oni' Boze gazi' teoriyası'n ta'riplew ushi'n qollanadi'. Al Boze gazi' teoriyası' fononlardi' Boze bo'leksheleri dep qaraydi'. Biz to'mende kristaldi'n' terbelislerinin' kvant teoriyası'ni'n' ta'jiriybelerde baqlani'p ju'rgen ko'plegen qubi'li'slardı' 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 sheshiwrde fotonlardi'n' xarakteristikaları' biliw ju'da' a'hmiyetli. Al fotonlardi'n' xarakteristikaları'n eksperimentlerde u'yreniwge boladi'.

Fononlardı' eksperimentte u'yreniw usılları'

Bir fononni'n' energiyasi' menen impulsin ani'qlawg'a mu'mkinshilik beretug'i'n fononlardı'u'yreniw usılları'n qarap o'temiz. Bul usıllar fononni'n' kristalga kelip tu'siwshi bo'leksheler menen (neytronlar, elektronlar, fononlar yamasa fotonlar) ta'sir etisiwine tiykarlang'an. Bunday ta'jiriybelerde kristalga kelip tu'siwshi ha'm kristalda shashi'rag'an bo'lekshelerdin' energiyaları' menen impulsları' o'lshenedi. Bunnan keyin saqlanı'w ni'zamları' tiykari'nda (energiya menen impulstin' saqlanı'w ni'zamları' tiykari'nda) fononlardı'n' energiyaları' menen impulsları' 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 bolsı'n. Eger kristalda energiyasi' $E = \hbar\Omega$, impulsı $\vec{p} = \hbar\vec{K}$ bolg'an fonon bolatug'i'n bolsa, onda fonon menen baylani'sli' bolg'an serpimli tolqi'n kristaldi'n' bir oblastı'n qi'sadi', al ekinshi oblastı'n sozadi'. Bul o'z gezeginde kristaldi'n' ha'r qi'yli' oblastları'nda si'ni'w ko'rsetkishi n nin' o'zgeriwine ali'p keledi. Na'tiyjede difrakciyalı'q pa'njerege usag'an jag'day payda boladi' (3.1-su'wretti qaran'i'z). Bul difrakciyalı'q pa'njerege kelip tu'sken fotonlar difrakciyag'a ushi'raydi'. 3.1-su'wrette fotonlardı'n' tiykarg'i' shashi'ramag'an tolqi'ni' menen bir qatarda minimum eki difrakciyalı'q tolqi'nni'n' payda bolatug'i'nli'g'i' ko'rınip 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' modulyaciysi'n ju'zege keltiredi dep esaplaymi'z



3.1-su'wret.

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

3.2-su'wret.

Fotonlar menen fononlardı'n' bir biri
menen ta'sirleskendegi vektorları'
arasi'ndag'i' qatnaslar.

Foton menen fononni'n' ta'sirlesiwini vektorlardı'n' ja'rdeinde ko'rsetken qolaylı' (3.2-su'wretti qaran'i'z). Energiyasi' $E = \hbar\omega$ ha'm impulsı $\vec{p} = \hbar\vec{k}$ bolg'an foton energiyasi' $E = \hbar\Omega$ ha'm impulsı $\vec{p} = \hbar\vec{K}$ shamaları'na ten' fonondı' payda etkende onı'n' energiyası' menen impulsı basqa ma'nislerge iye boladi'. Olardi' sa'ykes $E' = \hbar\omega' \text{ ha'm } \vec{p}' = \hbar\vec{K}'$ arqali' belgileymiz. 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 impulsin' 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 ν , al fotonlardi'n' tezligin c arqali' belgileymiz. Haqi'ykati'nda da $\omega = ck$ ha'm $\Omega = \nu K$. $c \gg \nu$ bolg'anli'qtan (3.1) ge sa'ykes $\omega = \omega'$ ha'm $k = k'$. Bul foton menen fonon ta'sir etiskende fotonni'n' jiyiliği 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' jiyiliği menen fotonni'n' jiyiligin baylani'sti'ratug'i'n formulani' ali'w mu'mkin (bul formula Kompton formulasi'na sa'ykes keledi).

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

ν/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'mkinshiliği bolmaydi'.

Jaqtı'li'qtı'n' fononlardag'i' shashi'rawi'. Jaqtı'li'qtı'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 jaqtı'li'qtı'n' spektri registraciyanadi'. Usi'nday jollar menen \vec{k} ha'm \vec{k}' vektorlari'ni'n' bag'i'tlari' ani'qlanadi'. Shashi'rag'an jaqtı'li'q nurlari'ni'n' spektrinde jiyiliği 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'. Jaqtı'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) fononlardı' izertlew mu'mkinshiliği tuwi'ladi'.

Rentgen nurlari'ni'n' fononlardag'i' shashi'rawi'. Bul usi'l menen tek kishi tolqi'n uzi'nli'g'i'na iye fononlardı' u'yreniwge boladi'. Sebebi rentgen nurlari' ushi'n $|k|$ ni'n' shamasi' Brillyuen zonası'ni'n' shamasi'na barabar. Ta'jiriyybenin' sxemasi' jaqtı'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 registraciyanadi'. 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 jiyiliği 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 qosı'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 qı'yı'n bolg'an eksperimentalli'q ma'seleler qatari'na kireti ha'm Ω shamasi'ni'anı'qlaw da'llligi ju'da' to'men boladi'.

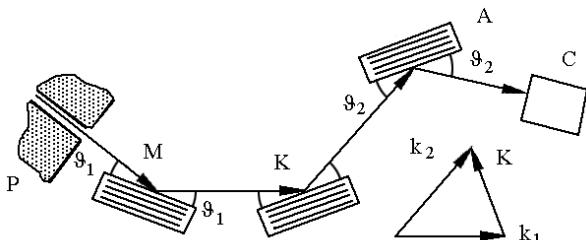
Neytronlardı'n' fononlardag'i' shashi'rawi'. Neytronlardı'n' fononlardag'i' shashi'rawi' usi'li' ha'zirgi waqi'tlardag'i' fononlardı' u'yreniwdin' en' ko'p mag'li'wmatlardi'

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' keri pa'njere vektori' belgilengen.

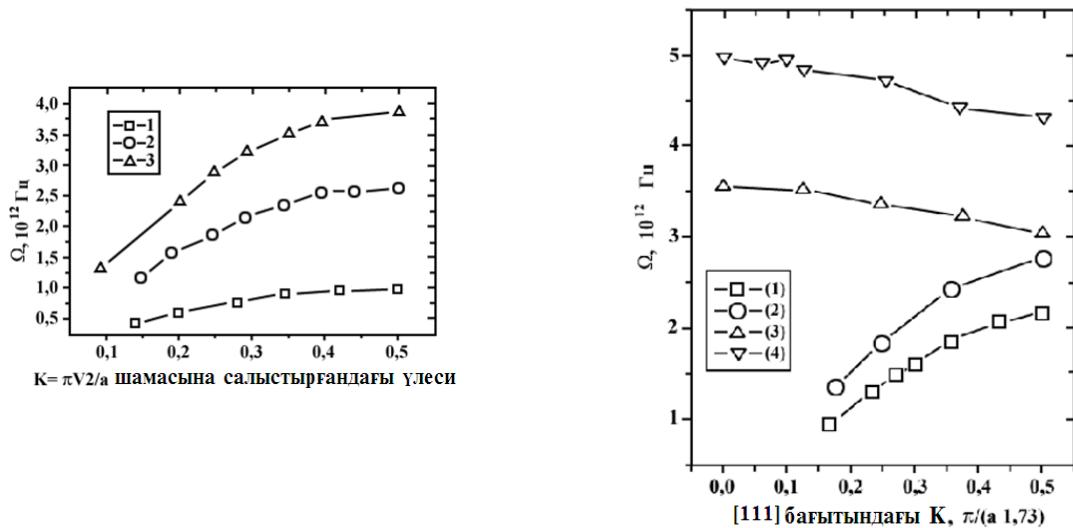
Eksperiment sxemasi' 3.3-su'wrette keltirilgen. P yadroli'q reaktordan shi'qqan ji'lli'li'q neytronlari'ni'n' da'stesi M monoxromatori'na kelip tu'sedi (monoxromator jetilisken, yag'ni'y defektleri joq monokristaldan sog'i'ladi'). Kristaldan Vulf-Bregg sha'rtine sa'ykes belgili bir tolqi'n uzi'nli'g'i'na 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'lgidie shashi'rag'an neytronlar monokristall-analizator A g'a kelip tu'sedi. Kristall-analizator bolsa neytronlardı' Vulf-Bregg sha'rti boyi'nsha C esaplag'i'shi'na qaray shag'i'li'sti'radi'. Analizatordi' paydalani'w shashi'rag'an neytronlardı'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 neytronlardı'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 shamasi'ni'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'.

Neytronlardı' 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 neytronlardı'n' fononlardag'i' shashi'rawi' quwatli' yadroli'q reaktori' bar ilimiylor 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.



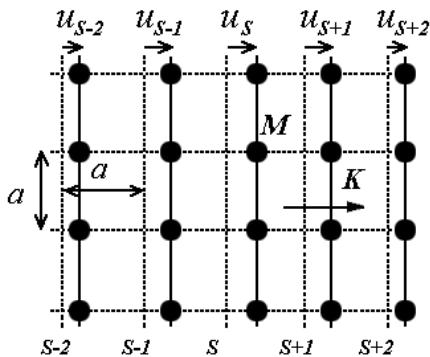
3.4-su'wret. Neytronlardı'n' fononlarda shashi'rawi'n u'yretiwde ali'ng'an fotonlardı'n' dispersiyali'q g'a'rezligi.

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

Kristallardag'i' atomlardı'n' terbelisleri

Endi bizler fononlar ushi'n dispersiyali'q g'a'rezlikti teoriyalı'q jollar menen ani'qlaw ma'selesi 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'rdeinde sheshedi.

Bir o'lshemli jag'day. A'piwayi'li'q ushi'n da'wiri a shaması'na ten' primitivlik elementar qutı'shag'a iye kubli'q kristaldag'i' atomlardı'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'nlardı'n' da tap usi'nday jollar menen u'yrenile tug'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'njererin' 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) us shaması'na awi'sadi'. Tegislikte jaylasqan atomlardı'n' barlı'g'i' da birdey boli'p terbeledi. Usı' 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 us shaması' kishi bolg'anda) bul ku'shtin' shaması' tegisliklerdin' ten' salmaqli'q orni'nan awi'si'wlar ayi'rması' bolg'an us_{s+p} – us shaması'na proporsional. Qosi'ndi' ku'sh F_s shaması' F_{sp} ku'shlerinin' qosi'ndi'si'na ten':

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

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

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

us funkciyası' boyli'q tegis tolqi'n tu'rinde izleymiz:

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

(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:

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

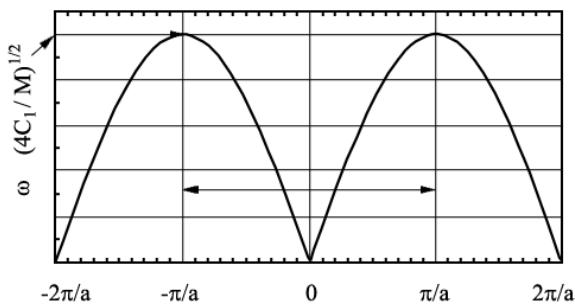
Eger qarap ati'rg'an pa'njeremizdegi ha'm cos(a) = [exp(ia) + exp(-ia)]/2 an'latpasi'ndag'i' simmetriyani', onda C_p = C_{-p} ekenlige iye bolami'z ha'm to'mendegidey an'latpa alami'z:

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

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 = ±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 zonası'ni'n' shegarasi'nda jaylasqan ekenligin eske tu'siremiz) $\omega(K)$ dan K boyi'nsha ali'ng'an tuwi'ndi' nolge ten' ekenligi ko'rinipli tur. Bul fononni'n' toparli'q tezliginin' (gruppovaya skorost) nolge ten' ekenlige sa'ykes keledi.



3.6-su'wret.

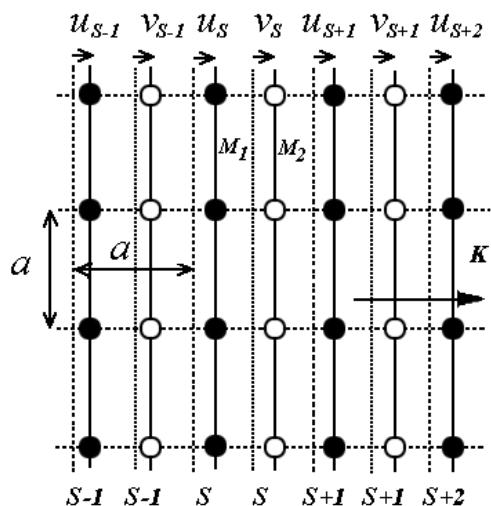
Primitivlik kubli'q pa'njeredegegi [100] bag'i'ti'nda tarqalatug'i'n tegis boyli'q tolqi'nni'n' jiyiligi ω ni'n' tolqi'n vektori' K dan g'a'rezligi.

$\omega(K)$ 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-qarsı' 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 jaylasqan ori'n larg'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' interferenciyalı'q ku'sheyowi menen baylani'sli'. Haqi'yati'nda da a qashi'qli'g'i'nda jaylasqan atomlardan shag'i'li'sqan atomlardi'n' bir birin ku'sheytıw sha'rtı $\Delta_{opt} = 2a = \lambda n = \frac{2\pi}{K}$ ($n = 1$). Bunnan $K = \frac{\pi}{a}$.

U'sh o'lshemli pa'njerede fononlar rentgen nurları' si'yaqli' atomlı'q tegisliklerde de shag'i'li'sa aladi'. Interferenciyalı'q ku'sheyowi sha'rtı Vulf-Bregg ten'lemesi boli'p tabi'ladi'. Bul sha'rt fononni'n' tolqi'n vektori'ni'n' Brillyuen zonası'ni'n' shegarası'na tu'siwine sa'ykes keledi.

(3.7)-formula boyi'nsha atomlardı'n' terbelisin u'yrengende K shaması'na keri pa'njerenin' vektori'na ten' $2\pi n/a$ shaması'n qosqanda da atomlardı'n' qozg'ali's ni'zami'ni'n' o'zgermeytug'i'nlı'g'i'ni'n' kelip shi'g'atug'i'nlı'g'i'n an'sat an'g'ari'wg'a boladı'. Sonlı'qtan bir qarap atı'rg'an a'piwayı' jag'dayda atomlardı'n' qozg'ali'sları'n u'yreniw ushi'n $K \leq \pi/a$ sha'rtın qanaatlandı'ratug'i'n K ni'n' ma'nislerin ali'w jetkilikli. U'sh o'lshemli ken'islikte bul sha'rtke Brillyuennin' birinshi zonası'ni'n' ishinde jaylasqan K vektorları'n'ni'n' ma'nisleri qanaatlandı'radi'.

Bazisi eki atomnan turatug'i'n quti'shani'n' atomlari'ni'n' terbelisi. Tu'sindiriwdi a'piwayı'lastı'ri'w ushi'n da'wiri a g'a ten' primitiv elementar quti'shang'a iye kubli'q kristaldi' qaraymi'z (3.7-su'wret). Meyli atomlardı'n' massaları' M_1 ha'm M_2 shamaları'na ten' bolsı'n.



3.7-su'wret.

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

Bul kristaldagı' [100] bag'i'ti'n ha'm usı' bag'i'tta tarqalatug'i'n tegis boyli'q tolqi'ndı' qaraymi'z (ko'ldeñen' 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] us shaması'na 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 us ha'm vs 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' shaması'n 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 $v_s - u_s$ ayl'rmalari'na proporsional 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 izleymiz:

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

(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 sistemanı' alami'z:

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

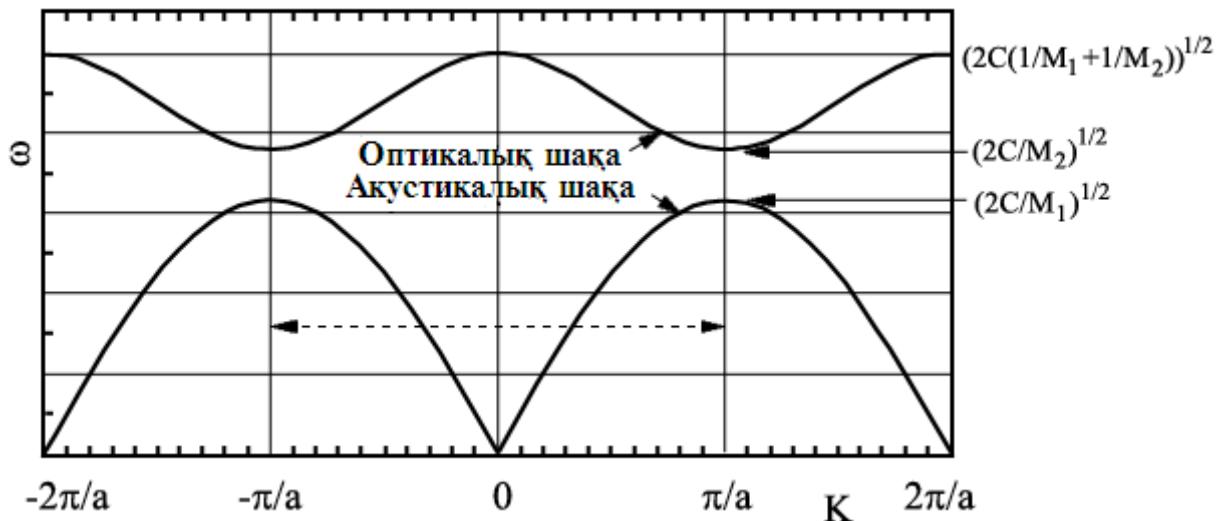
Eger bul ten'lemelerdin' ani'qlawshi'si' (opredeliteli) nolge ten' bolsa, onda olar nollik emes sheshimlerge iye boladi'.

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

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'qtı'yarlı' K lar ushi'n (3.15)-ten'lemeni sheshiwdin' na'tiyjeleri 3.8-su'wrette keltirilgen.



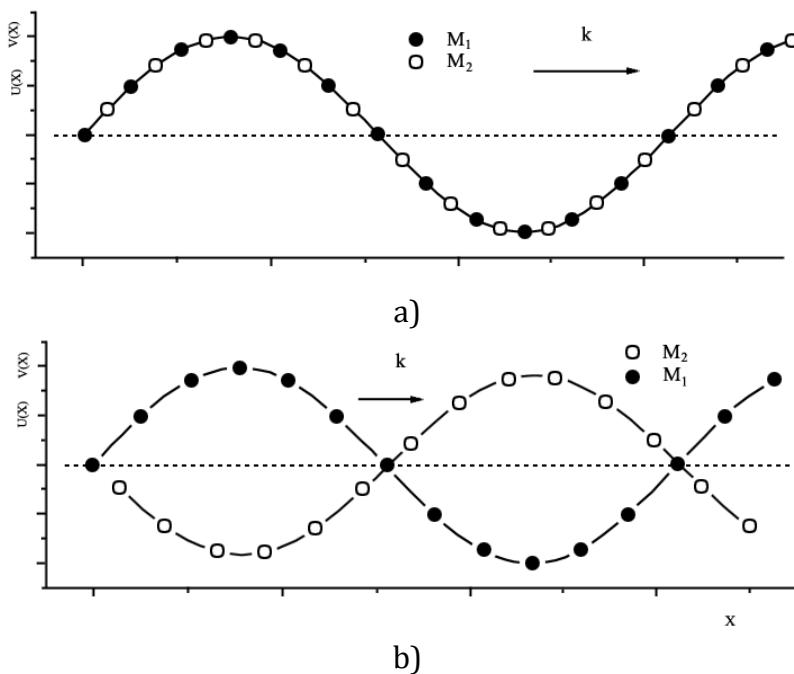
3.8-su'wret. Bazisi eki atomnan turatug'i'n kubli'q pa'njerede [100] bag'i'ti'nda tarqalatug'i'n tegis boyli'q tolqi'nni'n' jiyiligi ω shaması'nı'n' tolqi'n vektorı' K dan g'a'rezligi.

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.
Atomlardı'n' ko'ldeñen' terbelislerindegi atomlardı'n' awi'si'wi'ni'n' akustikali'q (a) ha'm optikali'q tipleri (b).

Optikali'q shaqa ushi'n (3.13) ten atomlardı'n' shama menen qarama-qarsı' 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'rın (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' zaryadlarg'a 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'rın kristalg'a o'zgermeli serpimli ta'sir etiw arqali' payda etiwge boladi' (3.9 a su'wret). Bul tutas ortalı'qtı'n' uzi'n tolqi'nli' jaqi'nlası'wi'ndag'i' atomlardi'n' akustikali'q terbelislerine sa'ykes keledi. Bunday jag'dayda atomlar bir biri menen kelisen 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 shaması' 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'bardin' optikali'q shaqag'a, al kishi tu'bardin' akustikali'q shaqag'a tiyisli bolatug'i'nli'g'i' ko'rinipli tur.

(3.14)-ten'leminen' sheshimlerinin' bolmaytug'i'n ω^2 shaması'ni'n' oblasti'ni'n' bar ekenligi ko'rinipli tur. Demek bunday oblast ushi'n eki atomli' elementar qutı'shası' 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 ortalı'qta tolqi'nni'n' amplitudasi'ni'n' tez kemeyiwine sa'ykes keledi.

Ko'p atomli' pa'njererin' 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'lemlerden turatug'i'n sistemani' sheshiwge tuwri' keledi. Elementar qutı'shası' r atomg'a iye kristal ushi'n (3.14)-ten'leminen' boyli'q ha'm ko'l denen' tolqi'nlar 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'leminen' tutas ortalı'qlardi'n' 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'i'z.

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' qatnislari'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

q'i'yı'nshi'li'qtı' payda etpeytug'i'n bolsa da, ma'selenin' birinshi bo'limi matematikali'q ko'z-qarastan ju'da' quramali'. Usı' ku'nleri bunday ma'seleler a'piwayı' molekulalar ushi'n g'ana sheshilmekte. Sonlıqtan oscillyatorlardı'n' menshikli jiyiliklerin esaplawdi'n' a'piwayı'lastı'ri'lg'an usı'lları' qollani'ladi'. Bul usı'llardi'n' ayı'ri'mlari'n biz to'mende qarap shı'g'ami'z.

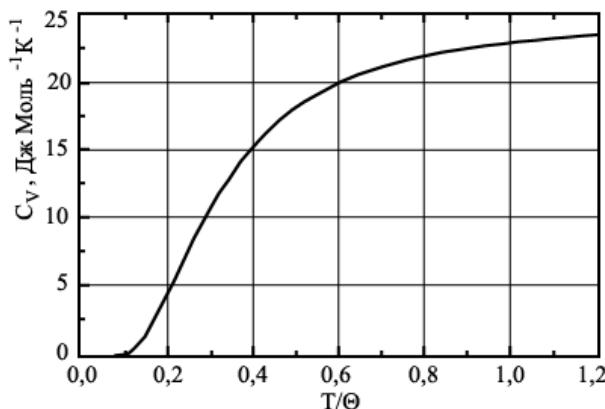
Eynshteyn modeli. Eynshteyn modelinde barlı'q atomlar bir birinen g'a'rezsiz terbeledi ha'm barlı'q atomlardı'n' terbelis jiyilikleri birdey. Bunday jag'dayda N dana atomg'a iye kristaldi'n' ishki energiyasi'n esaplaw ushi'n tek bir oscillyator kerek boladi'. Bunnan keyin na'tiyjeni oscillyatorlardı'n' sani' bolg'an 3N sani'na ko'beytiw kerek. Meyli ha'r bir oscillyator ω jiyiliği menen terbelsin. Bunday oscillyatordı'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 $\langle n \rangle = \frac{1}{\exp(\hbar \omega / kT) - 1}$ arqali' oscillyatordag'i' «toplangu'an» energiya kvantları'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 boyı'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 joqarı' 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.
Oscillyatordı'n' jiyiliği $\omega = k\Theta/\hbar$ 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 joqarı' 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'shinski 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 atomlardı'n' terbelislerinin' bir birinen g'a'rezsizligi haqqı'ndag'i' gipotezani'n' duri's emes ekenligine baylani'sli'. Kristaldi' qurawshi' atomlar bir biri menen ta'sirlesedi, usı'ni'n' na'tiyjesinde kristallarda ha'r qı'yı' uzi'nli'qtag'i' serpimli tolqi'nlar payda boladi'. Bul tolqi'nlar atomlardı'n' bir birine baylani'sli' bolg'an kollektivlik terbelislerine sa'ykes keledi.

Biraq usi'nday kemshilagine 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 fononlardı'n' (olardi'n' jiyiliqi 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' jiyiliqi kishi. kT shaması'ndag'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' shaması' $\hbar\omega$ shaması'na ten'. Sonli'qtan to'mengi temperaturalarda $\hbar\omega >> kT$ sha'rti ori'nlanatug'i'n bolg'anli'qtan oscillyatordi'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' shaması' 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'. Fononlardı'n' ruqsat etilgen tolqi'n vektorlari'ni'n' ma'nislerin ko'binese Fermi-gaz teoriyası'nda Plank tarqali'wi'n keltirip shi'g'ari'w sxemasi' boyi'nsha a'melge asi'radi'. Atap aytqanda o'lshemi 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:

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

Bunnan keyin kristaldi'n' serpimli terbelislerin ta'ripleytug'i'n $f(x, y, z, t)$ funkciyası'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

$$\exp(iL K_x) = 1; \quad \exp(iL K_y) = 1; \quad \exp(iL K_z) = 1; \quad (3.21)$$

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

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

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} shaması'nan 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 teoriyalı'q jollar menen esaplaydi'. Bunnan keyin \vec{K} vektori'ni'n' ruqsat etilgen

ma'nisleri oblasti'n shekleri ishinde $\omega(\vec{K})$ shaması' az o'zgeretug'i'n ushastkalarg'a bo'ledi. Bul procedura Eynshteyn modelinde paydalani'lg'an formulalardı' paydalani'wdi'n' mu'mkin boli'wi' ushi'n islenedi. Bunnan keyin sanlı' usi'llar ja'rdeinde esaplanı'p ati'rg'an fizikali'q shamag'a (mi'sali' ishki energiyag'a) barlı'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 shaması' \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 shaması'ni'n' qasi'nda d ω intervali'nda neshe normal terbelistin' bolatug'i'nli'g'i'n ko'rsetedi). d ω intervali'ndag'i' normal terbelislerdin' sani'n dN arqali' belgilesek:

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

$D(\omega)$ ni'n' ja'rdeinde 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 $\omega = K\nu$ formulası' qabi'l etiledi (ν arqali' ses tolqi'nlari'ni'n' tezligi belgilengen). Usi'nday jaqi'nslasi'wdi' tutas ortalı'q jaqi'nslasi'wi' dep ataydi'. Bunday jaqi'n keliwde fononlardı'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 ν tezliginin' ma'nisi retinde ko'ldenen' ha'm boyli'q tolqi'nlardi'n' tezlikleri arasi'ndag'i' ortasha ma'nis ali'nadi' (ko'ldenen' ha'm boyli'q tolqi'nlardi'n' tezlikleri arasi'ndag'i' 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':

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

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

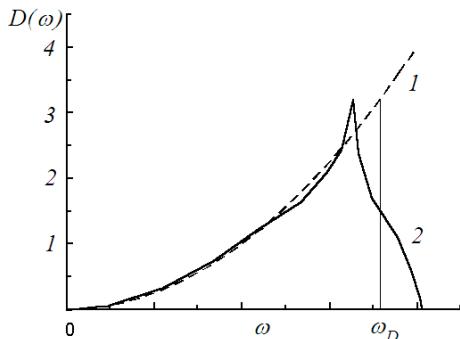
$$D(\omega) = dN_K / d\omega = (4\pi K^2 dK) / ((2\pi / L)^3 d\omega) = V \omega^3 / (2\nu^3 \pi^2) \quad (3.27)$$

Normirovka sha'rtin umi'tpawi'mi'z za'ru'r. Bul sha'rt oscillyatordı'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 polyarizaciysi'n' berilgen tipine sa'ykes keliwshi N ali'w mu'mkinshiligine iye bolami'z. (3.26)-an'latpag'a K_D ha'm $\omega_D = \nu K_D$ shamalari'n kirgiziw arqali' to'mendegini alami'z:

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

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



3.11-su'wret.
Debay modelindegi 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 zonası'ni'n' shegarasi'na sa'ykes keletug'i'nli'g'i'n bilesiz. ko'remiz. Biraq Debay modeli sheklerinde Brillyuennin' birinshi zonası'na sa'ykes keliwshi \vec{K} vektori'ni'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' polyarizaciysi'ni'n' u'sh tipine sa'ykes keliwshi ishki energiyani'n' ma'nisi Debay teoriyası'nda to'mendegi integral tu'rinde esaplanadi':

$$\begin{aligned}E &= 3 \int \hbar\omega n(\omega, T) D(\omega) d\omega = 3 \int_{0}^{\omega_D} \frac{\hbar\omega}{\exp(\hbar\omega/kT) - 1} \left(\frac{V\omega^2}{2\pi^2\nu^3} \right) d\omega = \\ &= \frac{3V\hbar^4 T^4}{2\pi^2\nu^3 \hbar^3} \int_0^{\Theta} \frac{x^3 dx}{\exp(x) - 1}.\end{aligned}\quad (3.29)$$

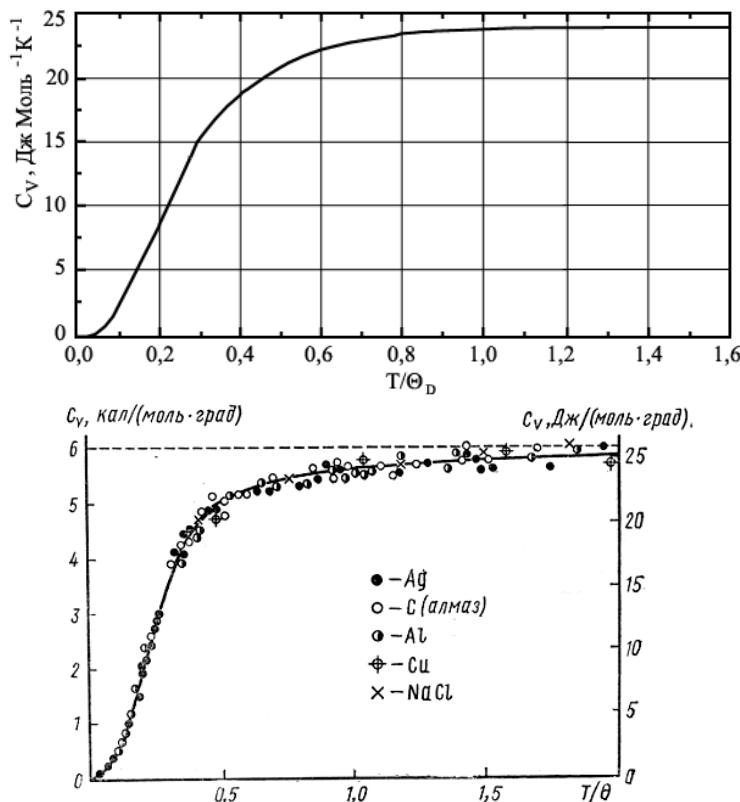
Bul jerde $x = \frac{\hbar\omega}{kT}$ ha'm $x_D = \frac{\hbar\omega_D}{kT} = \frac{\Theta}{T}$. Bul jerde Θ arqali' Debay temperaturasi' belgilengen. Oni'n' shamasi' mi'nag'an ten':

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

(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:

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

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



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 $kT > \hbar\omega = v\hbar K$. K ken'isliginde usi'nday vektorlardi'n' oblasti' boli'p ko'lemi $(kT)^3$ shaması'na proporsional bolg'an sfera xi'zmet etedi. Ha'r bir fonon ortasha $(kT)^1$ shaması'na barabar energiyag'a iye boladi'. Sonli'qtan energiyani'n' qori' (zapasi') normal terbelislerdin' sani'na proporsional ha'm olardi'n' ha'r qaysi'si'ni'n' ortasha energiyasi' $(kT)^4$ shaması'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 $C_V(T)$ shaması'n jetkilikli da'rejede duri's ta'ripleydi. Sonli'qtan oni' fononlardı'n' dispersiyali'q g'a'rezliginin' akustikali'q shaqaları'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 fotonlardı'n' fononlar menen ta'sir etisiwin izertlewlerde de ko'p qollanadi'. Eksperimentalli'q na'tiyjeler

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'qları'ni'n' temperaturadan g'a'rezligi. Tutas si'zi'q penen Debay modeli tiykari'nda si'zi'lg'an teoriyalı'q iymeklik belgilengen.

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_e , K	Элемент	θ_e , K	Элемент	θ_e , K
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

Fononlardı'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'rın o'zgertiw menen sheklenedi.

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

Biz joqari'da pa'njererin' normal terbelisinin' energiyasi'ni'n' massasi' terbeliwhi atomlardı'n' massasi'na ten', normal terbelislerdin' jiyilige ten' jiyilik penen terbeletug'i'n oscillyatordi'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' $E = \sum_{i=1}^{3N} E_i$ shamasi'na 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'zi'qli' garmonikali'q oscillyatordi'n' energiyasi'na ten'. Bunday mag'anada N dana terbeliwhi atomnan turatug'i'n sistema 3N dana normal oscillyator'a ekvivalent. Sonli'qtan bunday sistemani'n' ortasha energiyasi'n ani'qlaw ma'selesin normal oscillyatorlardı'n' ortasha energiyasi'n esaplaw ma'selesi menen almasti'ri'w mu'mkin.

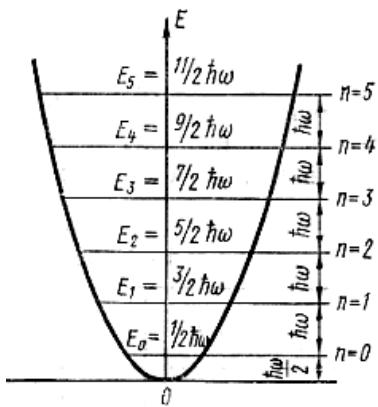
Normal oscillyatorlardı'n' haqi'yqi'y atomlar menen massasi'nan basqa hesh qanday qatnasi'ni'n' joq ekenligin atap o'temiz. Ha'r bir oscillyator pa'njererin' bir normal terbelisine sa'ykes keledi, al sonday bir normal terbeliske kristaldag'i' barli'q atomlardı'n' tap sonday jiyiliktegi terbelisi sa'ykes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

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

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

Bul formulada ω arqali' oscillyatordi'n' terbelis jiyiliği, al n arqali' kvant sani' belgilengen.

To'mende keltirilgen su'wrette si'zi'qli' garmonikali'q oscillyatordi'n' energiyali'q spektri keltirilgen (3.12-b su'wret). Bul spektr bir birinen $\hbar\omega$ qashi'qli'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 $\hbar\omega$ qashiqli'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'njererin' normal terbelislerinin' energiyasi' (3.33)-an'latpani'n' ja'rdeinde 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) $\hbar\omega$ shamasi'na ten' eken. Pa'njererin' 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'daylardı' ayqi'nlasti'ri'w ushi'n a'piwayi' sali'sti'ri'w (analogiya) keltiremiz. Meyli absolyut qara denenin' ishindegi quwi'sli'q ten' salmaqlı' ji'lli'li'q nurlanı'wi' menen tolti'ri'lg'an bolsı'n. Kvantlı'q ko'z-qarastan bul nurlanı'w jaqtı'li'qtı'n' kvantları' bolg'an fotonlar gazi' tu'rinde qabi'l etiledi. Fotonlardı'n' energiyasi' $\varepsilon = \hbar\omega = h\nu$, impulsı $p = \hbar\omega/c = h/\lambda$ shamalari'na ten'. Bul formulalarda c arqali' jaqtı'li'qtı'n' vakuumdag'i' tezligi, λ arqali' jaqtı'li'q tolqi'ni'ni'n' tolqi'n uzi'nli'g'i', v arqali' jaqtı'li'qtı'n' jiyiliği belgilengen. Tap sol si'yaqli' kristaldi' tolti'ri'p turatug'i'n serpimli tolqi'nlardi' da pa'njererin' 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 impulsı bolsa $p_{fonon} = \hbar\omega/v = h/\lambda$ shamalari'na ten'.

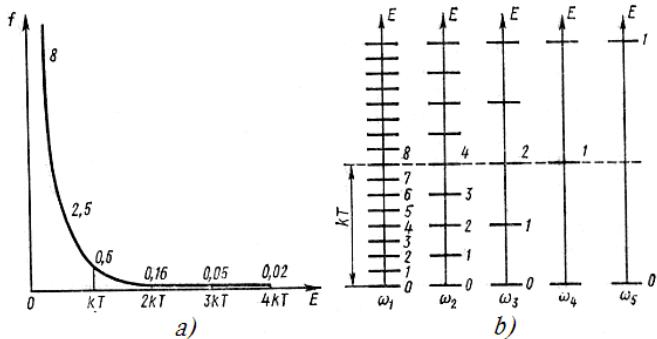
Usi'nday ko'z-qaraslar boyi'nsha qi'zdi'ri'lg'an kristal fonon gazi' menen tolti'ri'lg'an quти'g'a megzes.

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 fonondı' 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' $E_n = \left(3 + \frac{1}{2}\right)\hbar\omega$ shamasi'na ten' boladi'. Demek ol berilgen normal terbelis qaysi'si'ni'n' energiyasi' $\hbar\omega$ g'a ten' bolg'an u'sh fonondı' payda etti dep esaplaymi'z. Al to'mendegi 33.13 -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'rinipli tur. Al energiyasi' $\hbar\omega > kT$ sha'rtin qanaatlandi'ratug'i'n normal terbelisler bunday temperaturalarda derlik qozbaydi'. 33.13-s su'wrette berilgen T temperaturada jiyiliği ω_1 bolg'an terbelisler 8-qa'ddige shekem qozg'an. Demek bul normal terbelis ortasha ha'r qaysi'si'ni'n' energiyasi' $\hbar\omega = kT/8$ ge ten' segiz birdey fonondı' payda etedi eken.

Jiyiliği ω_2 ge ten' bolg'an normal terbelis shama menen 4-qa'ddige shekem, al jiyiliği ω_3 ten' bolg'an normal terbelis 2-qa'ddige shekem qozg'an. Al jiyiliği 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'n'i'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'rinipli 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'zetiwler) 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 esaplawkere.

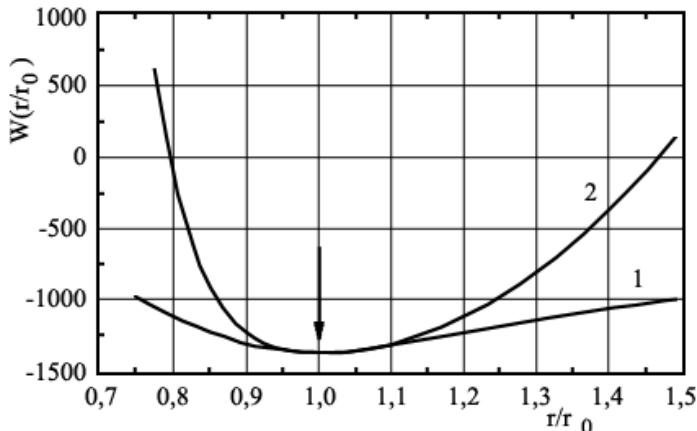
Angarmonikali'q jaqi'nlası'w

Biz joqari'da kristaldi' bir biri menen ta'sir etispeytug'i'n oscillyatorlardi'n' ji'ynag'i' dep qaradi'q. Bunday jag'dayda potencialli'q energiya oscillyatorlardi'n' ten' salmaqli'qtan awi'si'wi'ni'n' kvadrati'na proporsional o'sedi, al pa'njererenin' qatt'i'li'g'i'n ta'ripleytug'i'n parametrler 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 parametrlerin (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 kerek. Biz to'mende kristaldi'n' serpimlik modullerinin' termperaturag'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'mtalalar oscillyatorlardi'n' energiyasi'n'i'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'eyedili. Eger bul qubi'slardı' teren' tu'rde qaraytug'i'n bolsaq, olardi'n' ta'biyatı'ni'n' ju'da' quramali' ekenlige iseniwge boladi'. Ji'lli'li'q ken'eyiwin kristaldi'n' atomlari' arasi'ndag'i' ortasha qashi'qli'qtı'n' u'lkeyiwi menen baylani'sli' dep esaplaydi'. Biraq ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'n'i'n' sebebi ju'da' ko'p boli'wi' mu'mkin. Soni'n' ishinde potencial 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 toparsasi'wi'ni'n', olardi'n' elektronli'q bultlari'ni'n' orientaciyalari'ni'n' o'zgerislerge ushi'rawi'na da, basqa da sebeplerde 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 sebeplerde 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'rdeinde ta'riplewdin' mu'mkin emes ekenligin atap o'temiz. Bul jag'dayda atomlardi'

ten' salmaqli'q 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 proporsional edi.



3.13-su'wret.

Ha'r qanday jaqi'niasi'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'wrettegi 1-si'zi'q) ha'm garmonikali'q jaqi'niasi'w jag'dayi' ushi'n qarayi'q (3.13-su'wrettegi 2-si'zi'q). Keyingi (garmonikali'q jaqi'niasi'wda) jag'dayda atomlardi'n' terbelis amplitudalari'ni'n' o'siwi menen olardi'n' potencial energiyalarini'n' minimumi'na sa'ykes keliwshi ten' salmaqli'q ori'nlar (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 baylan'i'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 temperaturalardag'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' $T = T_0$ temperaturaldag'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 shaması'ni'n' (koefficientinin') ma'nisin o'lshew ushi'n bir neshe a'piwayi' ha'm da'l usı'llar islep shı'g'i'lg'an. Olardi'n' ishindəgi en' ko'p tarqalg'ani' dilatometriya boli'p tabi'ladi'. Bul usı'lda u'lginin' uzi'nli'g'i' ha'r qi'yli' temperaturalarda da'l ani'qlanadi'. Usı' mag'li'wmatlar tiykari'nda ji'lli'li'q ken'eyiw koefficientinin' ma'nisi esaplanadi'. Al rentgenografiyada (rentgenografiyalı'q dilatometriya) bolsa ha'r qi'yli' temperaturalardag'i' kristallografiyalı'q tegislikler arası'nda qashi'qli'qlardi'n' ma'nisi an'sat o'lshenedi. Na'tiyjede $d(T)$ g'arezligi ani'qlanadi'. Al rentgenografiyalı'q eksperimentlerdin' optikalı'q sxemasi'na baylani'sli' u'lginin' uzi'nli'g'i'n $d(T) = \text{const} \cdot l(T)$ formulu'sına sa'ykes ani'qlaydi'. O'lshewlerde ani'qlang'an $d(T)$ yamasa $l(T)$ g'a'rezlikleri boyi'nsha (3.36)-formulani'n' ja'rdeinde α esaplanadi'.

α shaması'ni'n' ma'nisi berilgen zattag'i' ha'r ki'yli' temperaturalardag'i' atomlardı'n' terbelislerin ta'riylewdegi gramonikalı'q jaqi'nłası'wdı'n' da'lligi haqqı'nda, sonı'n' menen birge s menen g parametrleri jo'ninde da'l informaciyanı' beredi. Bul qattı' deneler teoriyası' ushi'n ju'da' a'hmiyetli. Sonı'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. Sonlı'qtan $\alpha(T)$ shaması'n o'lshew fizika menen texnikada materiallardı'n' sapası'n menen quramı'n qadag'alaw, ji'lli'li'q penen qayta islewdin' en' jaqsı' na'tiyje beretug'i'n variantları'n ani'qlaw, basqa da ma'selelerdi sheshiw ushi'n ken'nen qollani'ladi'. Bunday izertlewler α shaması'n fazalı'q o'tiwler ori'n almaytug'i'n temperaturanı'n' salı'sti'rmali' kishi intervalları'nda (shama mpenen 200-300 K) turaqlı' dep esaplawg'a mu'mkinshilik beredi. Usı'ni'n' menen birge α shaması'ni'n' to'mengi temperaturalar oblastı'nda da (1-100 K) sezilerliktey o'zgeretug'i'nli'g'i'n an'g'aramı'z.

Ko'pshilik zatlar ushi'n $T = 200 - 500$ K temperaturalarda α ni'n' ma'nisi $10^{-5} 1/T$ a'tirapi'nda boladi'. Ayı'ri'm zatlar ushi'n (temir-nikel quymaları'nda, invarlı'q dep atalatug'i'n quymalarda) α shaması'ni'n' ma'nisi ju'da' kishi boladi'. Olar $T = 200 - 500$ K temperaturalarda temperaturanı'n' o'zgeriwi menen geometriyalı'q parametrlerin ju'da' kishi shamalarg'a o'zgertetug'i'n (mi'sali' saatlardı'n' mayatniklerin sog'i'w ushi'n) zatlar si'patı'nda texnikada ken'nen qollani'ladi'. Ayı'ri'm zatlardı'n' (tiykari'nan metallardı'n') si'zi'qli' ji'lli'li'q ken'eyiw koefficientleri to'mendegi kestede berilgen.

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

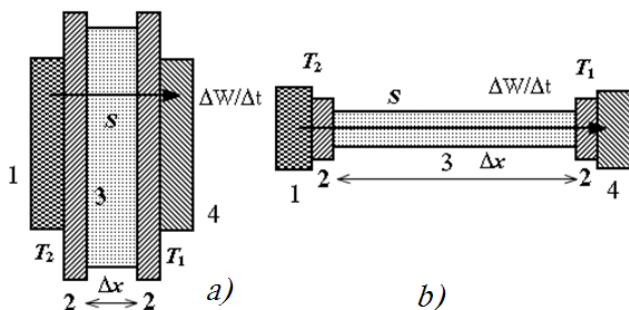
Zatlar	$\alpha \cdot 10^{-6}$, grad $^{-1}$	Zatlar	$\alpha \cdot 10^{-6}$, grad $^{-1}$
Li	45	Fe	11,7
Na	71	Ni	12,5
K	83	Cr	7,5
Cs	97	Mo	5,2
Cu	17,0	Ta	6,6
Ag	18,9	W	4,6
Au	13,9	Ir	6,5
Ca	22,5	Pd	11,6
Al	23,6	Pt	8,9
Pb	28,8	Cd	32,5
Ge	5,8	B	2

Kristallardı'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 temperaturanı'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'lshenedi. Ji'lli'li'q si'yimli'g'i'n o'lsheytag'i'n du'zilislerdin' sxemalari' 3.14-su'wrette keltirilgen.



3.14-su'wret.

Ji'lli'li'q o'tkizgishlikti o'lsheytag'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 shaması'nı'n' u'lkeyetug'i'nli'g'i'n ko'rsetedi.; 3- - 50 K temperaturada K sozi'lg'an tu'rdegi maksimumg'a iye, al temperaturanı'n' bunnan keyingi joqarı'lawi' menen K ni'n' shaması' kemeyedi. Sali'sti'rmali' joqarı' temperaturalarda (shama menen Debay temperaturaları'nda) ji'lli'li'q o'tkizgishlik koefficientinin' ma'nisi $1/T$ g'a proporsional kemeyedi.

Bunday g'a'rezlikti teoriyalı'q tu'sindiriw to'mendegi jag'dayg'a tiykarlang'an: dielektriklerde ji'lli'li'qtı' fononlar ali'p ju'redi, olar serpimli tolqı'nlar si'patı'nda ideal pa'njerede erkin qozg'aladi' ha'm kristalli'q pa'njererin' 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'njererin' basqa da defektlerin kirgiziwge boladi'. Soni'n' menen birge kristalli'q pa'njererin' modulyacyysi'na ali'p keletug'i'n kristalli'q pa'njererin' bir tekli emes deformaciyalari' da fononlardı'n' kristal boyı'nsha tarqali'wi'na ta'sirin tiygizedi. Bunday modulyacyyalardi'n' tutqan orni'n ayri'qsha tu'rde aytap o'tiwge tuwri' keledi. Sebebi sol modulyacyyalardi'n' ja'rdeinde fononlardı'n' bir biri menen ta'sirlesiw mexanizmleri tu'sindiriledi.

Biz joqarı'da kristaldi' bir biri menen ta'sirlespeytug'i'n oscillyatorlardi'n' ji'ynag'i' si'patı'nda qarap o'ttik. Bul jag'day kristaldi'n' ji'lli'li'q qa'siyetlerin tu'sindiriw ushi'n Boze-gaz teoriyası'n paydalani'wg'a mu'mkinshilik berdi. Eger ten' salmaqli'q orni'nan awi'sqan atomlardı' keyinge qaytari'wshi' ku'shlerdin' shaması' awi'si'w menen si'zi'qli' tu'rde baylani'sqan bolsa (yag'ni'y kristaldi'n' serpimli konstantalari' atomlardı'n' awi'si'wi'na baylani'sli' emes bolg'an jag'day) tap sonday jaqi'nlası'wdı' paydalani'w mu'mkin. Biraq bunday jaqi'nlası'w (bunday jaqi'nlası'wdı' garmonikali'q jaqi'nlası'w dep ataydi') juwi'q tu'rde ori'nlanadi'. Garmonikali'q jaqi'nlası'w juwi'q tu'rde ori'nlang'anda g'ana eki fonon arasi'ndag'i' ta'sirlesiw din' fizikalı'q mexanizmlerin tu'sindiriw mu'mkin. Si'zi'qli' bir tekli ortali'qlarda serpimli tolqı'nlardı'n' tarqali'w teoriyası' boyı'nsha fononlardı'n' bir biri menen ta'sir etispewi kerek.

Eki fononni'n' bir biri menen ta'sir etisiwinin' mu'mkinshiliği to'mendegishe tu'sindiriledi. Meyli kristal boyı'nsha fonon tarqalatug'i'n bolsı'n. Ol kristaldi' o'zinin' tolqı'n uzi'nli'g'i' λ shaması'na ten' da'wir menen deformaciyalaydi'. Bunday jag'dayda joqarı'da

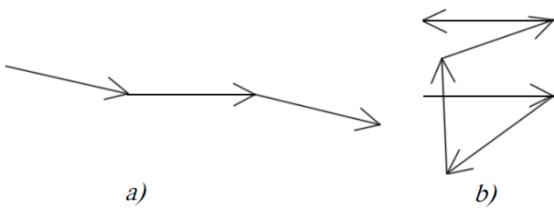
atap o'tilgendey kristalda serpimli turqli'lardi'n' modulyaciysi' payda boladi'. Bul modulyaciya «difrakciyalı'q pa'njere» ni eske tu'siredi. (bunday jag'day 3.1-su'wrette keltirilgen). Ekinshi fonon usi'nday «difrakciyalı'q pa'njere» de qozg'ali'p difrakciyag'a ushi'rawi' mu'mkinshiligine iye boladi'. Na'tiyede ol o'zinin' qozg'ali's bag'i'ti'n o'zgertedi. Buni'n' sebebi o'zine ta'n difrakciyalı'q 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'wdi'n' za'ru'rli sha'rti «si'zi'qli' emes effekt» - fonon o'tkende kristalli'q pa'njerinin' serpimli qa'siyetlerinin' o'zgeriwi boli'p tabi'ladi'. Sonli'qtan fononlardi'n' soqli'g'i'si'w processleri kristallardag'i' ta'sir etisiwlerdin' «angarmonikali'q, 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'rdeinde ji'lli'li'q o'tkizgishlik koefficientin esaplag'anda ideal gaz ushi'n ali'ng'an formulani' paydalani'wg'a imkaniyat beredi:

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

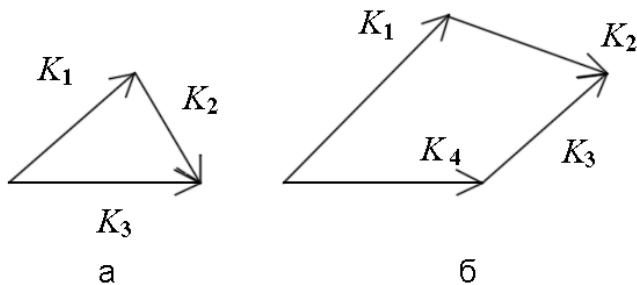
Bul formulada C_V arqali' turaqli' ko'lemdegi gazdin' bir birlik ko'leminin' ji'lli'li'q si'ymlı'g'i' (biz qarap ati'rg'an jag'dayda Boze - gazdin'), $\langle v \rangle$ vrkali' gaz molekulalari'ni'n' ortasha tezligi, l_{eff} arqali' gaz molekulasi'ni'n' (biz qarap ati'rg'an jag'dayda bozonlardi'n')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

l_{eff} shaması' ji'lli'li'qti' ali'p ju'riwshilerdin' bir biri menen soqli'g'i'si'w jiyiligen 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 kartinası'na qalayı'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'zgertetug'i'n soqli'g'i'si'wlar energiyani'n' ali'p ju'riliwine ha'm l_{eff} shaması'na 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} shaması'na 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'yeslerge (a) ha'm u'lken mu'yeslerge (b) o'zgeretug'i'n bo'lekshenin' qozg'ali'si'ni'n' sxemasi'.

Energiya menen impulstin' saqlanı'w ni'zamları' 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'rindəgi 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'.



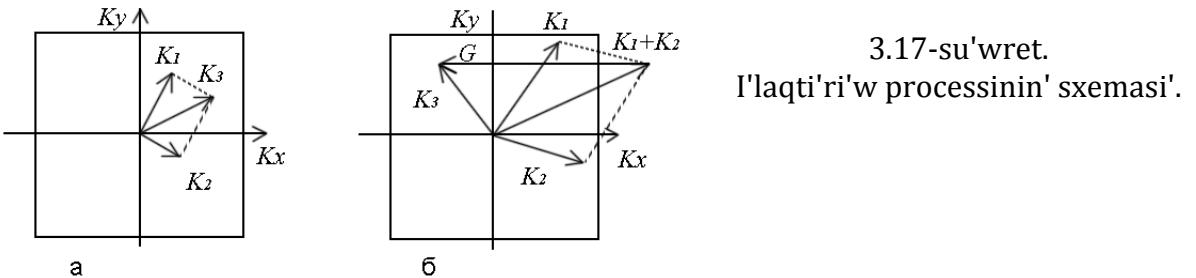
3.16-su'wret.

Energiya menen impulstin' saqlanı'w ni'zamları' 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'rindəgi soqli'g'i'si'wlari'ni'n' sxemasi'.

Fononlardi'n' soqli'g'i'si'wi'ni'n' normal processi degen atama fononlardi'n' imulsları'ni'n' qosi'ndi'si' bolg'an $\vec{k}_1 + \vec{k}_2$ shaması'ni'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'rindegi soqli'g'i'si'wlardi'n' da ori'n ali'wi' mu'mkin (3.17-su'wrette keltirilgen). Bul an'latpada \vec{G} arqali' keri pa'njere vektori' belgilengen. Demek $\vec{k}_1 + \vec{k}_2 \rightarrow \vec{k}_3 + \vec{G}$ tu'rindegi soqli'g'i'si'wda keri pa'njere vektori' \vec{G} esapqa ali'nbaytug'i'n bolsa a'dettegi tu'rdegi jazi'wlarda impulstin' saqlanı'w ni'zami' ori'nlanbaydi'..



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

Bunday soqli'g'i'si'wlarda fononlardi'n' qosi'ndi' impulsi bolg'an $\vec{k}_1 + \vec{k}_2$ shaması'ni'n' ma'nisi Brillyuennin' birinshi zonası'ni'n' shegarası'ni'n' arg'i' tamani'nda jaylasqan boli'wi' kerek ha'm fononlar sistemasi'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 boladi'. Bir soqli'g'i'si'wdi'n' saldarı'nan fononlar sistemasi'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 energiyasi'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'laqtı'ri'w processleri (ori's tilinde processi' perenosı) yamasa U-processleri dep ataydi'.

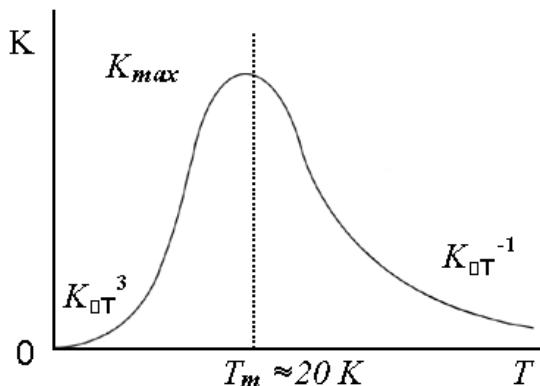
I'laqtı'ri'w processlerinin' ju'zege keliwi ushi'n' $|\vec{k}_1|$ ha'm $|\vec{k}_2|$ shamalari'ni'n' u'lken, olardi'n' san shaması'ni'n' $|\vec{G}/4|$ shaması'na barabar yamasa onnan u'lken boli'wi' tiyis. Bunday processler jetkilikli da'rejedegi joqarı' temperaturalarda ori'n aladi'. Bunday temperaturalarda energiyasi' da, tolqi'n vektori' da u'lken bolg'an fonondı' ushi'rati'wdi'n' itimalli'g'i' joqarı'.

Ji'lli'li'q o'tkizgishlik koefficientinin' joqarı' temperaturalardag'i' termperaturadan g'a'rezliginin' shaması'n bahalaymi'z. Bunday jag'dayda C_V shama menen turaqlı' ma'niske iye ha'm $|\vec{k}| > |\vec{G}/4|$ sha'rtı 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' joqarı'da aytı'lg'an fononlar menen soqli'g'i'si'wdi'n' itimalli'g'i'na keri proporsional. Usi'nday itimalli'q bolsa olardi'n' sani'na yamasa temperatura T g'a proporsional (joqarı'da biz fononlardı'n' sani'ni'n' temperaturag'a proporsional ekenligi haqqı'nda ga'p etken edik). Na'tiyjede $K(T) = \text{const}/T$ g'a'rezligine iye bolami'z. Bunday g'a'rezlik eksperimentte baqlanadi'.

Ji'lli'li'q o'tkizgishlik koefficientinin' to'mengi temperaturalardag'i' temperaturalı'q g'a'rezliginin' shaması'n bahalaymi'z. Bul jag'dayda C_V ni'n' shaması' T^3 ke proporsional, al $|\vec{k}| > |\vec{G}/4|$ sha'rtı ori'nlanatug'i'n fononlardı'n' sani' ju'da' az, bul sanni'n' ma'nisi $\exp(-|\vec{G}|\hbar\nu/4kT)$ shaması'na proporsional 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 almaydi'. Sebebi fononlardı'n' ha'r qi'yli' strukturalı'q defektlerde shashi'rawı' o'zinin' ta'sirin tiygizedi. Bunday jag'dayda l_{eff} ni'n' shaması' temperaturadan g'a'rezsiz bolg'an defektlerdin' koncentraciyasi' boyı'nsha ani'qlanadi'. Usi'

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

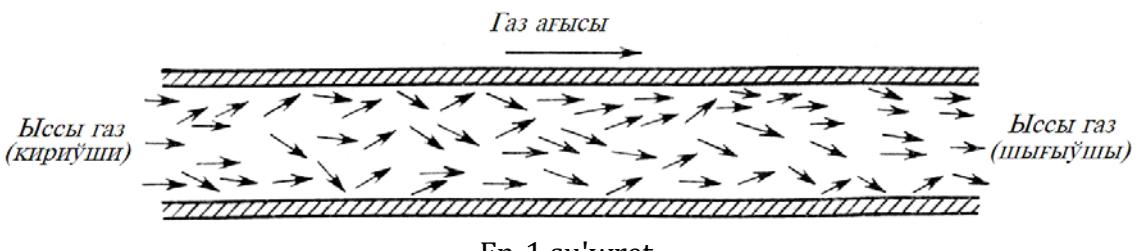
Solay etip ji'lli'li'q o'tkizgishlik koefficienti $K(T)$ ni'n' temperaturadan g'a'rezligin teoriyalı'q jollar menen tu'sindiriw mu'mkin. Bul g'a'rezlik 3.18-su'wrette keltirilgen. Bul su'wrette $K(T)$ ni'n' 20-50 K temperaturada maksimumg'a iye bolatug'i'nli'g'i' ha'm to'mengi temperaturalarda da, joqari'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



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

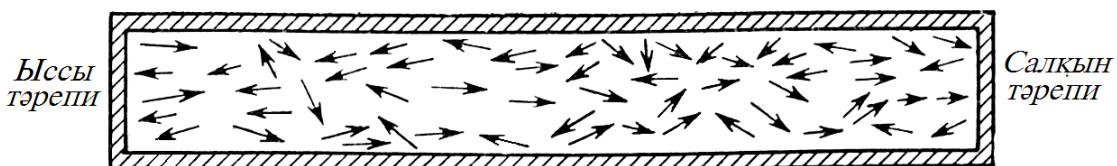
Biz joqari'da fononlardı'n' ji'lli'li'q o'tkizgishlik processine qosatug'i'n u'lesin qarap o'ttik. Al ji'lli'li'q energiyasi'n o'tkizgishler dep atalatug'i'n zatlardag'i' erkin elektronlar da ali'p ju're aladi'. A'dette erkin elektronlar o'tkizgishlerde ji'lli'li'q o'tkizgishlikke fononlarg'a sali'sti'rg'anda 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 molekulalari'ni'n' uzi'n ha'm ushlari' ashi'q nay arqali' ag'i'wi' (nay diywallari'nda su'ykelis bolmaydi' dep esaplaymi'z). Gaz molekulalari'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 orayı'n'i'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' shaması' sheksiz u'lken.



Fn-2 su'wret.

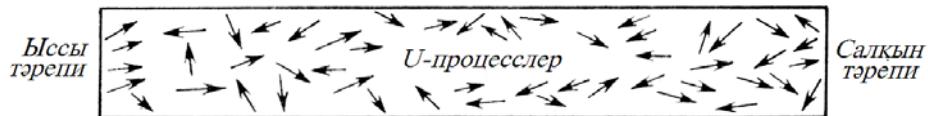
Massani'n' ko'shiwi ori'n almaysitung'i'n jag'daydag'i' gazdi'n' ji'lli'li'q o'tkizgishligin a'dettegidey etip ani'qlawdi' illyustraciyalawshi' sxema. Bul jerde naydi'n' eki ushi'n da

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 tendenciysi'na iye boladi'. On' ta'repte u'lken bolg'an koncentraciyani'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 energiyani'n' ko'shiwin ta'miyinleydi.



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 jaqtı'landı'rsaq). 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 aylandı'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'lli'q qarsi'lli'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'laqtı'ri'w processi (U-processler) ori'n alatug'i'n bolsa ha'r bir shashi'raw aktinde fononlardi'n' impulsı 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 energiyani'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'. Qattı' 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 atomlardı'n' elektronları'n'i'n' energiyali'q qa'ddiler boyi'nsha tarqali'wi'na baylani'sli'. Bunday tarqali'wdi'n' tu'rine zatti' qurawshi' atomlardı'n' ken'isliktegi da'wirli jaylası'wlari' ku'shli ta'sir jasaydi'. Bul atomlar ken'islikte u'sh o'lshemli da'wirli potencial payda etedi, al bul potencialdi'n' maydani'nda elektronlar qozg'aladi'. Elektronlardi'n' qozg'ali'si'na kristalli'q

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

Endi biz elektronlardi'n' kristalli'q pa'njerenin' da'wirli potenciali'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 principleri qarap o'tiledi.

Qatt'i' denelerdegi elektronli'q hallar

Qatt'i' 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 ishindegi elektron ushi'n Shredinger ten'lemesin sheshiw ha'm usi'n'i'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'leme ha'zirgi waqi'tlarg'a shekem sheshiwdin' mu'mkinshiligi joq. Sonli'qtan usi'nday ma'seleni sheshiw ushi'n a'piwayi'lasti'ratug'i'n ha'r q'i'lyi' jaqi'nlas'i'wlardan paydalananadi'.

Birinshiden, atomlardi'n' yadroso' ha'm ishki qabi'qlarda jaylasqan elektronlar qabi'qlari'n o'z ishine alatug'i'n ionlardi'n' tulg'alari' potenciali'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 potenciali'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'lshemli emes, al bir o'lshemli) ma'selelerdi sheshiwdin' sa'ti tu'sti. To'mende da'wirli potencialdag'i' elektronni'n' bir o'lshemli 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'rın qaraydi': 1) ku'shli baylani's jaqi'nlas'i'wi' ha'm 2) derlik erkin elektronlar jaqi'nlas'i'wi'.

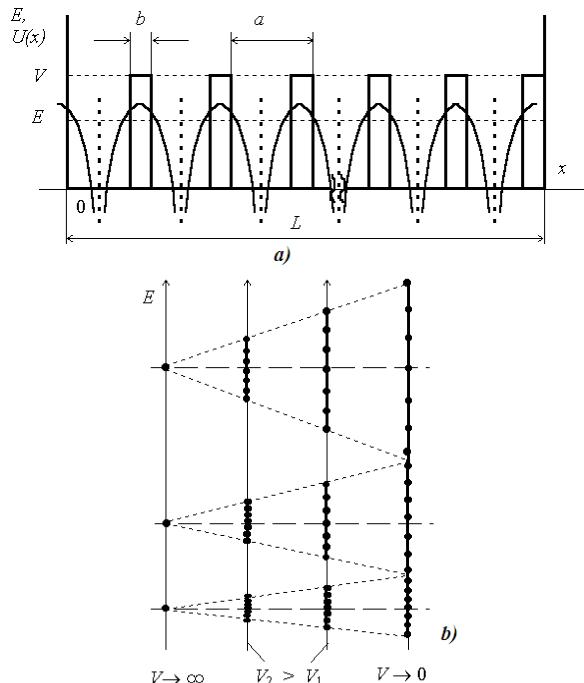
Ku'shli baylani's jaqi'nlas'i'wi'nda elektronni'n' o'zinin' atomi' menen ta'sir etisiw energiyasi' basqa atomlar menen ta'sir etisiw energiyasi'nan ko'p ese u'lken dep esaplanadi'. Basqa so'z benen aytqanda elektronlar o'zlerinin' atomlari' menen ku'shli baylani'sqan, al sol o'zlerinin' atomlari'na basqa 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 qubi'li'sti' Zeeman effekti dep ataymi'z. Bunday jag'dayda atomlardi'n' bir biri menen ta'sirlesiw izolyaciyalang'an atomni'n' energiyali'q qa'ddilerinin' su'wretin shamali' g'ana o'zgertedi.

Derlik erkin elektronlar jaqi'nlas'i'wi'nda elektronlardi' ion tulg'alari'ni'n' a'zzi potenciali'nda derlik erkin qozg'aladi' dep esaplaydi'. Al ionlardi'n' tulg'alari'ni'n' a'zzi potenciali'n kishi tu'rtki (vozmushenie) dep qaraw qabi'l etilgen. Bunday jag'dayda elektronni'n' kinetikali'q energiyasi'ni'n' ma'nisi ion menen ta'sirlesiw energiyasi'ni'n' ma'nisin u'lken boladi'. Bul ilimiyo ko'z-qarastan da, metodikali'q ko'z-qarastan da en' sa'tli boli'p shi'qsan usi'l ha'zirgi waqi'tlari' ta'jiriybelerde baqlani'p ju'rgen derlik barli'q ni'zamli'qlar menen effektlerdi ko'rsetpeli etip tu'sindirmekte.

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

Kronig-Penni usi'li'. Kronig-Penni usi'li'nda a'piwayi' formag'a iye da'wirli potencialdag'i' elektronni'n' bir o'lshemli qozg'ali'si' u'yreniledi: ken'ligi L ge ten', bir birinen a qashi'qli'g'i'nda jaylasqan bir o'lshemli potencial shuqi'rlar arasi'nda tuwri' mu'yeshli barerler jaylasqan. Olardi'n' ha'r qaysi'si'ni'n' biyikligi V shaması'na, al ken'ligi b shaması'na

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 potenciali' menen tuwri' mu'yeshli potenciali'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 modelindegi potencial energiyani'n' tu'ri (a) ha'm energiya shkalasi'ndag'i' energiya E nin' potencial $U(x)$ ti'n' birliklerindegi ruqsat etilgen ma'nislerinin' tarqali'wi'ni'n' sxemasi' (b).

4.1-b su'wret.

Kronig-Penni modelindegi potencial energiyani'n' tu'ri (a) ha'm energiya shkalasi'ndag'i' ruqsat etilgen energiya E nin' tarqali'wi'ni'n' sxemasi' (b).

Joqari'da ko'rsetilgендey potencial shuqi'rdag'i' Shredinger ten'lemesin juwi'q tu'rde sheshiw metodlari' ko'pshilikke belgili. Ten'lemen sheshiwdin' na'tiyjesinde elektronni'n' energiyasi' E nin' qa'legen ma'niske emes, al ayi'r'i'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'ndag'i' usi' E shamasi'ni'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 potenciali'q barerlerdin' biyikligi menen ken'ligi o'zergende 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'lshemli potencial shuqi'rdag'i' elektronni'n' qozg'ali'si' haqqi'ndag'i' 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 tolti'ri'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'lshemli potencial shuqi'rdag'i' qozg'ali'si' haqqi'ndag'i' ma'seleyedey ma'selege iye bolami'z. Elektron bul kishi potencial shuqi'rda lokallang'an boladi' (tap «o'zinin» atomi'nda lokallang'an si'yaqli'). E shkalasi'ndag'i' 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.

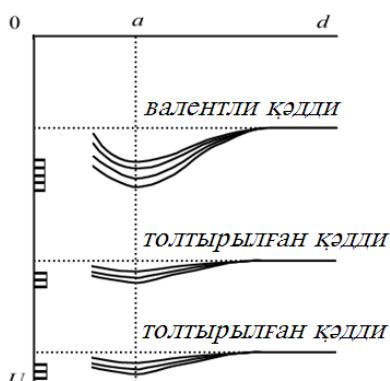
Barerlerdin' biyikligi menen ken'likleri arali'qli'q ma'nislerge iye bolsa (yag'ni'y ju'da' u'lken de, ju'da' kishi de bolmasa) energiya E nin' ma'nislerin juwi'q usi'llardi'n' ja'rdeinde esaplaydi'. Bul jag'daydag'i' energiyani'n' ruqsat etilgen ma'nisleri 4.1 b su'wrette

ko'rsetilgen jag'daydag'i'day boladi'. Bul su'wrette barerlerdin' biyikligi u'lkeygende ruqsat etilgen ha'm qadag'an etilgen energiya zonalari'ni'n' shegaralari' ornalasqan ori'nlar o'zgeriske ushi'raydi'. Atap aytqanda qadag'an etilgen zonalar ruqsat etilgen zonalardi'n' esabi'nan ken'eyedи. 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'qtin' 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 zattagi'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 atomlardi'n' 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) elektronlardi'n' 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 atomlarg'a 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 zattagi'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'ynaqtı' energiyali'q jolaq yamasa ruqsat etilgen energiyali'q zona dep ataydi'.

Da'slep bir birinen u'lken qashi'qli'qlarda jaylasqan N dana atomlardi' qaraymi'z. Bunday jag'dayda atomlar arasi'ndag'i' ta'sirlesidi esapqa almawg'a boladi' ha'm olardi'n' ha'r qaysi'si'n o'z aldi'na ali'p qaraw kerek. Atomlardi'n' 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' saldarı'nan atomlardi'n' energiyasi'ni'n' to'menlewinin' aq'i 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'njerinin' da'wirinde 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 iyterise baslaydi' ha'm ta'sirlesiw energiyasi'ni'n' ma'nisi keskin tu'rde o'sedi. Bunday jag'dayda atomlardi'n' qa'ddilerinin' energiyasi'ni'n' atomlar arasi'ndag'i' qashi'qli'qqa qatnasi' 4.2-su'wrette sxema tu'rinde ko'rsetilgendey boladi'. A'lnette 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 elektronlardı'n' halları'ni'n' uli'wmali'q sanları'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 zonalardi'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 sanları'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' ortalı'qqa beriletug'i'n ha'm usi'ni'n' na'tiyjesinde olardi'n' kristal boylap erkin qozg'ali'w mu'mkinshilagine iye kristalli'q zatlardi'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'lshemleri kristaldi'n' o'lshemi 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'nlası'w si'pati'nda kristallardag'i' elektronlardı'n' qanday qa'siyetlerdi ko'rsetetug'i'nli'g'i'n ta'riplew ushi'n elektronli'q Fermi-gaz modelinen paydalananadi'. Bul modeldin' ayri'qsha a'hmiyetine baylani'sli' bul teoriyanı'n' tiykarg'i' na'tiyjelerin qarap shi'g'ami'z. Olardi' qi'sqasha erkin elektronlar jaqi'nlası'wi' dep te ataydi'.

Elektronlardı'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'lshemli 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 shaması'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 $\vec{k} = (k_x, k_y, k_z)$ shaması'na g'a'rezli bolg'an funkciyalardi' \vec{k} vektori'ni'n' u'zliksiz funkciyalari' si'pati'nda qaraladi'.

Elektronlardı'n' tolqi'n funkciyasi' mi'naday tu'rge iye boladi':

$$\Psi = A \exp(i \vec{k} \cdot \vec{r}) \quad (4.2)$$

$$\text{Bul formulada } A = \sqrt{\left(\frac{2\pi}{L}\right)^3}.$$

Elektronlardı'n' kinetikali'q energiyasi' to'mendegi formulani'n' ja'rdeinde esaplanadi' (olardi'n' potenciali'q energiyasi' nolge ten'):

$$E = p^2 / 2m = (\hbar k)^2 / 2m = (\hbar^2 / 2m)(k_x^2 + k_y^2 + k_z^2) \quad (4.3)$$

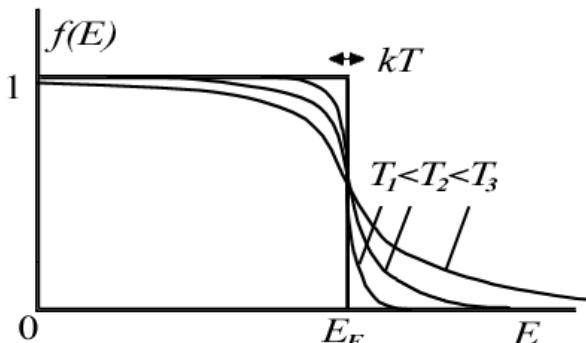
$T = 0$ temperaturada barli'q N elektron Pauli principine bag'i'ng'an halda (ha'r bir halda 1 den arti'q emes elektron) E nin' en' kishi ma'nislerine iye bolg'an hallardi' iyeleydi. Bunday jag'dayda k-ken'islikte barli'q iyelengen hallar radiusi' k_F bolg'an sferani'n' (shardi'n') ishinde boladi'. Bunday shardi'n' betin Fermi beti, al Fermi betinde jaylasqan elektronlardı'n' energiyasi'ni'n' ma'nisin Fermi energiyasi' dep ataydi'. Fermi energiyasi'ni'n' ma'nisi erkin elektronlardı'n' koncentraciyasi' n shaması'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'yli' temperaturalardag'i' grafikleri 4.3-su'wrette keltirilgen.



4.3-su'wret.
Fermi-gaz elektronlari'n'i'n' ha'r qi'yli' temperaturalardag'i' hallardi' tolti'ri'w funkciyasi'.

Barli'q metallar ushi'n ha'm barli'q temperaturalarda Fermi energiyasi'ni'n' ma'nisi kT shaması'nan 50 – 200 ese u'lken. Sonli'qtan metallardag'i' elektronlar gazin ku'shli ayni'g'an elektronli'q Fermi-gaz si'pati'nda qaraydi'. Temperatura joqari'lag'anda Fermi energiyasi'ni'n' shaması' 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 potenciallari' da'wiri kristalli'q pa'njerinin' 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' potenciali'n tek ionni'n' ortası' 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' potenciallari'n kishi qozg'alan' si'pati'nda esapqa alami'z.

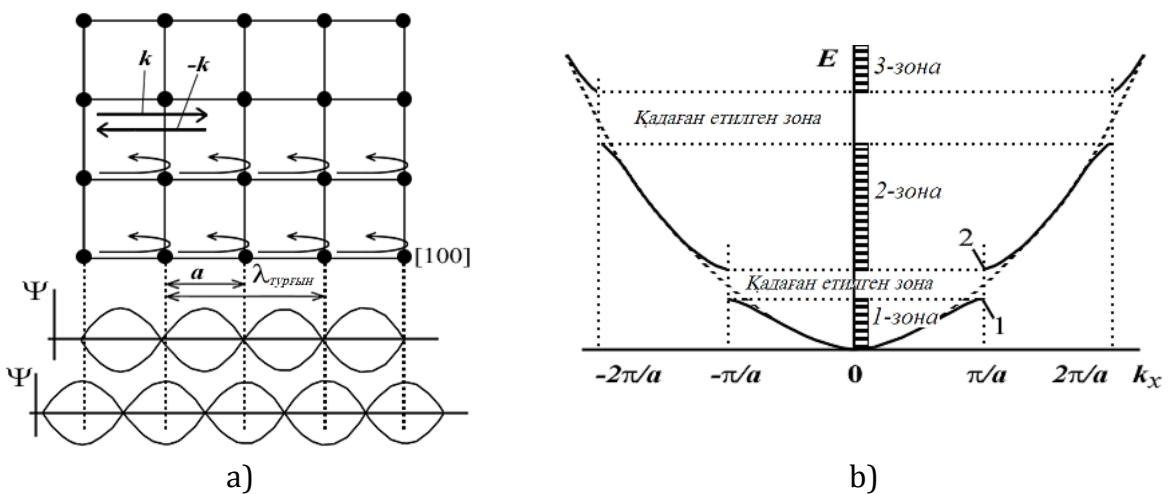
Blox teoremasi'n paydalanami'z. Bul teorema boyi'nsha potencial energiyasi' (4.7) tu'rine iye bolg'an da'wirli maydan bolg'an jag'dayda (4.2)-tolqi'n funkciyası ni'n' tu'ri mi'na formulag'a sa'ykes o'zgeredi:

$$\Psi = u_{\vec{k}}(\vec{r}) \exp(i\vec{k}\cdot\vec{r}) \quad (4.8)$$

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' potenciali' bolg'an $U(\vec{r})$ potenciali ni'n' da'wirine ten'. Derlik erkin elektronlar jaqi'nlası'wi'nda kristaldi'n' ishindegi 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' ishindegi «kishı» 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'nin' saldarı'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'.

$E(\vec{k})$ funkciyası ni'n' Brillyuen zonası' quasi'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'alsı'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 kvadratlı'q g'a'rezligin alg'an bolar edik. Bul jag'day 4.4 (b) su'wrette keltirilgen.



4.4-su'wret. Da'wiri a bolg'an kristalli'q kubli'q pa'njerede elektronli'q tolqi'nlardı'n' tarqali'wi'ni'n' ha'm usi' pa'njerede turg'i'n tolqi'nlardı'n' payda boli'wi'ni'n' sxemasi' (a).

Erkin elektronlar ha'm derlik erkin elektronlar modellerindegi 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'n'i' 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-qarsı' bag'i'tta ionlarda shashi'rag'an elektronlardı'n' interferenciyalı'q ku'sheyowi ori'n aladi'. Haqiqatı'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'qtı'n' u'stine pu'tin san eselengen elektronni'n' de-Broyl tolqi'ni'n'i' uzi'nli'g'i' jaylasadi'. Bunday jag'dayda joqarı' intensivli shag'i'li'sqan tolqi'n payda boladi' ha'm bul

shashi'rag'an tolqi'n tu'siwshi tolqi'n menen interfenenciyalani'p turg'i'n tolqi'nni'n' payda boli'wi'n ju'zege keltiredi.

Turg'i'n tolqi'nlar kubli'q pa'njererin' tu'yinlerinde yamasa tu'yinlerdin' da'l ortaları'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 elektronidi' 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'njererin' 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'. $E(\vec{k})$ shaması'ni'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'tiyeni 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 zonası'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'nlardı'n' payda boli'wi' ju'zege keledi. Bul jag'day bolsa o'z gezeginde $E(\vec{k})$ shaması'ni'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' spinı esapqa ali'ng'an jag'dayda Brillyuen zonası'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 elektronlardı'n' hali', al usi'nday formag'a jaqi'n formag'a izolyaciyalang'an atomlardı'n' s elektronlari'ni'n' hali' sa'ykes keledi. N dana izolyaciyalı'q atomlardı'n' kollektivi ushi'n bunday hallardi'n' sani' 2N ge ten'. Al bul san Brillyuen zonası'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 atomlardı'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' energiyaları' bir birinen sezilerliktey ayi'rmag'a iye boli'wi' kerek.

Solay etip ku'shli baylani's modelindegidey, derlik erkin elektronlar modelinde de elektronlardı'n' energiyaları'ni'n' shkalası'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' atomlardı'n' sani'na eki ese ko'p. Tolqi'n vektorları' 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'lshemleri 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 elektronlardı'n' dinamikası'. Kristalli'q pa'njererin' da'wirli potencialı' 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 teoriyasıni'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 elektronidi' tezliginin' shamasi' $\hbar / 2m\delta x$ diapazoni'na kiriwshi elektronidi' 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'rindegi 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 elektronidi' 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'nbani'n' qi'yali'g'i'ni'n' tangensine ten' (tezlikti tabi'w ushi'n oni' \hbar qa ko'beytiw kerek). Brillyuen zonası 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'nbag'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.

Elektronidi' 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 shamasi ni'n' qalay o'zgeretug'i'nli'g'i'n u'yrenemiz. Buni'n' ushi'n \vec{v}_g shamasi'nan 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:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_g}{\partial k} &= \frac{\partial}{\partial k} \left((1 / \hbar) \frac{\partial E}{\partial k} \right) = (1 / \hbar) \left(\frac{\partial^2 E}{\partial k^2} \right) \frac{\partial k}{\partial k} = \\ &= (1 / \hbar^2) \left(\frac{\partial^2 E}{\partial k^2} \right) \frac{\partial p}{\partial k} = (1 / \hbar^2) \left(\frac{\partial^2 E}{\partial k^2} \right) F \end{aligned} \quad (4.12)$$

Bul formulani' mi'na tu'rde ko'shirip jazi'w mu'mkin:

$$\frac{\partial v}{\partial t} m_* = F \quad (4.13)$$

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:

$$\frac{\partial v}{\partial t} m_* = F \quad (4.15)$$

m_* shaması'n elektronni'n' effektivlik massası' dep ataydi'. Effektivlik massanı'n' ma'nisinde $E(k)$ funkciyasi'na kristaldi'n' da'wirli potencialı'n' ta'siri janapay tu'rde esapqa ali'ng'an. Demek ku'tilmegen na'tiyjege iye boldi'q: kristalli'q da'wirli maydan vakuumge salı'sti'rg'anda elektronni'n' qozg'ali's kartinası'na o'zinin' ku'shli ta'sirin tiygizbeydi, al elektronni'n' tek effektivli massası'n o'zgertedi eken.

Elektronni'n' effektivlik massası' elektronni'n' kestelerde berilgen massası'nan a'dewir ayı'rmag'a iye. (4.14)-formula boyı'nsha effektivlik massa elektronni'n' ha'r qi'yli' tolqi'n vektorı' ushi'n ha'r qi'yli' ma'nislerge iye boladi'. $E(\vec{k})$ funkciyasi'ni'n' ekinshi ta'rtili tuwi'ndi'si' ja'rdeminde esaplanatug'i'n effektivlik massa \vec{k} vektorı'ni'n' kishi ma'nislerinde on' ma'niske iye boladi'. Al \vec{k} vektorı'ni'n' ma'nisi Brillyuen zonası'ni'n' shegarasi'na jaqi'n ma'nislerge iye bolg'anda effektivlik massanı'n' shaması' 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 potencialı'n' ta'siri menen baylani'sli'. Bunday elektronlar si'rttan tu'sirilgen elektromagnit maydani'nda massası' teris, al zaryadi' on' bolg'an bo'lekshelerdin' qa'siyetlerindey qa'siyetlerge iye boladi'. Bunday bo'leksheni massası' 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 massası'ni'n' belgisi o'zergende yamasa zaryadi'ni'n' belgisi o'zergende o'zgertedi. Bunday on' zaryadlang'an bo'lekshelerdi tesiksheler (di'rkalar) dep ataw qabi'l etilgen. Tesikshelerdin' qozg'ali'si' haqqı'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'.

Elektronlardı'n' ko'phılıgi ushi'n effektiv massanı'n' ma'nisi on'. Mi'salı' yari'mi' yamasa onnan da kemi toltı'ri'lg'an zonalardagı'i' elektronlar on' ma'nisli effektiv massag'a iye (4.4 b su'wrette keltirilgen). Teris ma'nisli effektiv massag'a Brillyuennin' birinshi zonası'ni'n' shegarasi' qasi'ndagı'i' hallarda turg'an elektronlar iye.

Ma'sele. A'piwayı' kublı'q kristalli'q pa'njerege iye, pa'njere turaqlı'sı' a g'a ten' bolg'an bir valentli metal ushi'n Fermi energiyasi'n esaplanı'i'z. Elektronlardı'n' energiyalar boyı'nsha tarqalı'w funkciyasi'n tabı'n'i'z. Elektronlardı'n' de-Broyl tolqi'n uzi'nli'g'i' boyı'nsha tarqalı'w funkciyasi'n tabı'n'i'z. De-Broyl tolqi'ni'ni'n' en' minimalli'q uzi'nli'g'i' n pa'njere turaqlı'sı' a menen salı'sti'ri'n'i'z.

Sheshimi. Fermi energiyasi'n esaplaw ushi'n (4.4)-an'latpanı' paydalanimi'z. n shaması'n $n = 1/a^3$ si'patı'nda esaplaymı'z. Sebebi 1 erkin elektrong'a (atomni'n' valentligi 1 ge ten') kublı'q elementar quți'shani'n' ko'lemi sa'ykes keledi. De-Broyl tolqi'ni'ni'n' minimalli'q uzi'nli'g'i'na ($\lambda_{B/min}$ shaması'na) elektronni'n' maksimalli'q impulsı 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: $\lambda_{B/min} = \frac{2\pi\hbar}{p_F} = 2\pi\hbar/\sqrt{2mE}$. a menen $\lambda_{B/min}$ shamalari' bir birine barabar boli'p shi'g'adi'. Fermi-gaz teoriyası'na sa'ykes Fermi-gaz elektronları' ushi'n hallardi'n' ti'g'i'zli'g'i' funkciyası' mi'na tu'rge iye boladi':

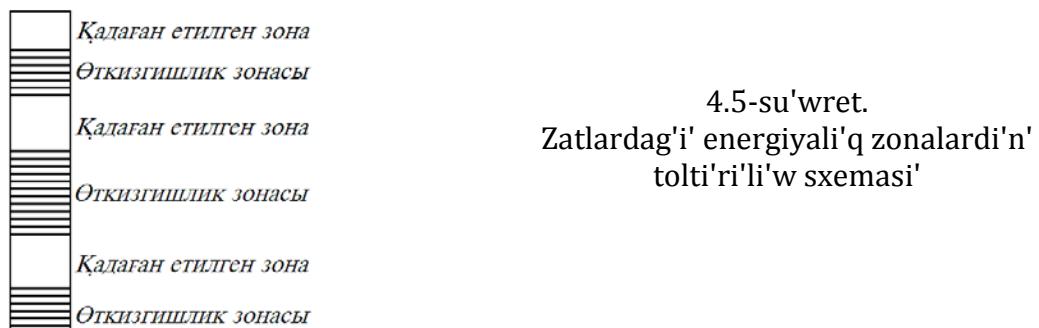
$$g(E) = V(\sqrt{2m^{23}} / \hbar^3 \pi^2) E^{1/2} = Const \cdot E^{1/2}$$

$$dN = g(E)dE = g(\lambda)d\lambda \quad \text{an'latpasi'n ha'm } \lambda = 2\pi\hbar / \sqrt{2mE} \quad \text{formulası'n paydalani'p elektronlardı'n' de-Broyl tolqi'ni' uzi'nli'qları' boyı'nsha tarqali'w funkciyası'n ali'w mu'mkin. Son'g'i' formulası'n' ja'rdeinde } E, g(E), dE \text{ shamalari'n } \lambda \text{ arqali' an'lati'p, bunnan keyin barlı'q an'latpalardı' } dN \text{ ushi'n jazi'lg'an an'latpag'a qoyı'p } g(\lambda) \text{ funkciyası'n ali'w mu'mkin.}$$

Dielektrikler yarı'm o'tkizgishler ha'm o'tkizgishler

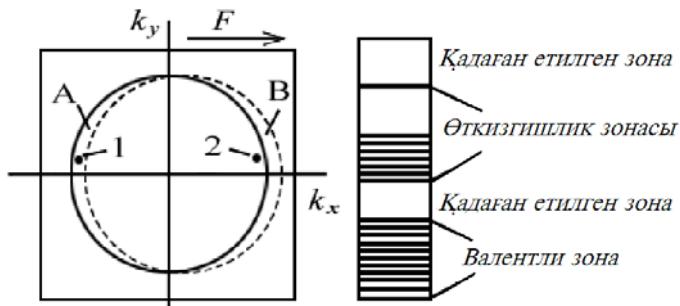
Zonalardi'n' elektronlar menen tolti'ri'li'w xarakteri zatlardi'n' elektr o'tkizgishlik mexanizmlerin ani'qlaydi' ha'm zatlardi'n' dielektriklerge, yarı'm o'tkizgishlerge ha'm o'tkizgishlerge bo'liniwin tu'sindiredi.

En' da'slep en' kishi energiyali' zonalardi'n' tolti'ri'latug'i'nli'g'i'na itibar beremiz. Olar elektronlarg'a toli'g'i' menen tolti'ri'ladi'. Toli'q tolti'ri'lg'an, biraq en' u'lken energiyag'a iye zonanı' valentli zona dep ataydi'. Bunnan keyingi o'tkizgishlik zonası' dep atatalug'i'n zona tolti'ri'limg'an boli'wi' da, shala tolti'ri'lg'an boli'wi' da mu'mkin (4.5-su'wret). Tolti'ri'limg'an zona yarı'm o'tkizgishlerde ha'm dielektriklerde, al toli'q tolti'ri'limg'an (biz onı' shala tolti'ri'lg'an dep atadi'q) zonalar o'tkizgishlerde boladi'. Bul eki jag'daydi' toli'q tu'rde qarap shi'g'ami'z.



O'tkizgishler. Eger o'tkizgishlik zonası' toli'q emes tolti'ri'lg'an bolsa, onda elektronlar menen iyelengen hallar Fermi betinin' to'meninde jaylasadi', al Fermi beti bolsa simmetriya orayı'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' qosı'ndı'sı' nolge ten' (yag'ni'y tezliklerinin' qosı'ndı'sı' da nolge ten'). Sonlıqtan olar zaryadıti'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'sirsek, onda situaciya o'zgeredi (4.6-su'wret): tolqi'n vektori' \vec{k} shaması'ni'n' \vec{F} vektori'ni'n' bag'i'ti' menen bag'i'tlas bolg'an 1 elektronni'n' hali' tolqi'n vektori' \vec{k} shaması'ni'n' \vec{F} vektori'ni'n' bag'i'ti'na qarma-qarsı' bolg'an 2 elektronni'n' hali'na qarag'anda energiyali'q jaqtan uti'mli' bolmaydi'. Bunday jag'dayda elektronlar ushi'n qaytadan topar du'ziw uti'mli' boladi' ha'm

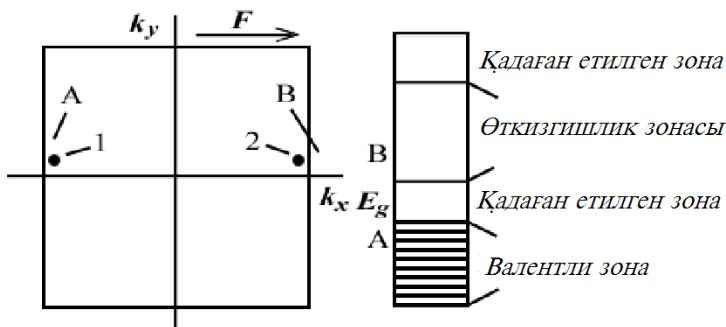
Fermi betinin' asti'ndag'i' A hali'n bosatadi' ha'm Fermi betinin' u'stindegi B hali'n iyeleydi (4.6-su'wret). Elektronlardi'n' bunday tarqali'wi'nda qosi'ndi' (summali'q) tezlik nolge ten' bolmaydi' ha'm elektr tog'i'na u'les qosadi'. O'tkizgish dep atalatug'i'n bunday zat elektr tog'i'n jaqsı' o'tkizedi. Bul jag'day si'rtqi' elektr maydani'nda elektronlardi'n' hallar boyi'nsha qaytadan bo'listiriliw (tarqali'w) mu'mkinshiliginin' bar ekenliginin' saldarı'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 zonadagi' iyelengen hallardi'n' barli'g'i' Brillyuen 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 vektori'na iye elektrong'a tolqi'n vektori' $-\vec{k}$ bolg'an elektron sa'ykes keledi. Bul eki elektronni'n' impulsları'ni'n' qosi'ndi'si' nolge ten' ha'm sonli'qtan olar zaryadtı'n' ko'shiwine ha'm elektr tog'i'ni'n' payda boli'wi'na u'les qospaydi' (4.7-su'wret).



Ris. 4.7.

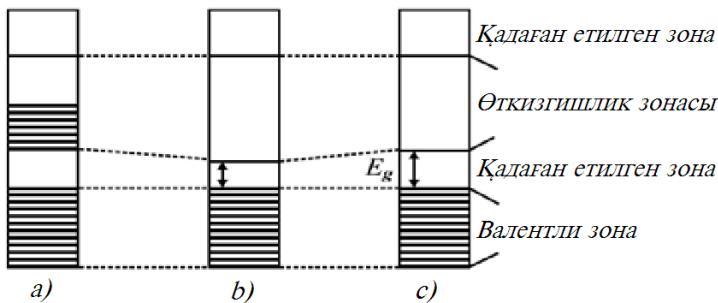
Toli'q tolti'ri'lg'an zona jag'dayi'nda si'rttan tu'sirilgen elektr maydani'ni'n' ta'sirinde elektronni'n' qaytadan bo'listiriliwinin' mu'mkin emes ekenligi (dielektrikte ori'n alatug'i'n situaciya)

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 toparsala almaydi'. Buni'n' ushi'n A hali'n taslap ketip energiyasi' E_g shaması'na 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 (elektronlardı'n' qaytadan toparsasi'wi', yag'ni'y peregruppirovkasi' ushi'n) jetpeydi. Sonli'qtan elektr tog'i'ni'n' payda etiwin ta'miyinleytug'i'nday elektronlardı'n' qaytadan toparsasi'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 elektronlardı'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 toparsala aladi' (bunday jag'daydi')

4.6-su'wrette ko'rdik). Biraq o'tkizgishlik zonası'nda elektronlar, al valentli zonada tesiksheler az bolg'anlıqtan bunday zatlar elektr tog'i'n salı'sti'rmali' jaman o'tkizedi. Bunday zatlardi' yarı'm o'tkizgishler dep ataydi'.

4.8-su'wrette o'tkizgishlerdegi, dielektriklerdegi ha'm yarı'm o'tkizgishlerdegi energiyali'q zonalardı'n' elektronlar menen tolti'ri'li'wi'ni'n' sxemasi' keltirilgen.



Ris. 4.8.

O'tkizgishlerdegi (a), dielektriklerdegi (c) ha'm yarı'm o'tkizgishlerdegi (b) energiyali'q zonalardı'n' elektronlar menen tolti'ri'li'wi'

Endi qanday zatlardi'n' o'tkizgish, yarı'm o'tkizgish ha'm dielektrik bola alatug'i'nli'g'i'n qarap o'temiz.

Siltili ha'm qı'mbat bahali' (blagorodni'e) metallardı'n' atomları bir valentli elektrong'a iye. Olarda en' u'lken energiyag'a iye zonanı'n' yarı'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 zonası' arası'ndag'i' qashi'qli'q juwi'q tu'rde 5 eV shaması'n quraydi'. Sonlı'qtan almaz jaqsi' izolyatorlar qatari'na kireti. Dielektrikler boli'p tabi'latug'i'n ionli'q kristallar valentli zonaları' toli'q tolti'ri'lg'an atomlardan turadi'.

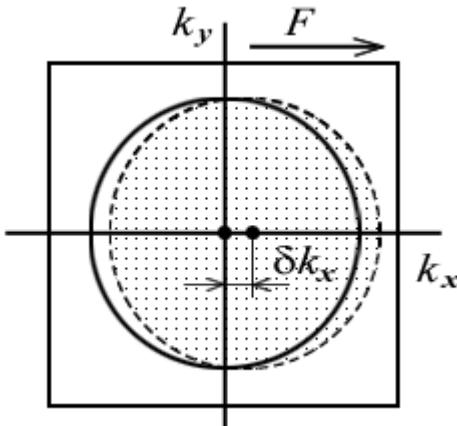
To'rt valentli kremniy menen germaniy toli'q tolti'ri'lg'an valentli zonag'a iye. Bul valentli zona menen o'tkizgishlik zonası' arası'ndag'i' qashi'qli'q sa'ykes 1,2 i 0,7 eV shamalari'na ten' (yag'ni'y o'jire temperaturaları'nda shama menen $10kT$ ni' quraydi'). Bunday jag'dayda elektronlar valentli zonadan o'tkizgishlik zonası'na o'te aladi'. Usi'ni'n' saldarı'nan kremniy menen germaniy en' ko'p tarqalg'an yarı'm o'tkizgishler boli'p tabi'ladi'. Temperatura joqarı'lag'anda germaniydin' elektr o'tkizgishligi kremniydin' elektr o'tkizgishligine salı'sti'rg'anda tezirek u'lkeyedi. Sebebi germaniydin' qadag'an etilgen zonası'ni'n' ken'ligi kremniydin' qadag'an etilgen zonası'ni'n' ken'liginen kishi.

Siltili jer elementleri eki valentli elektrong'a iye. Usi'g'an baylani'sli' oni'n' zonaları' 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 sanlı» elektronlar si'yatug'i'n uli'wmali'q» zona payda boladi'. Sonlı'qtan en' u'lken energiyag'a iye zona toli'g'i' menen tolti'ri'lmaq'an, al siltili jer elementleri o'tkizgishler boli'p tabi'ladi'.

O'tkizgishlerdin' elektr o'tkizgishligi

O'tkizgishlerdin' elektr o'tkizgishligin kvant mexanikasi' poziciyalari'nda turi'p qarag'an maql bolg'an bolar edi. Biraq bul a'dewir quramali' ma'sele. Sonlı'qtan o'tkizgishlerdin' elektr o'tkizgishligin esaplaw ushi'n yarı'm klassikalı'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 zonası'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} lektr maydani' payda bolg'anda elektronlarg'a $\vec{F} = e\vec{E}$ 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'tkennen 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

Jetilisken kristalli'q pa'njererin' (yag'ni'y defektleri joq kristalli'q pa'njererin') Brillyuen zonası'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 basqa elektron yamasa kristalli'q pa'njererin' defektleri menen soqli'g'i'sa aladi'. Joqari'da esletip o'tkenimizdey, kristalli'q pa'njererin' 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' koncentrasiyalari' temperaturani'n' joqari'lawi' menen joqari'laydi', al statikali'q defektlerdin' koncentrasiyalari' 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. Relakciaciya waqi'ti' o'tkennen 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 tezlikti dreyflik tezlik dep ataymi'z ha'm oni'n' shaması' mi'nag'an ten':

$$\langle \vec{v} \rangle = \frac{\vec{E}e\tau}{2m}. \quad (4.18)$$

Bul toqtin' to'mendegidey ti'g'i'zli'g'i'ni'n' payda boli'wi'na ali'p keledi:

$$\vec{j} = n\langle \vec{v} \rangle e = \frac{\vec{E}e^2n\tau}{2m}. \quad (4.19)$$

Om ni'zami'n eske tu'siremiz. Ol $\vec{j} = \sigma \vec{E}$ tu'rinde jazi'ladi'. Sonli'qtan σ elektr o'tkizgishlik koefficineti ushi'n mi'naday an'latpa alami'z:

$$\sigma = \frac{e^2n\tau}{2m}. \quad (4.20)$$

Al sali'sti'rmali' qarsi'li'q ushi'n

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{2m}{e^2n\tau} = \frac{2mv}{e^2n} \quad (4.21)$$

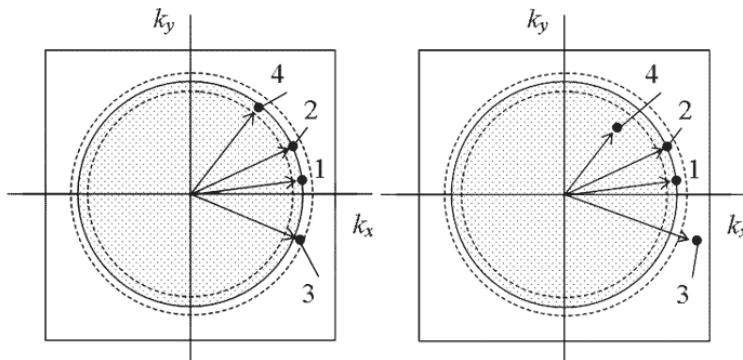
an'latpasi'n alami'z. $v = 1/\tau$ arqali' elektronni'n' soqli'g'i'si'wlari'ni'n' ortasha jiyiligi belgilengen.

$\rho(T)$ g'a'rezligin tallaw ushi'n $v = 1/\tau$ shamasini'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' elektronlarg'a 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':

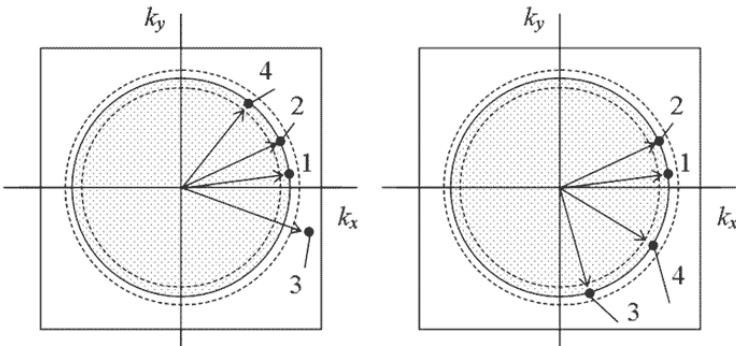
$$v = v_{stat} + v_{dinam}. \quad (4.22)$$

Birinshi qosi'li'wshi' temperaturadan g'a'rezli emes. Ekinshi qosi'li'wshi' birinshiden fononlardı'n' koncentraciyasi'nan ha'm elektronlardı'n' fononlar menen soqli'g'i'si'w mexanizmlerinen; ekinshiden elektronlardı'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'sqang'a shekemgi, 3 ha'm 4 soqli'g'i'sqannan 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 elektronlardı'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 hallardı'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).

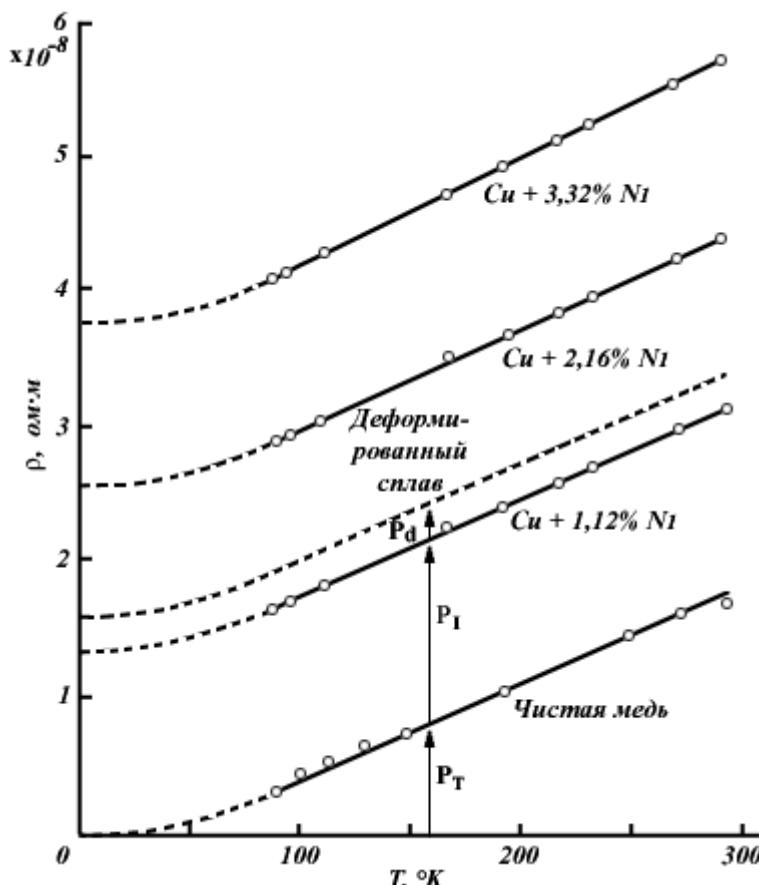
4.10-a su'wrettegi shep ta'repte keltirilgen processlerdin' ju'riwi mu'mkin. Sebebi olar ushi'n energiya menen impulstin' saqlani'w ni'zamlari' ha'm Pauli principinin' talaplari' ori'nlanadi'. 4.10-a su'wrettegi on' ta'reptegi processttin' ju'riwi mu'mkin emes. Sebebi 4 hali' iyelengen ha'm elektron 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 processttin' ju'zege keliwi ushi'n kT shaması'nan a'dewir u'lken energiya talap etiledi (3 ha'm 4 hallari'nda jaylasqan elektronlardı'n' energiyalari'ni'n' qosi'ndi'si' 1 ha'm 2 hallari'ndag'i' elektronlardı'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' elektronlardı'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 elektronlardı'n' soqli'g'i'si'wi'n impulsti'n' saqlani'w ni'zami' qadag'an etedi. Usi'nday sebeplerde 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 elektronlardı'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'wmatlardı' tallaw elektronlar menen elektronlardı'n' soqli'g'i'si'wi' elektronlardı'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 aytı'p o'tilgen jag'daylarg'a baylani'sli' elektronlardı'n' fononlar menen soqli'g'i'si'wi'n qarap shi'g'ami'z. Bunday soqli'g'i'si'wlar o'tkizgishlerdin' elektr o'tkizgishligine tiykarg'i' u'lesti qosi'wi' kerek. O'jire temperaturalari'na jaqi'n temperaturalarda fononlardı'n' sani' temperaturag'a tuwri' proporsional. Sonli'qtan elektronni'n' fononlar menen soqli'g'i'si'wi'ni'n' jiyiliği de temperaturag'a tuwri' proporsional 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 proporsional boli'p shi'g'adi'. Eksperimentalli'q mag'li'wmatlar bul juwmaqtı' 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' shaması' 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'i'n 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' $\rho(T)$ shamasi'na qatnasi'na ten'. Usi' sebeplerge baylani'sli' sali'sti'rmali' qarsil'i'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' qarsil'i'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'tkizgishtin' sali'sti'rmali' qarsil'i'g'i'na u'leslerin addidiv shamalar dep qarawg'a boladi'. Statikali'q defektlerdin' koncentraciyasi' ha'm og'an baylani'sli' bolg'an sali'sti'rmali' qarsil'i'qti'n' shamasi' absolyut nol temperaturag'a jaqi'n temperaturalarda qosimta atomlardı'n' koncentraciyasi'na proporsional.

Texnikada sali'sti'rmali' qarsil'i'g'i' ju'da' u'lken ha'm ju'da' kishi bolg'an materiallar ken' tu'rde qollani'ladi'. Sali'sti'rmali' qarsil'i'g'i' ju'da' kishi bolg'an materiallar kompaktli' ha'm ekonomiyali' si'mlardi' sog'i'w ushi'n, al sali'sti'rmali' qarsil'i'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' qarsil'i'g'i'ni'n' temperaturali'q koefficinetin ani'qlan'i'z.

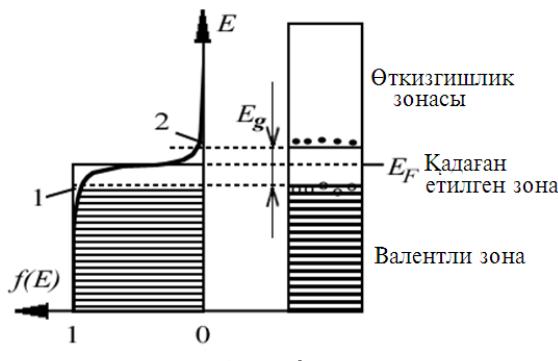
Ko'rsetpe: Qarsi'li'qtin' temperaturali'q koefficinetinin' ma'nislerin esaplag'anda $\alpha = \frac{1}{\rho(T)} \cdot \frac{\partial \rho(T)}{\partial T}$ formulasi'nan paydalani'n'i'z.

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'.

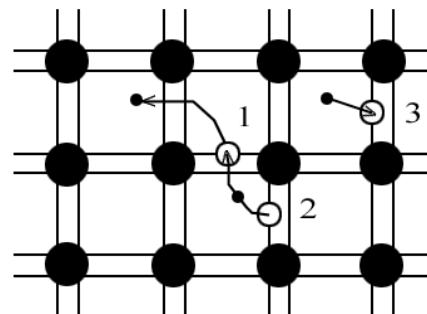
Yari'm o'tkizgishlerdin' elektr o'tkizgishligi

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 tolg'an 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 zonasini'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'zetiwlerdi ha'm tolqi'n vektorlari' ken'isligindegi 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 jaylasqan 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 elektronlardi' o'tkizgishlik zonasini'nda ushik'rat'i'wdi' itimalli'gi'n beretug'i'n (4.5)-formula Boltzman tarqali'w funkciyasi'na aylanadi':

$$\begin{aligned} f(E) &= 1 / \{ \exp((E - E_F) / kT) + 1 \} \approx \\ &\approx \text{Const} \cdot \exp(-(E - E_F) / kT). \end{aligned} \quad (4.23)$$

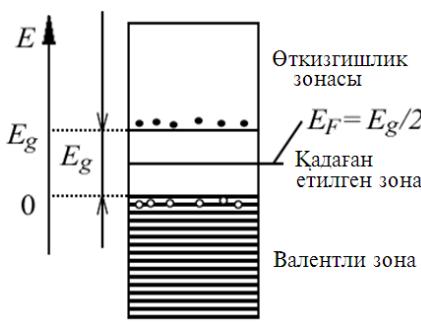
Bul elektronlar menen tesikshelerdin' yari'm o'tkizgishlerdegi qa'siyetlerin ta'riplew ushi'n klassikalıq usi'llardi' paydalani'wdi'n' mu'mkin ekenligin ko'rsetedi. E shaması'n valentli zonanı'n' en' u'stingi shetenen baslap esaplag'an qolaylı'. Bunnan keyingi tallawları'mi'zda biz tap usi'nday jollar menen ju'remiz.

Qosi'mtalari' joq yari'm o'tkizgishler. Yari'm o'tkizgish bolg'an kremniydi qaraymi'z. Ol almaz tipindegi 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 zonası' pu'tkilley bos. Temperaturanı' shama menen 200-300 K ge ko'tersek bazi' bir elektronlar valentli zonadan o'tkizgishlik zonası'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).

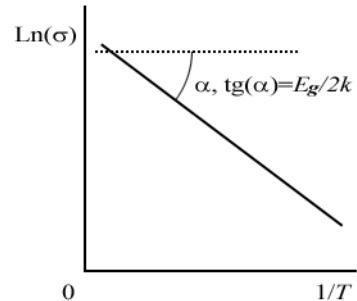
Bos kalg'an kovalentlik baylani's orni'nda tesikshe qaladi'. Tesikshe elektron taslap ketken «u'zilgen» kovalentlik baylani's boli'p tabi'ladi'. Qon'si'las baylani'stag'i' elektron sol «tesikshe» ge «sekirip» o'tiwi mu'mkin. Usi'ni'n' saldari'nán tesikshe jan'a ori'ng'a ko'shedi (4.13-su'wrette jan'a 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 elektronlardı'n' biri tesikshelerdin' birewin iyelewi mu'mkin. Usi'ni'n' saldari'nán olardi'n' ekewi de jog'aladi'. Bunday processti tesikshe menen elektronni'n' rekombinasiyası' dep ataymı'z (4.13 (3) su'wret). Rekombinasiyanı'n' itimalli'g'i' elektronlar menen tesikshelerdin' koncentraciyaları'na tuwri' proporsional. Elektron-tesikshe jubi'ni'n' payda boli'w itimalli'g'i' yari'm o'tkizgishtin' temperaturası'na g'a'rezli Veroyatnost zarojdeniya pari' elektron - di'rka zavist 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' joqarı'laydi'. Al bul itimalli'qtı'n' ma'nisi yari'm o'tkizgishke kelip tu'siwhi tolqi'nni'n' intensivligine proporsional.

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 $10kT$ shaması'na ten' temperaturada payda boladi' ha'm erkin zaryad tasi'wshi'lardi'n' koncentraciyasi' n ge tiykarg'i' u'les qosadi'.



Qosi'mtalari' joq yari'm o'tkizgishtegi energiya qa'ddileri.



Qosi'mtası' 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' koncentraciyasi'na proporcional 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 tasti'yi'qlanadi' (4.15-su'wret). Usi' su'wrettegi tuwri' si'zi'qtin' q'i'yali'g'i'ni'n' tangensi aralaspasi' joq yari'm o'tkizgishtin' qadag'an etilgen zonasini'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' koncentraciyalari'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 toqtin' 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 proporcional ekenlige 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 shamanı' kirgizgen qolayli':

$$\vec{v} = \mu \vec{E} \quad (4.27)$$

Bul an'latpadan ji'lji'g'i'shli'qtin' elektr maydani'ni'n' kernewligi \vec{E} nin' shaması' 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'sinikshelerin' biri boli'p tabi'ladi'. Ji'lji'g'i'shli'q tu'siniginin' ja'rdeinde yari'm o'tkizgishler fizikasi'ni'n' ko'p quramali' an'latpalari' a'piwayi'lasadi' (biz to'mende Xoll effektin u'yrengemizde 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 elektronlardı'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' elektronlardı'n' sekirip o'tiwleri menen baylani'sli'.

Yari'm o'tkizgishlerdin' qosı'mtali' o'tkizgishligi. Ayi'ri'm qosı'mtalardı' yari'm o'tkizgishke ju'da' az mug'darda qossa da oni'n' o'tkizgishligin ku'shli o'zgertedi. Bunday qosı'mtalar artı'q erkin elektronlardı'n' yamasa tesikshelerdin' payda boli'wi'na ali'p keledi. Olardi' donorli'q qosı'mtalar (elektronları'n beredi) yamasa akceptorli'q qosı'mtalar (elektronları'n o'zine biriktirip aladi') dep ataydi'.

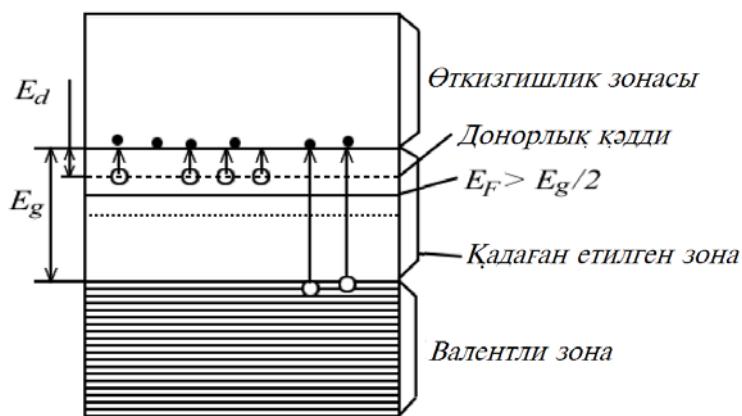
Donorli'q qosı'mtalar kirgizilgen yari'm o'tkizgishlerdi donorli'q yari'm o'tkizgish dep ataymi'z. Bunday yari'm o'tkizgishti elektronli'q o'tkizgish (sebebi olarda artı'q elektronlar ko'p) yamasa n tipindegi yari'm o'tkizgish dep ataydi'. n belgisinin' payda boli'wi' negative so'zinen kelip shi'qqan boli'p, ol erkin zaryad tasi'wshi'lardi'n' atri'qmashli'g'i'n bildiredi.

Akceptorli'q qosı'mtalardı' kirgizgennen keyin yari'm o'tkizgishti akceptorli'q yari'm o'tkizgish dep ataydi'. Oni' tesikshelik yari'm o'tkizgish (sebebi ondag'i' artı'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'qsan, sebebi bunday yari'm o'tkizgishte on' zaryadli' toqtı' tasi'wshi'lardi'n' sani' artı'q).

Eger yari'm o'tkizgishke elektronı' jen'il «aji'rati'p ali'natug'i'n» qosı'mta atomlar kirgizilse onı' donorlı'q yari'm o'tkizgish dep ataymı'z. Mi'sali', eger to'rt valentli kremniyge (yamasa germaniyge) bes valentli mi'shyak yamasa fosfor atomları' kirgizilse, olar o'zlerinin' 4 valentli elektronları'n kristalli'q pa'njerede 4 valentli baylani's du'ziw ushi'n jumsaydi', al besinshi valentli elektron artı'q (awi'si'q) boli'p qaladi'. Bunday elektron atomnan an'sat aji'ralı'p shi'g'i'p ketedi ha'm ol kristal boyı'nsha erkin qozg'ali'p ju'riw mu'mkinshiligin aladi'. Na'tiyjede kristalda artı'q erkin elektronlar payda boladi'. A'lvette qosı'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 sonlı'qtan o'jire temperaturaları'nda bunday procestin' ju'riwinin' itimalli'g'i' (4.23)-an'latpag'a sa'ykes ju'da' az. Donorlı'q yari'm o'tkizgishtegi elektronlardı' tiykarg'i' zaryad tasi'wshi'lar, al tesikshelerdi tiykarg'i' emes zaryad tasi'wshi'lar dep ataydi'.

Zonalı'q teoriyanı'n' tilinde <jen'il bo'linip shi'g'atug'i'n> elektronlardı' payda boli'wi' qadag'an etilgen zonada donorlı'q qa'ddinin' payda boli'wi'na sa'ykes keledi. (4.16-su'wret). Bunday qa'ddiden o'tkizgishlik zonası'na o'tiw ushi'n elektrong'a valentli zonadan o'tkizgishlik zonası'na o'tiw ushi'n talap etileteg'i'n energiyag'a salı'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.
Donorlı'q yari'm
o'tkizgishlerdegi elektronlı'q
hallardı'n' sxemasi'.

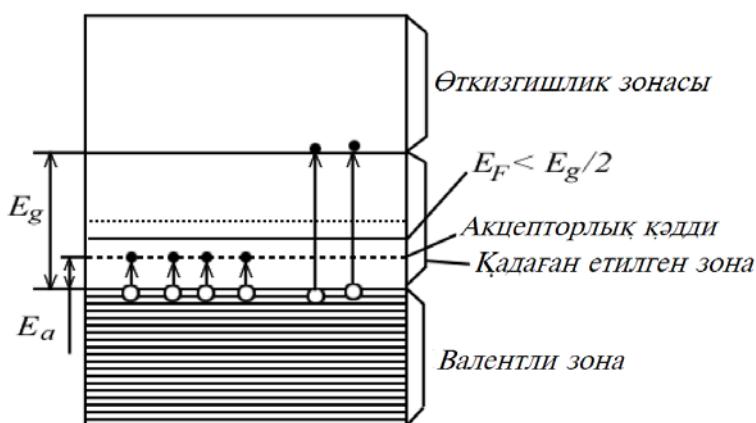
O'jire temperaturaları'na jaqi'n temperaturalarda yari'm o'tkizgishtin' o'tkizgishligine tiykarg'i' u'lesti donorlı'q qa'ddiden o'tkizgishlik zonası'na o'tken elektronlar qosadi'. Al bunday temperaturalarda valentli zonadan o'tkizgishlik zonası'na elektronlardı'n' o'tiwinin' itimalli'g'i' ju'da' az boladi'.

Temperatura joqarı'lag'anda elektronlardı'n' bir bo'limi az sanlı' donorlı'q qa'ddilerden o'tkizgishlik zonası'na o'tedi. Usı'ni'n' menen bir qatarda valentli zonadan o'tkizgishlik zonası'na elektronlardı'n' o'tiwinin' itimalli'g'i' a'dewir u'lkeyedi. Valentlik zonadag'i' qa'ddilerdin' sani' qosı'mta atomlar payda etken qa'ddilerdin' sani'ni'n' ko'p ese artı'q bolg'anlı'qtan temperaturanı'n' joqarı'lawı' menen elektronlar menen tesikshelerdin' koncentraciyaları' arası'ndag'i' u'lken aysi'rma derlik pu'tkilley jog'aladi'. Aysi'rmanı'n' shamasi' donorlı'q qa'ddilerdin' koncentraciyasi'na ten'. Yari'm o'tkizgishtin' o'tkizgishliginin' donorlı'q xarakteri kem-kemnen jog'ala baslaydi'. En' aqı'ri'nda temperatura ja'ne de joqarı'lag'anda yari'm o'tkizgishtegi zaryad tasi'wshi'lardi'n' koncentraciyaları' u'lken boli'p, donorlı'q yari'm o'tkizgish da'slep qa'siyetleri boyı'nsha qosı'mtasi'z yari'm o'tkizgish penen derlik birdey boli'p qaladi', al bunnan keyin ol o'tkizgishlik zonası'nda ko'p elektronlarg'a iye o'tkizgishtin' qa'siyetlerindey qa'siyetlerge iye boladi'.

Donorli'q yarı'm o'tkizgishtegi Fermi qa'ddi energiya shkalasi'nda joqari'g'a karay ji'lji'ydi'. Ji'lji'wdi'n' shamasi' to'mengi temperaturalarda u'lkenirek (bunday temperaturalarda erkin elektronlardı'n' koncentraciyasi' tesikshelerdin' koncentraciyasi'nan a'dewir u'lken). Temperatura joqari'lag'anda yarı'm o'tkizgishtin' 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 yarı'm o'tkizgishtegidey).

Akceptorli'q yarı'm o'tkizgishti ali'w ushi'n yarı'm o'tkizgishke usi' yarı'm o'tkizgishtin' atomlari'ni'n' elektronları' an'sat tu'rde o'zine ala alatuq'i'n atomlardı' kirdizedi. 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 elektronisi'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 yarı'm o'tkizgishtegi tesiksheler tiykarg'i' zaryad tasi'wshi'lar, al elektronlar tiykarg'i' emes zaryad tasi'wshi'lar boli'p tabi'ladi'.

Zonalı'q teoriya tilinde elektronni'n' toli'q kovalentlik baylani'stan elektron jetpeytug'i'n baylani'sqa o'tiwi qadag'an etilgen zonada o'tkizgishlik zonası'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 zonası'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 yarı'm
o'tkizgishtegi elektronli'q
hallardı'n' sxemasi'.

O'jire temperaturalari'na jaqi'n temperaturalarda yarı'm o'tkizgishtin' elektr o'tkizgishligine tiykarg'i' u'lesti valentlik zonadag'i' tesiksheler beredi (bul tesikshelerdin' elektronlar akceptorli'q qa'ddige o'tkende payda bolg'anli'g'i'n umi'tpaymi'z). Al elektronlardı'n' valentli zonadan o'tkizgishlik zonası'na o'tiw itimalli'g'i' ju'da' az.

Temperatura joqari'lag'anda az sandag'i' akceptorli'q qa'ddilerdin' bası'm ko'pshılıgi elektronlar menen toladi'. Soni'n' menen bir qatarda elektronlardı'n' valentlik zonadan o'tkizgishlik zonası'na o'tiwinin' itimalli'g'i' joqari'laydi'. Qosi'mtalar payda etken qa'ddilerdin' sani'nan valentlik zonadag'i' 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'ndag'i' ayi'rma jog'ala baslaydi'. Sebebi olar bir birinen az shamag'a - akceptorli'q qa'ddilerdin' koncentraciyasi'na ayri'ladi'. Temperatura joqari'lag'an sayi'n yarı'm o'tkizgishtin' akceptorli'q ekenligi derlik sezilmeydi. Temperatura ja'ne de joqari'lag'anda yarı'm o'tkizgishtegi zaryad tasi'wshi'lardi'n' koncentraciyalari' ju'da' joqari' boladi' ha'm akceptorli'q yarı'm o'tkizgish penen qosi'mtasi'z yarı'm o'tkizgish arasi'ndag'i' ayi'rma jog'aladi', al temperatura ja'ne de joqari'lasa yarı'm o'tkizgish o'tkizgishke aylanadi'.

Akceptorli'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 elektronlardi'n' koncentraciyasi'nan a'dewir u'lken). Temperatura joqari'lag'anda yari'm o'tkizgishtin' akceptorli'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 akceptorli'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 lazi'm. 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 toqtı' jaqsi' o'tkeretug'i'n monolit (bir pu'tin) yari'm o'tkizgishke aylanadi'.

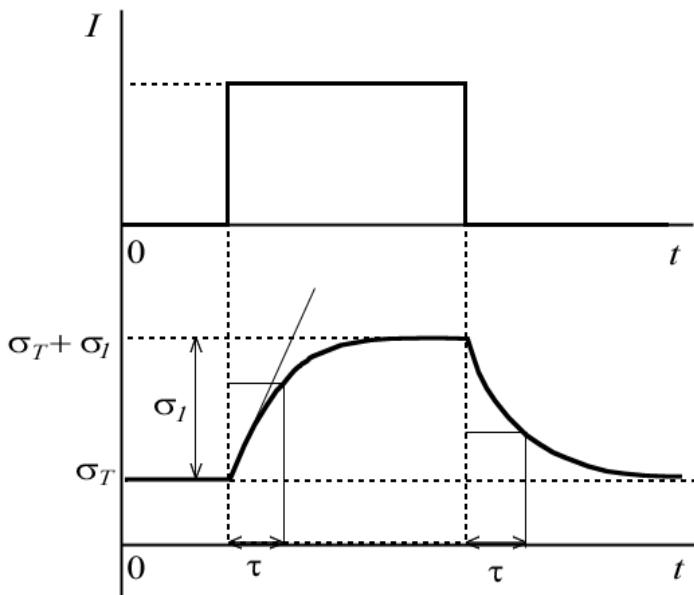
Yari'm o'tkizgishlerdin' foto o'tkizgishligi. Eger yari'm o'tkizgishke elektromagnit nurlani'wi'ni'n' ag'i'si' kelip tu'sse ha'm bul nurlani'wdi'n' kvantlari'ni'n' energiyasi' $\hbar\omega$ qadag'an etilgen zonani'n' ken'ligi E_g shaması'nan u'lken bolsa yari'm o'tkizgishte ishki fotoeffekt qubi'li'si'ni'n' baqlani'wi' mu'mkin. Ishki fotoeffekt qubi'li'si' dep nurlani'w kvanti'n jutqan elektronni'n' valentli zonadan o'tkizgishlik zonası'na o'tiwin aytami'z. Usi'ni'n' saldarı'nan o'tkizgishlik zonası'ndag'i' elektronlardı'n', 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 fotoeffekttin' qi'zi'l shegarasi' boyi'nsha ani'qlaydi'. Fotoeffekttin' 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 jaqtı'li'q penen nurlandi'rg'anda yari'm o'tkizgishtin' o'tkizgishliginin' o'zgerislerinin' eksperimentlerde ali'ng'an na'tiyjelerin paydalananadi'. (4.18-su'wret). O'jire temperaturalari'ndag'i' aralaspasi' (qosi'mtalari') joq yari'm o'tkizgishti qaraymi'z. Jaqtı'li'q nurları' 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 shaması'na ten' boladi' (4.18-su'wret).



4.18-su'wret.

Zaryad tasi'wshi'lardi'n' ten' salmaqlı'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' yarı'm o'tkizgishti jaqtı'landı'ri'wdan g'a'rezligi.

Yarı'm o'tkizgishti jaqtı'landı'rg'anda elektron-tesikshe jubi' payda boladi'. Bul process elektronlar menen tesikshelerdin' rekombinaciysi' menen tez waqi'tti'n' ishinde ten'lesedi. Al rekombinaciysi'n' itimalli'g'i' elektronlar menen tesikshelerdin' koncentraciyaları'ni'n' artı'wi' menen artadi'. Bazi' bir waqi'ttan keyin rekombinaciysi'n' tezligi elektronlar menen tesikshelerdin' tuwi'li'w tezligi menen ten'lesedi. Na'tiyjede yarı'm o'tkizgishte elektronlar menen tesikshelerdin' koncentraciyaları'ni'n' jan'a ma'nisi ornaydi'. Oni' $n = n_T + n_I$ arqali' belgileymiz (4.18-su'wret)). Eger jaqtı'li'qtı' o'shirsek elektronlar menen tesikshelerdin' koncentraciyaları' rekombinaciysi'n' aqibetinde yarı'm o'tkizgishke jaqtı'li'q tu'sirilmesten buri'n ali'ng'an n_T shaması'na shekem to'menleydi. Tap sol si'yaqli' boli'p yarı'm o'tkizgishtin' elektr o'tkizgishligi de o'zgeredi. Yarı'm o'tkizgishtin' jaqtı'li'q tu'sirilgende payda bolg'an o'tkizgishliginin' 2,7 ese (e ese) kemeyetug'i'n waqi'ti' dep ataladi'. Yarı'm o'tkizgishtegi elektronlar menen tesikshelerdin' ortasha jasaw waqi'ti' dep ataladi'. Yarı'm o'tkizgishlerdin' o'tkizgishliginin' tez o'zgerisin oscillografti'n' ekranı'nda baqlaw mu'mkin.

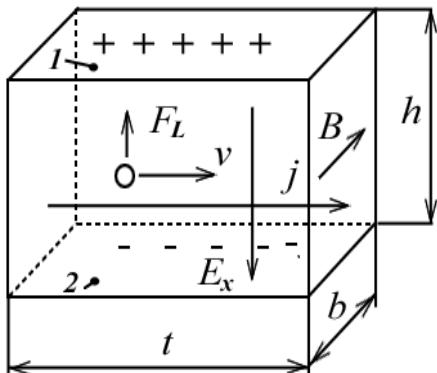
Yarı'm o'tkizgishlerdin' foto'o'tkizgishligi qubi'li'si' texnika ushi'n og'ada a'hmiyetli. Sebebi foto'o'tkizgishlik qubi'li'si' tiykari'nda isleytug'i'n jaqtı'li'qtı'n', elektromagnit tolqi'nları'ni'n' basqa da tu'rlerinin' yarı'm o'tkizgishli datshiklerin (ko'rsetkishlerin) sog'i'w mu'mkin.

Ha'zirgi waqi'tlari' yarı'm o'tkizgishli datshikler (ko'rsetkishler) jaqtı'landı'ri'lg'anlı'q (osveshennost) o'lshew ushi'n da, jaqtı'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, stanoklardı'n' bo'limlerinin' qansha shamag'a qozg'alg'anlı'g'i'n (ori'n almasti'rg'anlı'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 yarı'm o'tkizgishli jaqtı'li'q datshiginin' ja'rdeminde aylani'p turg'an kompakt disktin' betine fokuslang'an lazer nuri'ni'n' intensivliginin' o'zgerislerin o'lsheydi. Bul datshik informaciysi' oqi'wdi'n' ju'da' joqari' tezligin ta'miyinleydi (sekundi'na shama menen 10^8 impuls). Bunday joqari' tezliklerde informaciyalardi' oqi'w ushi'n datshiktegi yarı'm o'tkizgishtegi elektronlar menen tesikshelerdin' jasaw waqi'ti' ju'da' kishi boli'wi' sha'rt (shama menen 10^8 sekund).

Yarı'm o'tkizgishlerdegi Xoll effekti. Tuwri' mu'yeshli paralelopiped formasi'ndag'i' yarı'm o'tkizgish u'lгини qaraymi'z. Oni'n' l qaptali' boyi'nsha j̄ 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 potenciallar ayi'rmasi' dep atalatug'i'n potenciallar 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 effektinin' ju'zege keliwin qarap o'temiz.



4.19-su'wret.

Akceptorli'q yari'm o'tkizgishtegi betlik zaryadlardı'n' ha'm elektro maydani'ni'n' Xoll kernewliginin' payda boli'wi'.

Da'slep akceptorli'q yari'm o'tkizgishti qarap o'temiz. Toqtı'n' ti'g'i'zli'g'i' \vec{j} shaması' 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 $e\vec{E}_x$. Zaryadlardı'n' toplani'wi' menen $e\vec{E}_x$ ku'shi u'lkeyedi ha'm oni'n' ma'nisi Lorenc ku'shine ten' bolg'anda zaryadlardı'n' ji'ynali'w processi toqtaydi' ha'm \vec{v}_h penen \vec{B} shamalari'na juwap beretug'i'n \vec{E}_x shaması' ornaydi'. Ten' salmaqlı'q sha'rti $\vec{F}_L = e\vec{E}_x = e[\vec{v}_h \times \vec{B}]$. Bul an'latpadag'i' \vec{v}_h shaması'n (4.28)-an'latpa ja'rdeminde \vec{j} g'a almasti'ri'p eksperimentler o'tkeriw ushi'n qolaylı' bolg'an

$$\vec{E}_x = \frac{[\vec{j} \times \vec{B}]}{en_h} = R[\vec{j} \times \vec{B}] \quad (4.30)$$

an'latpasi'n alami'z.

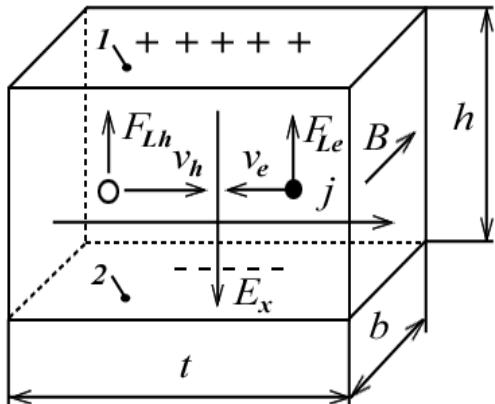
Bul formulag'a kiriwshi barlı'q shamalardi'n' o'lsheniwi mu'mkin. R shaması'n Xoll turaqli'si' dep ataymi'z. Tap sol si'yaqli' formulani' donorli'q yari'm o'tkizgish ushi'n da alami'z ha'm R shaması'ni'n' belgisinin' zaryad tasi'wshi'lardi'n' belgisi menen sa'ykes keletug'i'nli'g'i'na ko'z jetkeremiz.

(4.30)-an'latpanı' 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' shaması'n 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' shaması'n 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' koncentraciyaları' shama menen birdey bolg'an jag'daydi' qaraymi'z. Meyli tuwri' mu'yeshli paralelopiped

formasi'ndag'i' yari'm o'tkizgish u'lgidigi 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 zaryadlardı'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} toqtı'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'rdeinde 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 ola rekombinaciya ushi'raydi'. Meyli ani'qli'q ushi'n joqarg'i' qaptal betke tesiksheler elektronlarg'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 tesikshelere 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 qiladi', al elektronlardı'n' joqari' qaray qozg'ali'si'na ja'rde 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 zaryadlardı'n' toplani'wi' ha'm \vec{E}_x shaması'ni'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 vektorlardı'n' modulleri ushi'n to'mendegidey an'latpa jazami'z:

$$n_h \mu_h (E_i \mu_h) Be - n_h \mu_h E_x \varrho = n_e \mu_e (E_i \mu_e) Be + n_e \mu_e E_x \varrho \quad (4.33)$$

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 $R = E_x/jB$ shaması' ushi'n to'mendegidey formula alami'z:

$$R = (n_h \mu_h^2 - n_e \mu_e^2) / \{(n_h \mu_h + n_e \mu_e)^2 e\} \quad (4.35)$$

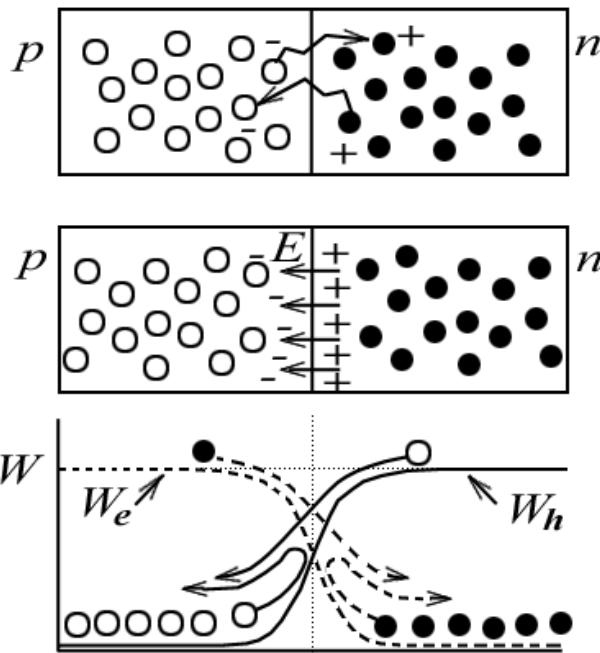
Yari'm o'tkizgishte qosı'mtalar bolmasa (4.34)- ha'm (4.35)-an'latpalar a'piwayi'lasadi'. Bunday yari'm o'tkizgish ushi'n $n_h = n_e$:

$$E_x / E_z = B(\mu_h - \mu_e) \quad (4.36)$$

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 akceptorli'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, qosı'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'slardı'n' saldari'nan p oblasti'ndag'i' tesikshelerdin' biri on' ta'reptegi n tiptegi oblastqa o'te aladi'. Na'tiyjede ol elektronlardı'n' biri menen da'rha'l rekombinaciyaq'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'hi'n' saldari'nan elektron shep ta'reptegi oblasttan on' ta'reptegi oblastqa o'tip da'rha'l tesikshe menen rekombinaciyaq'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 zaryadlardı'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 elektronlardı' 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 shamsi'na 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'tiwdin' itimalli'g'i' 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:

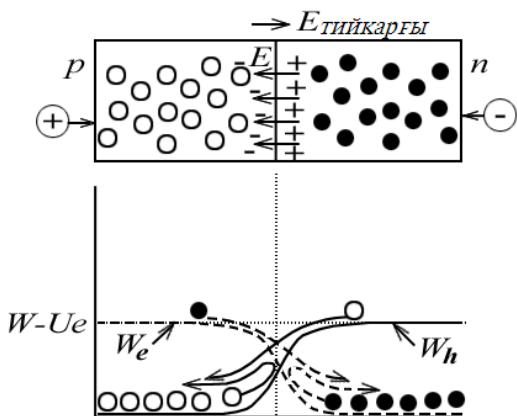
$$j_{\alpha\alpha} = j_0 \exp(-W/kT) \quad (4.38)$$

Ten' salmaqli'q hali'nda bul toq tiykarg'i' emes tasi'wshi'lar payda etken toq ta'repinen kompensacyyalanadi' (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 toqtin' shamsi'na shek qoyi'ladi' (\vec{E} maydani' bul toqtin' o'tiwine «ja'rde 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'liretedi, 4.22-su'wrette keltirilgen tabaldi'ri'qtin' biyikligi kishireyedi ha'm tiykarg'i' tasi'wshi'lardi'n' tog'i'

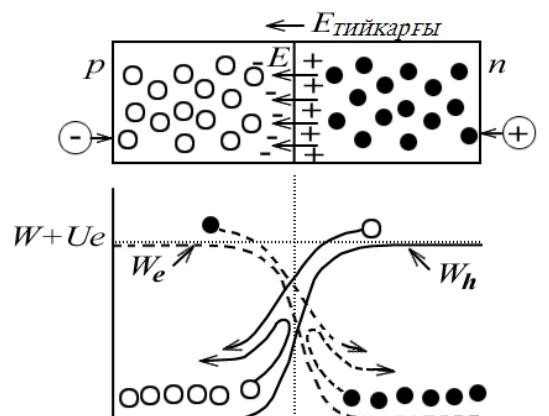
$$j_{\alpha\alpha} = j_0 \exp(-(W - Ue)/kT) \quad (4.39)$$

formulasi'na sa'ykes o'sedi. Tiykarg'i' emes tasi'wshi'lar tog'i' derlik o'zgermey qaladi', sebebi oni'n' shamsi' az sandag'i' tiykarg'i' emes tasi'wshi'lar ta'repinen sheklengen. 4.23-su'wrette si'rttan tu'sirilgen kernew U di'n' shamsi'na 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'sqartip 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.

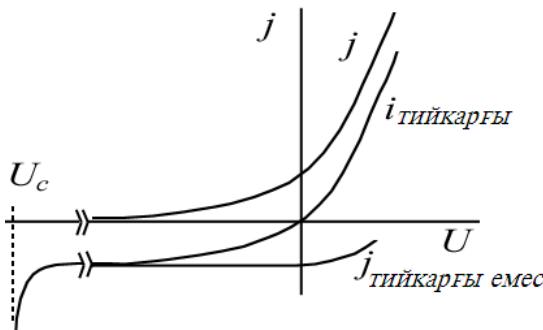


Ris. 4.22b.

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 jalga'w dep ataydi'), onda si'rtqi' \vec{E} maydani' shegaradag'i' \vec{E} maydani'n ku'sheytedi ha'm 4.21-su'wrettegi

tabaldi'ri'qtin' biyikligi o'sedi. Usi'ni'n' saldari'nan tiykarg'i' tasi'wshi'lar tog'i'ni'n' shaması' (4.38)-formulag'a sa'ykes kemeyedi. Al tiykarg'i' emes tasi'wshi'lar tog'i'ni'n' shaması' 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.



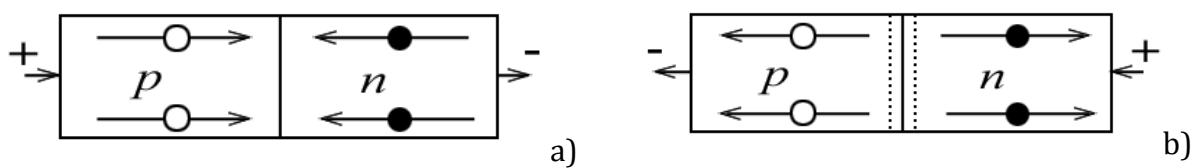
4.23-su'wret.

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 elektronlardi' 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. Proboyg'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 toqtin' 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' simmetriyali' emes: p-n o'tkel bir ta'repke qaray toqtı' jaqsi' o'tkizedi, al ekinshi ta'repke karay toqtı' jaman o'tkizedi.

p-n o'tkelinin' ha'r qi'yli' bag'i'tlarda toqtı' ha'r qi'yli' etip o'tkeriwinin' sebebin a'piwayi' ha'm ko'rgizbeli etip tu'sindiriw 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'

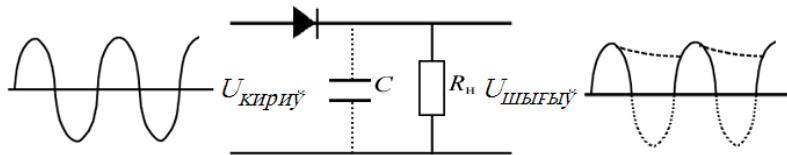
p-n o'tkeldi shi'nji'rg'a tuwri' bag'i'tta tutasti'rsa (4.24-a su'wret) shep ta'reptegi oblasttag'i' tesiksheler eki tiptegi yari'm o'tkizgishlerdin' shagarasi'na qaray, al on'ta'reptegi oblasttag'i' elektronlar da sol shegara bag'i'tta qozg'aladi'. Shegarada olar

rekombinaciyalanadi'. Shi'nji'rdi'n' barli'q ushastkalari'nda toq tiykarg'i' tasi'wshi'lar menen ta'miyinlenedi, 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 keri bag'i'tta tutasti'rsa (4.24-b su'wret) shep ta'reptegi oblasttag'i' tesiksheler shegaradan keri bag'i'tta, al on' ta'reptegi ushastkadag'i' elektronlar da shegaradan keri ta'repke qaray qozg'aladi'. Bo'lip turg'an shegarada toqt'i' tiykarg'i' tasi'wshi'lar qalmaydi'. Bul shegaradag'i' toqt'i' juqa p-n o'tkeldegi 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-amperlik xarakteristika 4.23-su'wrettegidey simmetriyali' emes xarakterge iye boladi'.

Texnikada p-n o'tkeldi jiyi qollanadi'. Olardi'n' ayi'ri'mlari' haqqi'nda ayti'p o'temiz.

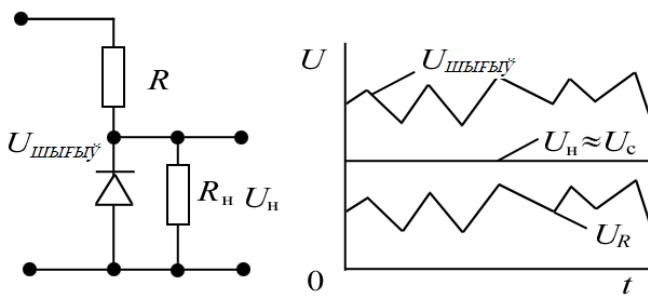
Toqt'i' tuwri'law ha'm signallardi' detektorlaw. Bunday maqsetlerde en' bas bo'limi p-n o'tkel bolg'an yari'm o'tkizgishli diodlardi' paydalanadi'. Diodti' shi'nji'rg'a tutasti'ri'wdi'n' sxemasi' 4.25-su'wrette keltirilgen. Egerde shi'nji'rdi'n' kiriw bo'limine sinusoida ta'rızli signal berilse, onda diod o'zi arqali' sinusoidani'n' tek on' ma'nisi yari'm tolqi'nları'n g'ana o'tkeredi. 4.25-su'wrette diod arqali' o'tken toq o'tetug'i'n karsi'li'qtin' ushi'ndag'i' signaldi'n' tu'ri keltirilgen. Sinusoidani' «tegislew» maqsetinde qosimsha S kondensatori' paydalani'ladi'. Bul kondensator zaryadlanı'w ha'm razryadlanı'w arqali' «su'yir» yari'm tolqi'nları tegisleydi. Usi'nday sxema tiykari'nda kernewdin' en' a'piwayi' tuwri'lawshi'lari' isleydi. Bul tuwri'lawshi'lar o'zgermeli toqt'i' turaqli' toqqa aylandi'radi'. Tap usi'nday sxema boyi'nsha isleytug'i'n signallar detektorlari' bolsa joqarg'i' jiyilikli signallardi'n' paydali' informaciyalardi' 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'.

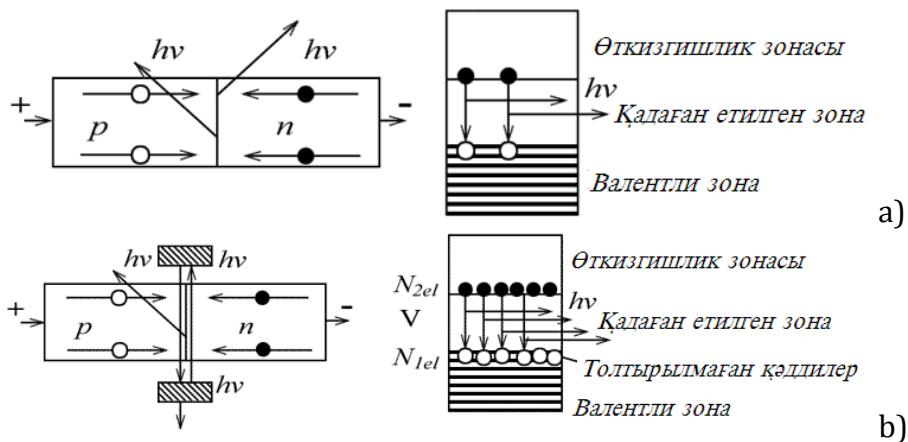
Kernew stabilizatorlari'. p-n o'tkeldin' proboyi' qubi'li'si'n kernewdi stabilizaciyalaw ushi'n paydalanadi'. Buni'n' ushi'n orni'qli' emes (stabilni'y emes) $U_{кириw}$ kernew deregine rezistor menen stabilitronnan turatug'i'n shi'nji'r tutasti'radi'. Stabilitron bolsa p-n o'tkelinen turadi'. Stabilitron keri 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'tiwhi toqt'i'n' shaması' u'lkeyedi ha'm rezistorg'a tu'sken kernew de u'lkeyedi. Usi'nin' saldarı'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' qosimdi'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 stabilizaciyalaw 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 voltan ju'zlegen voltlardag'i' diapazonlarda isleydi.

Jaqti'li'q shi'g'ari'wshi' diodlar. Jaqtli'li'q shi'g'ari'wshi' diodlar elektr tog'i'ni'n' energiyasi'n jaqtli'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' ushi'raydi'. Bul elektronni'n' o'tkizgishlik zonası'n' 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'll oblasttan ultrafiolet oblastqa shekemgi kvantlar shi'g'atug'i'nday etip saylap ali'wg'a boladi'.



4.27-cu'wret.

Jaqti'li'q
shi'g'aratug'i'n (a)
ha'm lazerlik
diodti'n' (b) jumi's
islew sxemasi'

Jaqti'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 jaqtli'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' 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 kvanti'n' diodti'n' materiali' ta'repinen jutli'li'p, oni'n' ji'lli'li'q energiyasi'na aylani'wi'na baylani'sli'. Jaqtli'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'.

Jaqti'li'q shi'g'ari'wshi' diodlar ekonomli' miniatyurali'q jaqtli'li'q derekleri si'pati'nda ken' tu'rde qollani'ladi'. Olar berilgen jiyilik diapazoni'nda jaqtli'li'q shi'g'aradi'. Sonli'qtan bunday diodlar a'dettegidey elektr lampalari'n' almasti'ra aladi', jaqtli'landi'ri'w du'zilislerinde jaqtli'li'q deregisi si'pati'nda paydalani'ladi'.

Lazerlik jaqtli'li'q shi'g'ari'wshi' diodlar. Lazerlik jaqtli'li'q shi'g'ari'wshi' diodlardi'n' islew principi jaqtli'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 tolty'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' tolty'ri'li'wi'n'i'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 rezonatordi'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'ladir etip isleydi ha'm bul bet arqali' lazer nuri' shi'g'adi' (4.27-b su'wret).

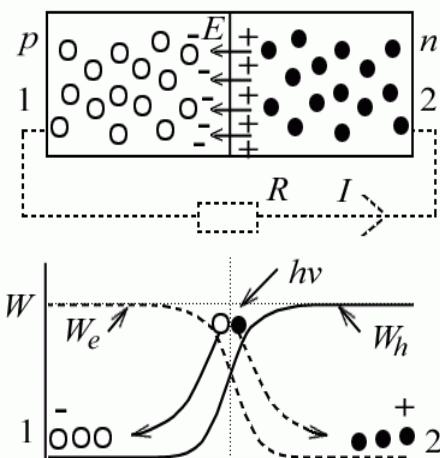
Lazerlik diodlar miniatyurali'q, ekonomli' diodlar boli'p, oni'n' uzi'nli'g'i'ni'n' shaması' 1 sm den ko'p emes. Bunday diodlar ju'da' ku'shli jaqtı'li'q da'stesin bere aladi' ha'm sonlı'qtan olardi' informaciyalardi' jazi'w ushi'n polimer plenkalaridi'n' za'ru'rli bolg'an ori'nlari'n ku'ydiriw ushi'n jiyi paydalaniadi'. Lazerlik diodlardı' informaciyanı' 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 waqi'tlari' 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'siwhi elektromagnit nurlani'wi' energiyasi'. Bunday du'zilislerdi yari'm o'tkizgishli Quyash elementleri dep ataydi';

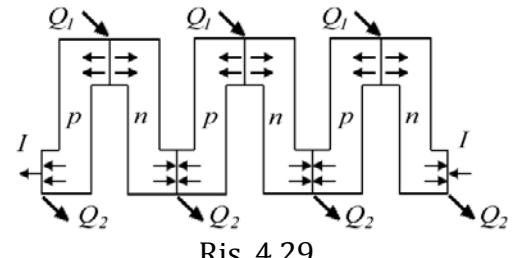
2) p-n o'tkeline ali'p kelinetug'i'n ji'lli'li'q energiyasi'. Bunday du'zilislerdi yari'm o'tkizgishli ji'lli'li'q elementleri dep ataydi'.

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 joqarı'da atap o'tilgen processlerdin' na'tiyjesinde elektr maydani' payda boladi' ha'm elektronlar menen tesikshelerdin' energiyaları'ni'n' tarqali'wi' toqtı' payda etiw ushi'n jumsaladi'. p-n o'tkeli oblastı'nda juti'lg'an kvant tesikshe-elektron jubi'n payda etedi, elektr maydani' tesiksheni p oblastqa, al elektronı'ndı' oblastqa i'si'radi'. Bunday jag'dayda jaqtı'li'q nurları'ni'n' ta'sirinde tesiksheler p, al elektronlar n oblastqa ji'ynaladi'. Usı'ni'n' na'tiyjesinde 1 ha'm 2 noqtalari'n bir biri menen tutasti'rsaq toq o'tedi ha'm bul toqtı' paydalani'w mu'mkinshilige iye bolami'z.



4.28-su'wret.

Yari'm o'tkizgishli Quyash elementinin' konstrukciyası' 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' saldarı'nan ju'zege keledi. Sonlı'qtan su'wrettin' joqarı'si'ndag'i' p-n oblastti' qi'zdi'ri'w kerek boladi'. Elektron-tesikshe jubi'ni'n' rekombinasiyası'ni'n' saldarı'nan ji'lli'li'q bo'linip shi'g'adi', sonlı'qtan su'wrettin' to'meninen ji'lli'li'qti' ali'p ketiw kerek boladi'.

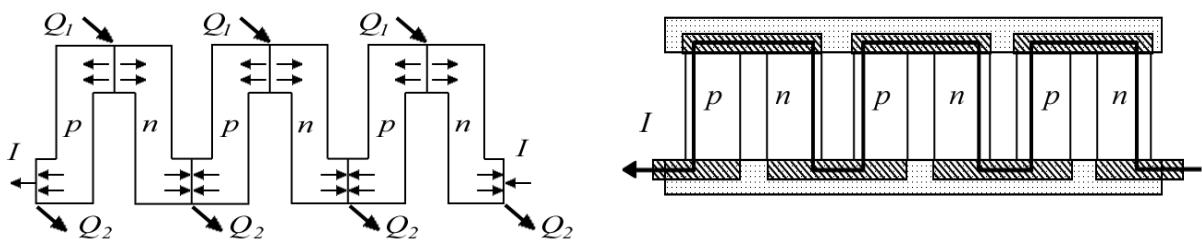
Yari'm o'tkizgishli Quyash elementlerin p tipindegi yari'm o'tkizgishtin' plastinkasi' tu'rinde aladi'. Bul plastinkag'a metaldi'n' juqa mo'ladir qatlami'n oti'rg'i'zadi', al bul o'tkizgishti n tipindegi yari'm o'tkizgish si'pati'nda qaraw mu'mkin. Bunnan keyin metall qatlamdi' qorg'ap turi'wshi' mo'ladir material menen jabadi'. Bul qatlam arqali' o'tken jaqtı'li'q kvantları' metaldi'n' juqa qatlami'nan o'tip p-n oblastı'nda juti'ladi'. Toqtı' yari'm o'tkizgishli plastinkadan ha'm juqa qorg'ap turi'wshi' qatlamanın «ali'p ketedisi». Bunday elementtin' ushlari'nda payda bolg'an potenciallar ayi'rmasi' voltten a'dewir kishi, al toqtı'n'

shaması' 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'qtin' ta'sirinde payda boladi'.

Yari'm o'tkizgishli ji'lli'li'q elementlerin a'dette 4.29-su'wrette ko'rsetilgендey etip batareyag'a tutasti'radi'. Bunday jag'dayda qanday da bir ji'lli'li'q deregi ta'repinen qi'zdi'ri'latug'in p-n o'tkelleri konstrukciyani'n' bir ta'repin, al a'dette suw yamasa hawa ag'i'si' menen qi'zdi'ri'latug'in 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' rekombinaciysi' 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 xarakteristikalarini tan'lap ali'w arqali' ji'lli'li'q energiyasi'ni'n' juti'lli'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'qtin' salqi'n deneden temperaturasi' joqari' bolg'an denegi 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'.

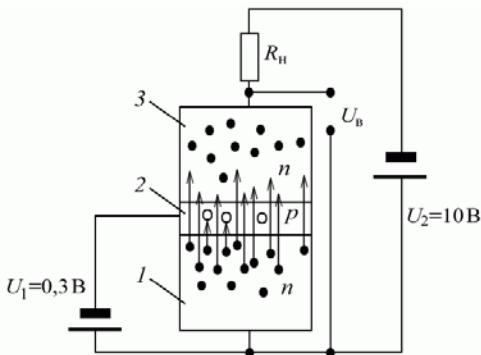


4.30-a ha'm b su'wretler.

Salqi'nlatqi'shtag'i' yari'm o'tkizgish oblastlardi'n' bir biri menen jalg'ani'wi'. Elektron-tesikshe jubi'ni'n' payda boli'wi' ji'lli'li'qtin' 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' rekombinaciysi' ji'lli'li'qtin' 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 miniyaturla'i'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'rsetilgендey etip tutasti'rsa yari'm o'tkizgish tranzistor dep atalatug'i'n a'sbap ali'nadi'. Bunday tranzistordi'n' ja'rdeminde signallardi', toqlardi', kernewlerdi ku'sheytiw 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' (tranzistorlardi'n' tek eki tipi bar).



4.31-su'wret.
n-p-n tipindegi tranzistordi' tutasti'ri'w
sxemasi'.

n-p-n tranzistordi'n' jumi's islew principin qarap o'temiz. 2 arqali' belgilengen ortadagi'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 rekombinaciyaq'a ushi'ramay joqari'dag'i 3 oblasti'na kelip jetiwi talap etiledi. Bul principialli'q talap. 1, 2 ha'm 3 oblastlari' tranzistordi'n' sa'ykes emitteri, bazasi' ha'm kollektori' dep ataladi'. Olarg'a o'tkizgishler jalq'anadi'. Bul o'tkizgishlerdi de radiotexnikada tranzistordi'n' emitteri, bazasi' ha'm kollektori' dep ataladi'.

Emitter menen bazag'a jalq'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 rekombinaciyaq'a ushi'raydi' (shama menen 20-100 elektronni'n' birewi). Qalg'an elektronlardi'n' barli'g'i' da rekombinaciyaq'a 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 toqtin' u'lken shamalarg'a o'siwin, al bul o'z gezeginde kollektor oblasti'ndag'i' toqtin' o'siwin ta'miyinleydi. 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 toqtin' n' kishi o'zgerisleri tranzistordi'n' baza menen kollektori' arasi'ndag'i' kernewdin' u'lken shamalarg'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 tranzistorlardı'n' o'lshemleri bir mikrometrden aspaydi', al bir mikrosxema o'z ishine 10^6 - 10^8 shaması'na shekem tranzistorlardı' 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 tranzistorlardı'n' birden 10^5 - 10^8 danasi'n aladi'].

Yari'm o'tkizgishlerden sog'i'ilg'an tranzistorlardı'n' ha'm basqa da yari'm o'tkizgishli a'sbaplardı'n' kemshiligi si'pati'nda birinshi gezekte olardi'n' qi'zi'wg'a, radiaciyaq'a ayri'qsha sezgirligin atap o'tiw kerek. Sonli'qtan ku'shli radiaciya bar ori'n larda yari'm o'tkizgishli a'sbaplardı' tabi'sli' tu'rde paydalani'w mu'mkin emes ha'm sonli'qtan sonday ori'n larda usi' ku'nlerge shekem radiolampalari' bar a'sbap-u'skeneler paydalani'ladi'.

1956-ji'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 revolyuciysi' boldi'rdi'. Kompyuterlik, basqa da elektronli'q texnikani'n' kompaktli' ha'm isenimli elementlerin do'retiw mu'mkinshiligi ju'zege keldi.

5. Qattı' 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'rtiplesken zatlardi' ayi'ri'p ko'rsetedi. Bunday zatlarda qon'si'las atomlardi'n' magnit momentleri bag'i'tlari' boyi'nsha ta'rtiplesken. 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'rtiplesiwi 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'rtiplesken zatlardi'n' fizikali'q qa'siyetlerin qarap o'temiz.

Magnitlik ta'rtiplesiwdin' ta'biyati'

Atomlardi'n' magnit momentlerinin' ta'rtiplesken tu'rde jaylasi'wlari' elektrostatikali'q ta'biyatqa iye ha'm elektronlardi'n' tolqi'n funkciyalari'na Pauli principi ta'repinen qoyi'latur'q'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'rde minde 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'nslasi'w duri's na'tiyjelerdi beredi dep esaplaydi'. Elektronlardi'n' tolqi'n funkciyasi'ni'n' antisimmetriyali'g'i' eki jag'dayda ju'zege keledi:

1) tolqi'n funkciyasi'ni'n' spinlik bo'limi antisimmetriyali' (bul spinlerdin' qarama-qarsi' bag'i'tlari'na sa'ykes keledi), al oni'n' koordinatali'q bo'limi simmetriyali' yamasa simmetriyali' emes,

2) tolqi'n funkciyasi'ni'n' spinlik bo'limi simmetriyali' (bul siperlerdin' bag'i'tlas boli'wi'na sa'ykes keledi), koordinatali'q bo'limi bolsa antisimmetriyali'.

Simmetriyali'q tolqi'n funkciyasi'ni'n' koordinatali'q bo'limi mi'naday tu'rge iye:

$$\Psi_r(\vec{r}_1; \vec{r}_2) = \Psi_{r_1}(\vec{r}_1) \cdot \Psi_{r_2}(\vec{r}_2) + \Psi_{r_1}(\vec{r}_1) \cdot \Psi_{r_2}(\vec{r}_2),$$

Al antisimmetriyali'q tolqi'n funkciyasi'ni'n' koordinatali'q bo'limi mi'naday tu'rge iye:

$$\Psi_r(\vec{r}_1; \vec{r}_2) = \Psi_{r_1}(\vec{r}_1) \cdot \Psi_{r_2}(\vec{r}_2) - \Psi_{r_1}(\vec{r}_1) \cdot \Psi_{r_2}(\vec{r}_2).$$

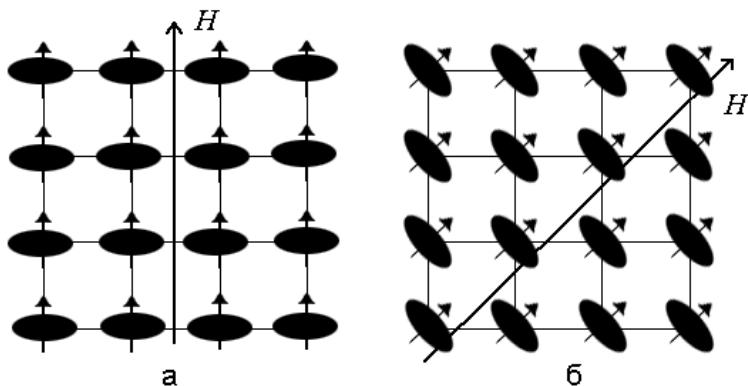
Solay etip spinlerdin' bir birine sali'sti'rg'andag'i' bag'i'tlari' (orientaciyalari') elektronlardi'n' tolqi'n funkciyalari'ni'n' tu'rini o'zgertedi eken. Bul jag'day elektronlar qabi'qlari'ni'n' ha'r qi'lyi' formalari' ha'm elektrostatikali'q energiyani'n' ha'r qi'lyi' ma'nisleri menen baylani'sli'. Spinlerdin' antiparallel ha'm parallel bolg'an jag'daylari'na sa'ykes keliwshi (yamasa tolqi'n funkciyasi'ni'n' koordinatali'q bo'liminin' simmetriyali'q ha'm antisimmetriyali'g'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} shamasi'ni'n' $2J(\vec{S}_1, \vec{S}_2)$ shamasi'na 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 shamasin'i'n' en' u'lken ma'nisi toliti'ri'l mag'an ishki elektronli'q qabi'qlarg'a iye atomlarda baqlanadi'. Mi'sal retinde temirdi, xromdi', marganecti, 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 shamasin'i'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'rtiplesiwdin' ko'p sanli' tiplerin payda etedi.

Atomlardi'n' magnit momentleri ta'rtipleskende energiyali'q jaqtan bir qansha utadi'. Bul uti'sti'n' shamasin' atomlar qaytadan ta'rtipleskendegi ximiyali'q baylani'stag'i' energiyani'n' uti'si'nday ma'niske iye. Usi'nday sebeplerge baylani'sli' atomlardi'n' magnit momentlerinin' ta'rtiplesiwi quymadag'i' atomlardi'n' qaytadan toparlarg'a 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'rtiplesken element penen bay, ekinshisi «qalg'an» elementlerge bay fazalar).

Magnitlik anizotropiya. Kristalda magnitlik ta'rtiplesiw energiyasi' kristallografiyalı'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' kristallografiyalı'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 betlesiwi ha'r qi'yli' bolg'anli'qtan su'wrette keltirilgen qabi'qlar ushi'n o'z-ara ta'sirlesiwdin' 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 shamasin' yari'm fenomenologiyali'q formulalar ja'rdeinde esisplaydi'.



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 shamasin' 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 esisplaydi'. Bul funkciyani'n' ma'nisi kosinuslardi'n' belgisinen g'a'rezli bolmawi' ha'm kosinuslardi'n' ori'nlari'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 qaramaqarsi' 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 shamasin' 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 shamasi' 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, geksagonalli'q pa'njerege iye kobalt ushi'n [0001] bag'i'ti' jen'il magnitleniw bag'i'ti' boli'p tabi'ladi'. Jan'a magnitlik materiallardi' do'retkende ha'm olardi' texnikada paydalang'anda magnitlik anizotropiyani' esapqa ali'w za'rur. Magnitlik anizotropiya turaqli' magnitler sog'i'w ushi'n paydalani'latug'i'n ko'plegen materiallardi'n' en' joqari' xarakteristikaları' boli'p tabi'ladi'.

Magnitostrikciya. Atomlardi'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' atomlardi'n' ten' salmaqli'q hallari'ni'n' o'zgeriwi kerek. Sebebi asimmetriyali'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' geometriyali'q o'lshemleri 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 magnitostrikciya dep ataladi'.

Magnitostrikciyani' toyi'ni'w magnitostrikciyasi' 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} shamasi'nda. Biraq konstantasi'ni'n' shamasi' 10^{-3} ke shamalas gigant magnitostrikciyag'a iye siyrek jer elementlerinin' birikpeleri de bar.

Magnitostrikciyani' sesti ha'm ultrasesti generaciyalawshi' du'zilislerde ken' tu'rde qollanadi'. Magnitostrikciya koefficienti u'lken bolg'an materialdan sog'i'lg'an serdeshnikti jiyiliği ω bolg'an o'zgermeli sinusoidal'i'q toq penen magnitleydi. Usi'ni'n' saldari'nan serdeshniktin' uzi'nli'g'i' 2ω jiyiliği menen o'zgeredi. Al usi'nday serdeshnik membranag'a tutasti'ri'lg'an bolsa ol a'tiraptag'i' ortalı'qtı' terbeliwi mu'mkinshiligine iye boladi'.

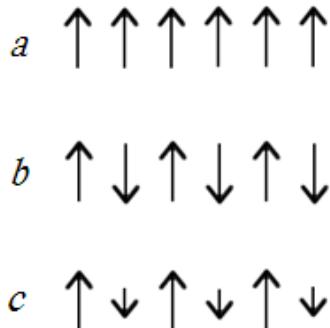
Magnitostrikciyag'a keri bolg'an qubi'li's ta bar. Bunday jag'dayda kristaldi'n' deformaciyasi' elektronli'q qabi'qlardi'n' bag'i'tlari'ni'n', solar menen birge atomlardi'n' magnit momentlerinin' anizotropiyali'q bag'i'tlani'wi'na ali'p keledi (5.1-su'wrette keltirilgen). Demek kristaldi' deformaciyalaw oni'n' magnitleniwine ali'p keledi degen so'z. Bul qubi'li'sti' da texnikada terbelisler menen vibraciyalardi' o'shiretug'i'n du'zilislerdegi materialarda 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 polikristali'n) deformaciyalaydi'. Usi'ni'n' saldari'nan bunday material qaytadan magnitlenedi ha'm buni'n' ushi'n qosı'msha energiya talap etiledi. Bul qosı'msha energiya terbelmeli processlerden ali'nadi' ha'm na'tiyjede terbelis amplitudasi' kemeyedi. Vibraciyanı'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'rtiplesiwdin' tipleri

Qattı' denelerdegi atomlardi'n' magnit momentlerinin' bag'i'tlari' boyi'nsha ta'rtiplesip jaylası'wlari'ni'n' ko'plegen tipleri bar. Bul jag'day almasi'w integrali'ni'n' bir biri menen ta'sirlesiwshi atomlardi'n' quri'li'si'nan, olar arasi'ndag'i' qashi'qli'qlardan, u'sh o'lshemli kristalli'q pa'njeredege olardi'n' bir birine sali'sti'rg'andag'i' jaylası'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'rtiplesken zatlardi'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'rinipli 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 jaylası'wi' da baqlanadi'. Mi'sali' magnit momentlerinin' spiral ta'rızlı boli'p ta'rtiplesi 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' saldarı'nan Mn atomlari' arasi'ndag'i' qashi'qli'q belgili bir ma'niske jetkende (yag'ni'y Al atomlari'ni'n' belgili bir koncentracyasi'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 paydalananadi'.

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'nislere iye.

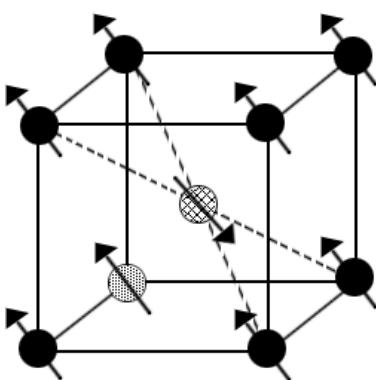
Ekinshisi bolsa atomni'n' magnit momenti $\vec{\mu}$ din' shaması'nan ha'm bag'i'ti'nan g'a'rezli. Eger shashi'raw vektori' \vec{G} menen $\vec{\mu}$ o'z-ara perpendikulyar bolsa shashi'raw maksimalli'q ma'niske, al parallel bolg'anda nolge ten'. Solay etip kristaldi' \vec{G} bag'i'ti'nda magnitlep magnitlik shashi'rawdi' «joq» etiwge boladi' degen so'z. \vec{G} menen $\vec{\mu}$ vektorlari' arasi'ndag'i'

mu'yeshler ha'r qi'yli' ma'nislere 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'rtiplesiw 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'.

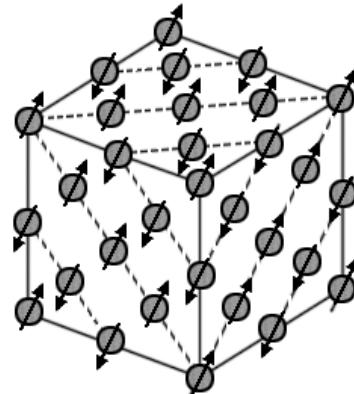
Antiferromagnitlik ta'rtiplesiwde qon'si'las atomlardi'n' magnit momentleri bir birine qarama-qarsi' bag'i'tqa iye, al shashi'rag'an tolqi'nni'n' amplitudasi'na magnitlik u'lestir' belgileri ha'r qi'yli' boli'p qon'si'las atomlardi'n' shashi'raw amplitudalari' ha'r qi'yli' ma'nislere iye. Na'tiyjede qosi'msha «magnitlik» shashi'rawlar payda boladi' (atomlardi'n' jaylasi'wlari'ni'n' ta'rtiplesiwi de tap usi'nday «qosi'msha» shashi'rawlardi' payda etetug'i'nli'g'i'n eske tu'siremiz).

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'nislere 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'rtiplesiwge iye

manganec 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 teoriyası'

Biz joqari'da ko'rip o'tken magnit momentlerinin' ta'rtiplesken 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'rtiplesken 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'rtiplesip jaylasi'wlari'n buza aladi'. Bunday jag'dayda ferromagnetik paramagnetikke aylanadi'. T_c shaması'ni'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' shaması' 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'nisleri boyi'nsha magnit momentlerinin' bir biri menen ta'sirlesiw energiyasi' ω ni' ani'qlaw mu'mkin. Ta'rtiplesken magnit momentlerin buzi'w (qi'yrati'w) ushi'n shama menen $kT_c \approx \omega \approx 0,1 \text{ eV}$ 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' $\omega_d \approx |\mu||\vec{B}| \approx 0,001 \text{ eV}$ shaması'na ten'. Bul shama kT_c shaması'nan a'dewir kishi (ju'z esedey kishi). Demek ω_d ni'n' shaması' T_c temperaturalari'nda magnit momentlerin ta'rtiplesken halda uslap turi'wg'a jetpeyi. Sonli'qtan elektronli'q qabi'qlardi'n' elektrostatikali'q ta'sirlesiw menen baylani'sli' bolg'an magnit ta'rtiplesiwinin' kvantli'q tu'sindiriliwi birden bir qanaatlandi'rarli'q ha'm ba'rshe ta'repten moyi'nlang'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'rtiplesiwdin' «taza magnitlik» ta'biyati' jatadi'. Bul modeller toli'q korrektli (qatan' tu'rde tiykarlang'an) boljawlarg'a 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'tlierin qarap o'temiz.

Ortasha maydan modeli. Ferromagnetlerdin' ko'p qa'siyetlerin sa'tli tu'rde ta'ripleytug'i'n bazi' bir modeller elektronli'q qabi'qlardi'n' elektrostatikali'q ta'sir etisiwinin' 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') paydalanyadi'. \vec{B}_E almasi'w magnit maydani' magnit momentlerinin' ta'rtiplesip jaylasi'wlari'n ta'miyinlewi tiyis ha'm oni'n' shaması'n bahalaw mu'mkin. Bul modeller boyi'nsha almasi'w magnit maydani' ta'rtiplesip jaylasqan magnit momentleri ta'repinen payda etiledi ha'm usi' magnit maydani'ni'n' o'zi momentlerdin' ta'rtiplesip 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' ishindegi en' a'piwayi'si' **ortasha maydan modeli** boli'p tabi'ladi'. Bul modelde ha'r bir magnit

momentine zatti'n' magnitlengenligi \vec{J} shamasi'na tuwri' proporsional bolg'an \vec{B}_E magnit maydani' ta'sir etedi:

$$\vec{B}_z = \mu_0 \lambda \vec{J} \quad (5.2)$$

Bul an'latpada μ_0 arqali' vakuumni'n' magnit sin'irgishligi, al λ arqali' proporsionalli'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}_E , sali'sti'rmali' magnit sin'irgishligi χ_p , \vec{J} ha'm \vec{B}_E shamalari' arasi'ndag'i' elektrordinamikadan belgili bolg'an baylani'sti' tabami'z:

$$\mu_0 \vec{J} = \chi_p (\vec{B}_0 + \vec{B}_z) \quad (5.3)$$

Paramagnetizm teoriyası'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 paydalanimi'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'rinipli 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'jiriyelerde bul ni'zamnan u'lken emes ayi'rmalar baqlanadi'. Mi'sali' (5.6) boyi'nsha esaplang'an T_C ni'n' ma'nisi ta'jiriyelerdegi ferromagnetiktegi spontan magnitleniwdin' 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'rtip ori'n aladi'. Bunday jag'dayda T_C noqati' jani'nda zatti'n' paramagnitlik hali'n magnit momentleri tek kishi arali'qlarda ta'rtiplesken ha'm u'lken χ g'a iye ferromagnitlik hal dep esaplaw mu'mkin.

Eger paramagnetizm teoriyası'ndag'i' Kyuri turaqli'si' C ushi'n belgili bolg'an an'latpani' paydalansa, 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 $T_C \approx 1043 K$. $B_E = \lambda \mu_0 J$. Linde faktori' $g \approx 2$; $S = 1$; $\mu_0 J \approx 2Tn$. Bunnan $\lambda \approx 500$ ha'm $B_E \approx 1000$ Tl ekenlige iye bolami'z. B_E nin' shamasi' ju'da' u'lken boli'p shi'qtı' (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'sirlesiwdin' atomlardı'n' bir biri menen magnitlik ta'sirlesiwiniń' na'tiyjesi dep esaplaw sa'ykes kelmeydi). Biraq usi'nday jag'daylarg'a qaramastan ortasha maydan modeli ferromagnetizm teoriyası'nda magnitlengenliktin' temperaturalı'q g'a'rezligin esaplag'anda jiyi paydalani'ladi'.

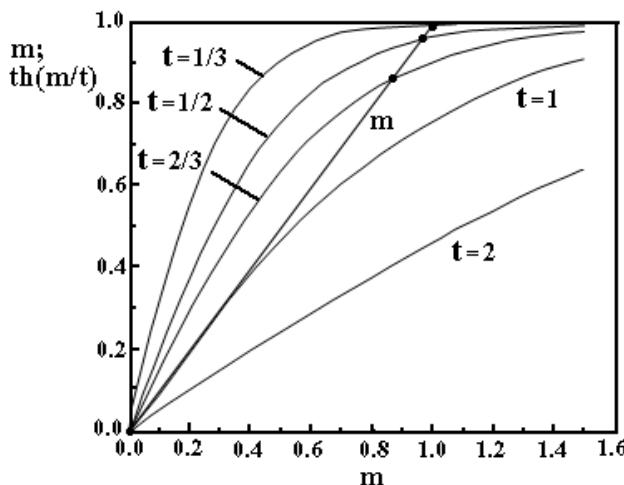
T_C temperaturasi'nan to'mengi temperaturalardag'i' magnitlengenlik. $T < T_C$ temperaturalardag'i' spontan magnitlengenliktin' temperaturadan g'a'rezligin esaplaymi'z. A'piwayi'li'q ushi'n $S = 1/2$ bolg'an jag'daydi' qaraymi'z. Bunday jag'dayda paramagnetizm teoriyası'na muwapi'q magnitlengenlik J shaması'ni'n' B menen T dan g'a'rezligi bi'layi'nsha jazi'ladi':

$$J = n\mu_s \cdot \text{th}(\mu_s B / kT) \quad (5.8)$$

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':

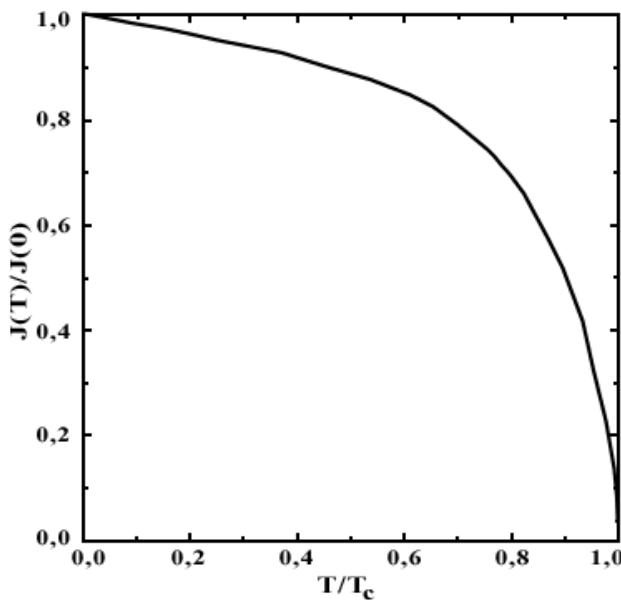
$$J = n\mu_s \cdot \text{th}(\mu_s \mu_0 \lambda J / kT) \quad (5.9)$$

Bul ten'lemini J shaması'na 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'rdeinde de ten'lemini analitikali'q sheshiw mu'mkinshiliği bolmadi'). Soni'n' ushi'n (5.9)-ten'lemini $\frac{1}{t} = \frac{\mu_s^2 \mu_0 n}{kT}$ ha'm $m = \frac{J}{n \mu_s}$ belgilewlerin qabi'l etip sanlı' 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 sheshime iye boladi'. Na'tiyjeleri 5.6-su'wrette keltirilgen.



5.5-su'wret.

(5.9)-ten'lemini 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' joqarı'sı'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:

$$J(T) \approx J_0 (1 - T / T_c)^{\nu_2} \quad (5.10)$$

Shama menen usi'nday $J(T)$ g'a'rezligi (da'rejede $\frac{1}{2}$ 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' paramagnetikk'e o'tiwin 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 bahalayimi'z. Buni'n' ushi'n $th(a) \approx 1 - 2 \exp(-2a)$ asimptotali'q formulasi'nan paydalani'p (5.8)-an'latpani' tu'rrendiremiz:

$$\Delta J(T) \approx 2J_0 \exp(-2(\mu\mu_0\lambda J / kT)) = 2J_0 \exp(-2T_c / T) \quad (5.11)$$

Eksperimentler bolsa $T \rightarrow 0$ sheginde $\Delta J(T)$ shamasi'ni'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'.

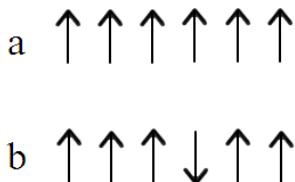
Solay etip ortasha maydan teoriyası' Kyuri temperaturasi' a'tirapi'ndag'i' ferromagnetiklerdin' magnitlengenligin qanaatlandi'rarli'q da'rejede, biraq $\Delta J(T)$ shamasi'ni'n' $T \rightarrow 0$ shegindegi o'zgerislerin turpayi' tu'rde ta'ripleydi. Spin tolqi'nları' teoriyası' (5.12)-an'latpadag'i' g'a'rezlikti tu'sindiriwge mu'mkinshilik beredi. Bul ju'da' quramali' bolg'an teoriyanı'n' ferromagnetikler ushi'n ali'ng'an tiykarg'i' na'tiyjelerin to'mende qarap o'temiz.

Spin tolqi'nları' 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' teoriyası' ferromagnetikler tiykarg'i' halda turatug'i'n to'mengi temperaturalardag'i' atomlardı'n' magnit momentlerinin' qa'siyetlerin u'yrenedi. Bunday temperaturalarda spinler bir birine parallel jaylasadi'. Biz ferromagnetiktin' magnitlik qa'siyetlerine elektronlardı'n' orbitalı'q qozg'ali'slari'ni'n' aytarlı'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'l'i'q ushi'n N dana spinnen turatug'i'n si'zi'qli' shi'nji'rdi' qaraymi'z (5.7-a su'wret). Ha'r bir spin $\hbar S$ shaması'na ten' spin momentine iye. Shi'nji'rda tek jaqi'n qon'si'lar bir biri menen ta'sirlesedi dep esaplaydi'. Bunday shi'nji'rdag'i' spinlerdin' ta'sirlesiw energiyasi'n bi'layi'nsha jazi'wg'a boladi':

$$U = -2J \sum_{\gamma=1}^N \vec{S}_{\gamma+1} \cdot \vec{S}_\gamma \quad (5.13)$$

Bul an'latpadag'i' J arqali' alması'w integralı' belgilengen (alması'w integralı'n J arqali' belgilew da'stu'rge aylang'an). To'mengi temperaturalardag'i' ji'lli'li'q qozg'ali'slari' bul sistemag'a «qozi'wlardi» engize aladi'. Mi'sali' spinlerdin' biri bag'i'ti'n qarama-qarsi' bag'i'tqa o'zgerte aladi' (5.7-b su'wret).



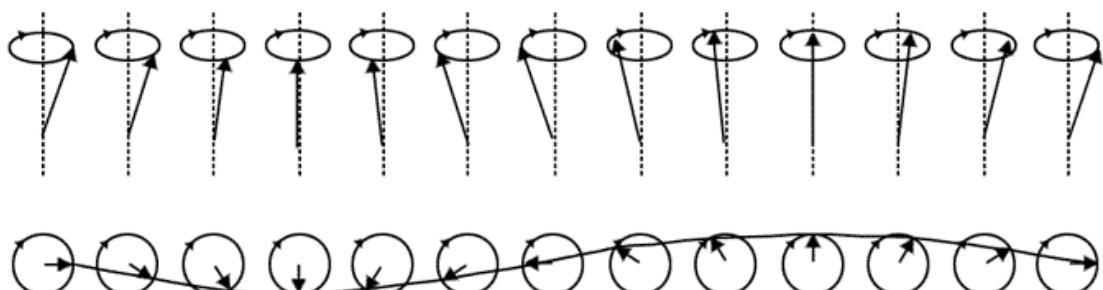
5.7-su'wret.

Atomlardı'n' si'zi'qli' shi'nji'ri'ndag'i' spinlerdin' orientaciyası' (bag'i'ti'): barlı'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' shaması' salı'sti'rmalı' 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'wlari kvantlanadi'. Sa'ykes kvantti' magnon dep ataymi'z. Magnonlar da fotonlar menen fononlar si'yaqlı' kvazibo'leksheler boli'p tabi'ladi'. Ha'r bir magnonni'n' uli'wmali'q spinnin' S_z qurawshi'si'n birge (1 shaması'na) o'zgertetug'i'nli'g'i'n ko'rsetiwge boladi'.



5.8-su'wret. Spin tolqi'ni' jag'dayi'ndag'i' atomlardı'n' si'zi'qli' shi'nji'ri'ndag'i' spinlerdin' bag'i'tlari': barlı'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'rezlikti $\omega(\vec{K})$ 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':

$$\hbar\omega = 4JS[1 - \cos(K\alpha)]. \quad (5.15)$$

Kubli'q pa'njereler ushi'n tap usi'nday jollar menen dispersiya ni'zami'n ali'w mu'mkin:

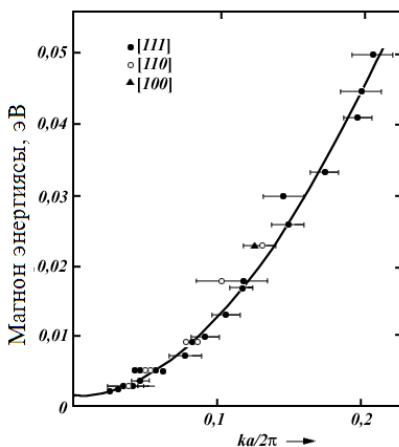
$$\hbar\omega = 2JS \left[z - \sum_{\delta} \cos(K\delta) \right]. \quad (5.16)$$

(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'.

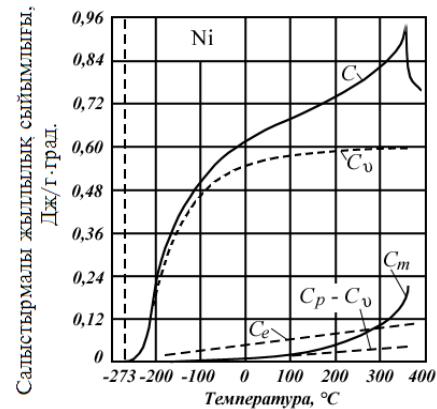
Kishi \vec{K} lar ushi'n barli'q jag'daylar ushi'n $\omega(\vec{K})$ g'a'rezligi uli'wmali'q tu'rge iye:

$$\hbar\omega = 4JS[1 - \cos(Ka)] = 8JS \sin^2(Ka/2) \approx 2JS(Ka)^2. \quad (5.17)$$

Magnonni'n' energiyasi'ni'n' (yamasa jiyiliği $\omega(\vec{K})$ 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'rinipli tur (bul spin tolqi'ni' teoriyası'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'ti'lari'na sa'ykes keliwshi $\omega(\vec{K})$ g'a'rezligi.



5.10-su'wret. Nikeldin' ha'r q'i'yli' temperaturalardag'i' mollik ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'na ha'r q'i'yli' u'leslerdin' temperaturali'q g'a'rezligi.

Magnonlardı'n' energiyası' $E(\vec{K})$ shaması'n 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 statistikası' formulaları'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 magnonlardı'n' bir polyarizaciya' iye bolatug'i'nli'g'i' atap o'temiz (fononlar u'sh polyarizaciya' al vakuumdag'i' fotonlar eki polyarizaciya' iye bolatug'i'n edi).

Tap sonday sxemalar tiykari'nda magnonlardı'n' kristallardi'n' ishki energiyası'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 qattı' denelerdin' ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'na magnitlik

u'lestinsten' temperatura T ni'n' $3/2$ -da'rejesine ($yag'ni'y T^{3/2}$ ge) proporsional bolatug'i'nli'g'i'n ko'rsetedi. Bul eksperimentte ali'ng'an na'tiyjelerge toli'q sa'ykes keledi.

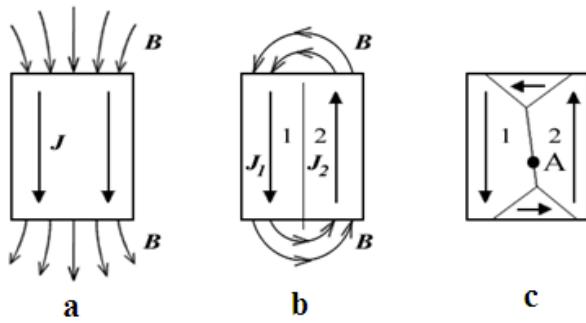
Shama menen tap usi'nday sxema tiykari'nda to'mengi temperaturalardag'i' $J(T)$ ha'm $\Delta J(T)$ shamalari'n da esaplaw mu'mkin. Bunday jag'daylarda ha'r bir magnonni'n' ferromagnetiktin' magnit momentin birdey shamag'a kishireytetug'i'nli'g'i'n esapqa aladi'. Na'tiyjede $\Delta J(T)$ shaması' berilgen temperaturada ferromagnetiktin' bir birlik ko'lemindegi magnonlardı'n' uli'wmali'q sani'na proporsional boladi'. Al bul sandı' Boze-Eynshteyn tarqali'wi'ni'n' ja'rdeinde 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' ferromagnetiktin' 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'lestinsten' shaması' kristalli'q pa'njererin' terbelisleri ta'repinen qosi'latug'i'n u'lestesten 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'lestinsten' shaması' ji'lli'li'q terbelisleri beretug'i'n u'lestinsten' shaması'nan a'dewir u'lken. 5.10-su'wrette nikeldin' ha'r qi'ylı' temperaturalardag'i' mollik ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'na qosi'latug'i'n ha'r qi'ylı' u'leslerdin' temperaturadan g'a'rezligi keltirilgen.

Kyuri temperaturasi' jani'nda $C_V(T)$ shaması'ni'n' temperaturadan g'a'rezligi T_c temperaturasi'ni'n' jani'nda «tiske» iye ekenligi ko'rinipli 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.

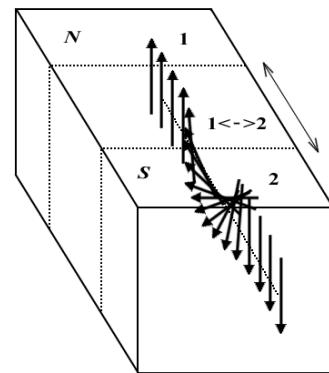
Domenler, qayta magnitleniw mexanizmleri ha'm magnitlik qa'siyetler

Joqarı'da qarap o'tilgen magnit momentlerinin' jaylası'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 shaması' $B^2/2\mu\mu_0$ 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-qarsı' 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-qarası'nda kristaldi'n' domenlerge bo'lınıwi uti'mli' process boli'p tabi'ladi'. Na'tiyjede \vec{B} vektori'ni'n' ku'sh si'zi'qları' 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 momentlerinin' tarqali'wi'ni'n' sxemasi'.

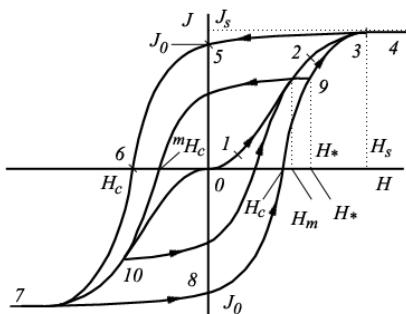
Qon'si'las domenler arasi'ndag'i' shegara domenlik diywaldi' payda etedi. Oni'n' qali'n'li'g'i' bir neshe atomlar arasi'ndag'i' qashi'qli'qqa ten'. Usi'nday arali'qtin' ishinde magnit momentinin' bag'i'ti' toli'g'i' menen o'zgeredi (5.12-su'wret). Magnit momentinin' bag'i'ti'ni'n' usi'nday boli'p o'zgeriwinin' 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 momentlerinin' ta'sirlesiwleri menen de baylani'sli'. Magnit anizotropiyasi' energiyasi'n minimumg'a ali'p keliwge ti'ri'si'w domenlik diywaldi'n' qali'n'li'g'i'ni'n' shaması'n 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 momentlerinin' 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 momentlerinin' bag'i'tlari'ni'n' 5.12-su'wrette ko'rsetilgendey boli'p o'zgeriwi optimalli'q xarakterge iye. Usi' eki u'lestin' minimumi' sha'rtinen domenlik diywaldi'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'lshemlerinin' 1 mkm shaması'nda ekenligin joqari'da aytı'p o'tken edik. Soni'n' menen birge ju'da' mayda domenlerdin' payda boli'wi'na kristalli'q quri'li'sti'n' defektlerinin' de ta'sir etetug'i'nli'g'i'n atap o'temiz.

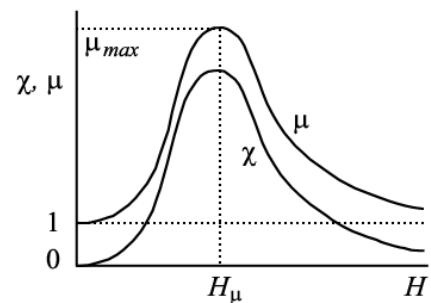
Ko'p ferromagnetiklerdin' kishi magnit maydanları'ndag'i' qaytadan magnitleniw domenlerdin' bar ekenligi menen tu'sindiriledi. \vec{H} maydani' menen magnitlengen, \vec{J} vektorları'ni'n' bag'i'tlari' ha'r qi'yli' bolg'an bir neshe domenlerden turatug'i'n ferromagnetiktin' ushastkasi'n qaraymi'z (5.11-su'wret). A'piwayi'li'q ushi'n domenlik diywaldi'n' qali'n'li'g'i'n kishi ha'm atomlar arasi'ndag'i' qashi'qli'qtay shamag'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 domeninin' 1 domeninde bag'i'tqa iye boli'wi' uti'mli'. Biraq kishi \vec{H} ti'n' ma'nisinde magnit momentlerinin' 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 domeninin' 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 jasaydi'. 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'zgerite aladi' ha'm 1 domenine qosi'ladi'. Usi'ni'n' menen 1 domeni u'lkeyedi, al 2 domeni

kishireyedi. Bunday o'zgerisler domenlik diywaldi'n' atomli'q arali'qqa ten' shamag'a ji'li'sqanli'g'i' menen barabar. Eger domenlik diywaldi'n' qali'n'li'g'i'ni'n' shekli ekenligin esapqa alatug'i'n bolsaq ta bizin' tallawlari'mi'z o'zinin' duri's ekenligin saqlaydi': atomlardi'n' magnit momentlerinin' izbe-iz bag'i'tlari'n o'zgertiwi ha'm domenlik diywaldi'n' ji'li'si'w effekti ju'zege keledi. Qaytadan magnitleniwdin' usi'nday mexanizmin domenlik diywallardi'n' ji'lji'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' defektleri 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'n'i'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 baylan'i'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'qtin' ($\chi = J/H$) ha'm sali'sti'rmali' sin'irgishlik $\mu = B/(\mu_0 H)$ shamasin'i'n' H tan g'a'rezligi.

Magnitleniw iymekligi 4 tu'rli xarakterli ushastkag'a iye boladi'. 0-1 ushastkasi' ayi'ri'm ori'n larda defektlerge 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'i'n kishireytiwe ti'ri'si'p o'zlerinin' da'slepki ori'n lari'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'n lari'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 $|\vec{J}|$ shamasi' 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 shaması'ni'n' ma'nisi ferromagnetiktin' ko'lem birliginin' magnit momentinin' en' maksimalı'q ma'nisine ten'.

Endi H ti' H_S den nolge shekem kishireytemiz. Bunday jag'dayda toyı'ni'w kartinası'na sa'ykes keliwshi magnit momentlerinin' jaylasi'wlari' birinshi jaqi'nlasi'wdi' saqlanadi': al is ju'zinde endi domenlerdegi atomlardı'n' magnit momentleri bir biri menen ta'sirlesiwdin' saldarı'nan saqlap turadi'. Sonlıqtan $H = 0$ 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 shaması' H_S ten nolge 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' shaması' nolge 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} vektorları' ha'r qi'yli' boli'p bag'i'tlang'an domenler boladi', biraq ferromagnetiktin' barlı'q magnit momentlerinin' vektorli'q qosi'ndi'si' nolge ten' boladi'. H ti' bunnan keyin u'lkeytsek u'lgi qarma-qarsi' bag'i'tta qaytadan magnitlenedi. $H = -H_S$ bolg'anda $|\vec{J}| = J_S$ toyı'ni'wi' ori'n aladi' (5.13-su'wrettegi 7 noqati').

Eger H shaması'n $-H_S$ 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'rezlikti gisterezis ilmegi dep ataydi'.

8-4 ushastka boyı'nsha 4 noqati'na jetpey 9 noqati'na shekem qozg'ali'w mu'mkin. 9 noqati'ndag'i' maydandi' H_m arqali' belgileymiz. 9 noqati'nan H maydandi' H_m shaması'nan $-H_m$ shaması'na shekem kishireytemiz. Bunday jag'dayda magnetiktin' hali'n beretug'i'n 9 noqati' 10 noqati'na o'tedi. H shaması'n belgili tu'rde o'zgertiw arqali' principinde gisterezis ilmeginin' ishindegi qa'legen noqatqa bari'w mu'mkin. H shaması'n H_m shaması'nan $-H_m$ shaması'na shekem ciklli'q tu'rde o'zgertsek dara jag'daydag'i' gisterezis ilmegi dep atalatug'i'n gisterezis ilmegi ali'nadi'. Bul ilmektegi maksimalı'q maydan H_m boli'p tabi'ladi'. Dara jag'daydag'i' gisterezis ilmeginin' ushlari' magnitleniw iymekliginin' boyı'nda jaylasadi'.

Ha'r qi'yli' du'zilislerde $H_m = H_\mu$ ten'ligi ori'nlanatug'i'n qayta magnitleniw din' dara ciklleri qollani'ladi'. Bul ten'likte H_μ arqali' maksimalı'q sin'irgishliq μ maydani' belgilengen. μ din' shaması' maksimalı'q bolg'anda B maydani'n ku'sheytiwde ferromagnetik effektivli tu'rde paydalani'ladi'.

$H - B$ koordinataları'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'rsetiwig'e 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' ishindegi en' a'hmiyetlileri koercitivlik ku'shinin' shaması' 10^{-1} A/m shaması'nan 10^6 A/m shaması'na shekemgi materiallar boli'p tabi'ladi'. 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 qattı' materiallar) qollani'ladi'..

Magnitlik jaqtan jumsaq materiallar kishi magnit maydanları'nda qaytadan magnitlenetug'i'n du'zilislerde qollani'ladi'. Olar: magnit jazi'wlardi' oqi'ytug'i'n magnit maydani'ni'n' datshikleri, transformatorlardı'n' serdeshnikleri ha'm basqalar. Bunday maqsetlerde μ shaması' u'lken, al H_C tin' shaması' ja'ne gisterezis ilmeginin' maydani' kishi materiallar kerek. Bunday materiallar ushi'n qaytadan magnitlegende domenlik diywallardi'n' qozg'ali'wi'n maksimal tu'rde jen'illestiriw, magnitlik anizotropiya menen magnitostrikciyanı'n' ta'sirin kishireytiw talap etiledi. Buni'n' ushi'n quymalardag'i' domenlik diywallardi'n' qozg'ali'si'na kesent jasaytug'i'n defektlerdin' sani'n azayti'w,

magnitlik anizotropiyasi' menen magnitostrikciyasi' a'zzi quymalardi' paydalani'w kerek. O'zgermeli magnit maydanlari'nda magnitlik jaqtan jumsaq materiallardı' 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 talaplarg'a ha'zirgi zamanda ken' tu'rde paydalani'p ati'rg'an materiallar juwap beredi. Olar haqqi'ndag'i' mag'li'wmatlar to'mendegi kestede 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 waqi'tlari' magnitlik jaqtan jumsaq material retinde mu'mkinshiligi bolg'ani'nsha jaqsi' tazalang'an temirdi paydalandi'. Temirdin' tazali'g'i' defektlerdin' koncentraciyasi'ni'n' kemeyiwine ali'p keldi. Bunnan keyin kristallitlerdin' o'lshemlerin u'lkeytiwge ali'p keletug'i'n qosı'mtalardi' tapti' (kristallitlerdin' u'lkeyiwi defektlerdin' koncentraciyaları'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 magnitostrikciyani'n' mu'mkin bolg'an minimalli'q parametrlerine iye quymalardi' saylap aldi'. Bul μ shaması'ni'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) materiallardı' paydalani'w boli'p tabi'ldi'. Bunday materialarda magnitlik anizotropiya joqari'da atlari' atalg'an materiallardı'n' magnitlik anizotropiyasi'nan da kishi. Usi'ni'n' menen bir qatarda bunday materiallardı'n' sali'sti'rmali' qarsi'li'g'i' a'dewir u'lken. Sebebi bunday materiallardag'i' atomlardı'n' ta'rtipsiz jaylasi'wlari' elektronlardı'n' bag'i'tlang'an qozg'ali'slari'na kesent jasaydi'.

Joqari'da atap o'tilgen magnitlik jaqtan jumsaq materiallardı'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 materiallardı' 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 shamalari' kishi, magnitlik jaqtan jumsaq metal materialarg'a sali'sti'rg'anda a'dewir mort.

Magnitlik jaqtan qatti' materiallar u'lken H_C shaması'na iye boli'w menen bir qatarda to'mendegidey u'lken shamalarg'a 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' maksimalli'g'i'. Bunday shama H maydani'nda jaylasqan bir birlilik ko'lemge iye magnittin' maksimalli'q aylanbali' momentin juwi'q tu'rde ani'qlaydi'. Joqari'da atlari' atalg'an parametrlerdin' stabilligi menen olardi'n' qanaatlandi'rarli'qtay bekkemligi menen plastiklige iye boli'w maqsetke muwapi'q keledi.

Ken' tarqalg'an magnitlik jaqtan qatti' materiallar ha'm olardi'n' magnitlik qa'siyetleri to'mendegi kestede berilgen:

Materiallar	H_C , kA/m	B_r , Tl	$(BH)_m$, kDj/m ³
$Fe - Nd - B$	1000-1200	1,2-1,4	600-800
$Sm - Co$	1200-1500	1,0-1,1	400-600
$Fe - Co - Ni - Al$	50-120	1,0-1,2	40-60
$Fe - Cr - Co$	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 testlerdin' variantlari'

1. Kristallar ushi'n to'mendegidey simmetriya ko'sherinin' boli'wi' mu'mkin emes.
A) 1-ta'rtip, B) 2-ta'rtipli, V) 5-ta'rtipli, g) 6-ta'rtipli.
2. Translyaciyalı'q gruppasi' beriw ushi'n nelerdi ko'rsetiw kerek?
A) simmetriya ko'sherlerinin' sani'n, B) simmetriya tegisliklerin, V) translyaciyanı'n' bazislik vektorlari'.
- 3) Ko'rsetilgen simmetriya elementlerinin' qaysi'si' simmetriyanı'n' noqatli'q gruppasi'na kireti?
A) simmetriya ko'sherleri, B) inversiya ko'sheri, V) translyaciya vektorlari', G) simmetriya tegislikleri.
- 4) Bazis mi'nani' ta'riyipleydi:
A) simmetriyanı'n' noqatli'q gruppasi'n, B) translyaciyalı'q gruppasi', V) noqatli'q ha'm translyaciyalı'q gruppalardi'.
- 5) Qaptalda oraylsqan pa'njereni ta'riyiplew 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' atomlardı' tutasti'ra ala ma?
A) Tutasti'radi', B) Tutasti'rmaydi'.
- 7) Elementar quti'ni' strukturalı'q birliklerdin' sani' ta'riyipley 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) translyaciyalı'q simmetriyani'n' bar ekenligi, v) atomlardi'n' massasi'ni'n' shekli ekenligi.
 15. Eynshteyn teoriyası' 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 teoriyası'n, b) Debay teoriyası'n, v) Dyulong-Pti ni'zami'n.
 17. P tipindegi 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) jaqtı'lı'q energiyası'ni'n' kvanti', b) ji'lli'li'q qozg'ali'si'ni'n' energiyası'ni'n' kvanti', v) elektronni'n' energiyası'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' sebebinen, 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 sistemasi'ni'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-mexanikalı'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. Energiyalı'q hallardi'n' energiyalar boyi'nsha bo'listiriliw funkciyasi' degenimiz:

a) energiyalar ken'isligindegi hallar ti'g'i'zli'g'i',

b) energiyalar intervali' dE intervali'ndag'i' energiyali'q hallardi'n' sani',

v) E menen E+dE arasi'ndag'i' 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' kombinaciysi'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'tkizgishlige qatnasadi':

A) elektronlar, B) tesikler, V) ionlasqan donorlar, G) ionlasti'ri'lg'an akceptorlar.

33. Kremniy ushi'n u'shinsi gruppasi'n' elementleri:

A) donorlar, B) akceptorlar 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' koncentraciyalari' 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' koncentraciyalari' birdey. U'lgilerdin' qaysi'si' an' joqari' tawsil'i'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'nhan 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' zaryadlardı'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) elektronlardı'n' bir biri menen soqli'g'i'si'wi'nan, V) elektronlardı'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) dielekriklerde, V) metallarda.
50. Menshikli o'tkizgishlik oblasti'nda o'tkizgishliktin' 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. Prlyarizaciyanı'n' qaysı' tu'ri en' a'stelik penen ju'redi?
 A) elektronlı'q, B) ionlı'q, V) dipollik.
52. Polyarizaciyanı'n' qaysı' tu'ri temperaturadan en' ku'shli g'a'rezli?
 A) elektronlı'q, B) ionlı'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) poliarizaciyanı'n' a'stelik penen o'tetug'i'n tu'rlerinin' bar ekenligi menen.
54. Diamagnitlik qa'siyetke barlı'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) jaqtılli'q energiyasi'ni'n' kvanti', B) pa'njerinin' 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' elektronlardı'n' spinlik momentleri menen, V) zonadag'i' elektronlardı'n' orbitali'q ha'm spinlik momentleri menen.
58. Zatlardı'n' barlı'g'i' da magnitlik qa'siyetlerge iye me?
 A) awa, B) paramagnetiklerden basqaları'ni'n' barlı'g'i', G) ferritler menen ferromagnetiklerden basqaları'ni'n' barlı'g'i'.
59. Spontanlı'q magnitlengenliktin' joq ekenligi zattyan' ferromagnetik emes ekenliginin' da'lili bola ala ma?
 A) awa, B) joq.
60. To'mendegi klasslardı'n' kaysı'si' domenlik strukturag'a iye bola aladi'?
 A) ferrimagnetikler, B) paramagnetikler, V) diamagnetikler, G) segnetoelektrler.
61. Yarı'm o'tkizgishtin' menshikli juti'w jolag'i'ni'n' ki'zi'l shegarası' mi'nadan g'a'rezli:
 A) qadag'an etilgen zonani'n' ken'ligen, B) donorlardı'n' ionizaciya energiyasi'nan, V) elektronlardı'n' koncentraciyasi'nan.
62. Spektrdegi 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 akceptorlardı'n' ionizaciya energiyasi'n, V) Fermi qa'ddinin' iyelegen orni'n.
63. Rekombinaciyanı'n' mexanizmlerinin' qaysı'si' en' itimal:
 A) zonalar aralı'q, B) kombinaciyalı'q tutki'shlardi'n' qatnasi'wi' menen ju'zege keletug'i'n rekombinaciya.
64. Zaryad tasi'wshi'ni'n' rekombinaciysi'nda bo'linip shi'g'atug'i'n energiya qadag'an etilgen zoni'nan' qali'n'li'gi'n o'zgerte ala ma? A) awa, B) joq.
65. Eksiton degenimiz
 A) o'tkizgishlik zonası'ndag'i' elektron-tesik jubi', B) valentli zonadag'i' elektron-tesik jubi'.
66. Eksitonlı'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. Elektronlı'q juti'w mi'na jag'dayda a'hmiyetli

- A) metallardi'n' B) yari'm o'tkizgishlerdin', V) dielektriklerdin',
 68. Yari'm o'tkizgishler 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' lyuminescenciyasi' 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'tkizgishliktin' shaması' ha'm xarakteri boyi'nsha qattı' denelerdin' klassifikasiyası'.
2. Qattı' denelerdin' ji'lli'li'q qa'siyetleri. Qattı' denelerdin' ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'. Dyulong ha'm Pti ni'zami'.
3. Qattı' 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. Qattı' denelerdi poliarizaciyalı'q mikroskop penen izertlew.

2-variant

1. Qattı' deneler fizikasi'ni'n' kristallografiya, yari'm o'tkizgishler fizikasi' menen baylani'si'.
2. Kubli'q pa'njereler ushi'n (a'piwayi', qaptaldan oraylasqan ha'm ko'lemde oraylasqan) keri pa'njereni du'ziw ha'm Brillyuen zonalari'n belgilew.
3. Qattı' 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'lli'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. Qattı' denelerdin' atomli'q-kristalli'q quri'li'si'n izertlew usi'llari'. Rentgenstrukturalı'q analiz.

3-variant

1. Kristalli'q ha'm amorf qattı' denelerdin' ha'zirgi zaman ilimi menen texnikasi'ndag'i' a'hmiyeti.
2. Qattı' denelerdegi atomlar ha'm molekulalar arasi'ndag'i' baylani'slar. Ionli' baylani's (Geteropolyar baylani's).
3. Qattı' denelerdin' mexanikali'q qa'siyetleri. Serpimli ha'm elastik deformaciylar.
4. Qattı' 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 qilip 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 qatt'i' deneler. Kristalli'q ha'm amorf denelerdin' bir birinen ayi'rmashi'lli'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. Qatt'i' denelerdegi atomlar ha'm molekulalar arasi'ndag'i' baylani'slar. Van-Der-Vaals baylani'si'.

4. Qatt'i' 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'njererin' tu'yinleri ha'm vektorlari'. Singoniyalar, kristallografiyali'q kategoriylar. Strukturali'q kristallografiyani'n' tiykarg'i' ten'lemeleri.

2. Qatt'i' denelerdegi atomlar ha'm molekulalar arasi'ndag'i' baylani'slar. Metalli'q baylani's.

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. Terbeliw rentgenogrammalari'n tu'siriw ja'rdeinde 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 toqtı' 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'biyatı' ha'm oni'n' temperaturag'a g'a'rezligi.

4. Qatt'i' 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 gorizontal 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 deformaciylar menen kernewlerdin' ekinshi ta'rтиpli simmetriyali' tenzordi'n' ja'rdeinde ta'ripleniwi.

3. Menshikli ha'm qosimtali' yari'm o'tkizgishler. Ha'r qi'lyi' yari'm o'tkizgishlerdegi elektronlar menen tesikleshelerdin' koncentraciyalari'.

4. Qattı' 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'lzi'n.

8-variant

1. Simmetriyasi'ni'n' tipleri boyi'nsha kristallardi' klassifikaciyalaw.

2. Qattı' denelerdin' ji'lli'li'q qa'siyetlerinin' kvantli'q teoriyası'. Eynshteyn ha'm de Broyl modelleri.

3. Qattı' denelerdin' energiyali'q zonali'q quri'li'si'. Bir o'lshemli modeller. Derlik erkin elektronlar jaqi'nlası'wi'.

4. Serpimli modulleri belgili bolg'an kubli'q kristallardag'i' belgili kristallografiyalı'q bag'i't boyi'nsha tarqalatug'i'n ha'm berilgen polyarizaciadag'i' serpimli tolq'i 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' polyarizaciysi'. Polyarizaciya tenzori'.

4. Qattı' 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 gorizontal halda tartılg'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 materiali'ni'n' Yung modulinin' shamasi' ani'qlansi'n.

10-variant

1. Keri pa'njerinin' ani'qlaması'. Tuwri' ha'm keri pa'njereler arasi'ndag'i' baylani's. Keri pa'njere vektorlari'ni'n' qa'siyetleri.

2. Qattı' denelerdegi 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'njerinin' kishi terbelisleri. A'piwayi' kubli'q pa'njerinin' kishi terbelisleri.

4. Qattı' denelerdin' optikali'q qa'siyetleri. Optikali'q indikatrisa. Qos nur si'ndi'ri'w.

5. Katti'li'qları' 0,3 kN/m ha'm 0,8 kN/m bolg'an eki prujina izbe-iz jalq'andi'. Eger prujina 1,5 sm ge deformacialang'an bolsa, birinshi prujinani'n' absolyut deformaciysi'n ani'qlan'ı'z.

11-variant

1. Kristallografiyalı'q pa'njere tegislikleri ha'm Miller indeksleri. Strukturalı'q kristallografiyanı'n' tiykarg'i' ten'lemeleri.

2. Kristallardag'i' rentgen nurlari'ni'n' difrakciysi' ha'm keri pa'njere.

3. Kristallardi'n' $j'il'i'li'q$ $si'yi'mli'g'i'$. Debay temperaturasi'. Kristallar ushi'n $C_p - Cv$ ayi'rmasi'n tabi'w.

4. Dielektriklerdin' qa'siyetleri. Dielektriklik sin'irgishlik ha'm polyarizaciyalani'wshi'li'q. Elektronli'q polyarizaciyalani'wshi'li'q.

5. Qatti'li'qlari' 2 kN/m ha'm 6 kN/m bolg'an prujinalardi'n' izbe-iz ha'm parallel jalga'ng'andag'i' qatti'li'qlari' ani'qlansi'n.

12-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' denelerdegi fononlar ha'm pa'njererin' 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 sm^2 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 deformaciylar. Serpimli deformaciyalardi' analizlew.

3. Qatti' denelerdegi diamagnetizm menen paramagnetizm. Paramagnetizmnin' kvantli'q teoriyası'.

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?

14-variant

1. Kovalentlik baylani's: almasi'w ta'sirlesiwi, 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' $j'il'i'li'q$ o'tkizgishligi. Pa'njererin' $j'il'i'li'q$ qarsi'li'g'i'. Normal processler ha'm ali'p o'tiw processleri.

4. Qatti' denelerdegi 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. Ferromagnitlerdin' magnitlik quri'li'si'.

4. Qattı' denelerdegi fotoo'tkizgishlik. Ken'isliklegi zaryad yamasa polyarizaciyalı'q effektler.

5. Qattı'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?

16-variant

1. Qattı' denelerdegi metalli'q baylani's.
2. Segnetoelektriklerdin', piroelektriklerdin' ha'm pezolektrlerdin' fizikali'q qa'siyetleri.
3. Eki atomli' si'zi'qli' shi'nji'rdi'n' kishi terbelisleri. Terbelislerdin' akustikali'q ha'm optikali'q tarmaqları.
4. Qattı' denelerdin' magnitlik qa'siyetleri. Alması'w ha'm relyativistlik ta'sir etisiwler. Paramagnetikler, diamagnetikler, ferromagnetikler, antiferromagnetikler, ferrimagnetikler.
5. Prujinani'n' joqarg'i' ushi'nda turg'an kishkene taqta u'stine qoyılg'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'?

17-variant

1. Qattı' deneler pa'njeresindegi atomlardı'n' terbelisleri.
2. Qattı' denelerdin' atomli'q-kristalli'q strukturasi'n izertlew usi'llari'. Rentgenografiyadi'g'i' polixromatikalı'q Laue usi'li'.
3. Qattı' denelerdegi ekinshi a'wlad fazali'q o'tiwlerindegi kristalli'q pa'njere simmetriyası'nı'n' o'zgerisleri.
4. Piroelektriklik kristallar ha'm olardi'n' kristalli'q quri'li'si'ni'n' o'zgeshelikleri. Orayg'a karata simmetriyali' kristallarda piroelektriklik qa'siettin' bolmaytug'ni'li'gi'n da'lilew.
5. Massasi' 10 g bolg'an oq zatvori'ni'n' massasi' 200 g bolg'an mi'lti'qtı'n' stvoli'ni'n' awzi'nan 300 m/s tezlik penen ushi'p shi'g'adi'. Mi'lti'qtı'n' zatvori' stvolg'a qattı'li'g'i' 25 kN/m bolg'an prujina menen qi'si'ladi'. Atı'wdan keyin zatvor qanday aralı'qqa ji'lji'ydi'?

18-variant

1. Kyuri ha'm Neyman principleri. Simmetriyani'n' sheklik toparlari'. Kristallardi'n' fizikali'q qa'siyetlerinin' simmetriyası' menen noqatlı'q simmetriyası' arası'ndag'i' baylani's.
2. Bir ha'm eki atomli' pa'njerelerdin' terbelisleri spektri. Akustikali'q ha'm optikali'q modalar.
3. Qattı' denelerdin' elektr o'tkizgishligi. Metallar menen yarı'm o'tkizgishlerdin' elektr o'tkizgishlikleri arası'ndag'i' aysi'rma.
4. Qattı' denelerdin' optikali'q qa'siyetleri. Optikali'q aktiv kristallar.
5. Qattı'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 deformasiyası' 3 sm ge ten' bolatug'i'nday etip sozi'ladi'. Prujinalardi' sozi'wda atqari'lg'an jumi's esaplansi'n.

19-variant

1. Kristalli'q ha'm amorf qattı' denelerdin' ha'zirgi zaman ilimi menen texnikasi'ndag'i' a'hmiyeti.
2. Qattı' denelerdegi atomlar ha'm molekulalar arası'ndag'i' baylani'slar. Ionlı' baylani's (Geteropolyar baylani's).

3. Kristaldi'n' laegrammasi' ha'm epigrammasi' tiykari'nda oni'n' kristallografiyali'q bag'i'tlari'ni'n' orientaciyalari'n ani'qlaw.

4. Qatt'i' 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 qilip 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.

20-variant

1. Qristallardi'n' strukturasi'. Tuwri' ha'm keri pa'njereler. Elementar cuti'sha. Miller indeksleri. jaylasti'ri'w ti'g'i'zli'g'i'.

2. Qatt'i' denelerdegi atomlar ha'm molekulalar arasi'ndag'i' baylani'slar. Kovalentli baylani's (Gomeopolyar baylani's).

3. Qatt'i' denelerdin' mexanikali'q qa'siyetleri. Serpimli ha'm elastik deformaciylar.

4. Diametri 2 sm, uzi'nli'g'i' 60 m bolg'an qorg'asi'n joqarg'i' ushi'nan qozg'almaytug'i'nday qilip 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. Qatt'i' denelerdin' atomli'q-kristalli'q quri'li'si'n izertlew usi'llari'. Rentgenstrukturali'q analiz.

21-varinat

1. Qatt'i' denelerdin' ji'lli'li'q qa'siyetleri. Qatt'i' denelerdin' ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'. Dyulong ha'm Pti ni'zami'.

2. Qatt'i' deneler fizikasi'ni'n' kristallografiya, yari'm o'tkizgishler fizikasi' menen baylani'si'.

3. Qatt'i' 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. Qatt'i' denelerdi polyarizaciyalı'q mikroskop penen izertlew.

22-variant

1. Kristallografiyali'q pa'renje. Pa'njerenin' tu'yinleri ha'm vektorlari'. Singoniyalar, kristallografiyali'q kategoriylar.

2. Qatt'i' deneler fizikasi'ni'n' kristallografiya, yari'm o'tkizgishler fizikasi' menen baylani'si'.

3. Qatt'i' denelerdin' mexanikali'q qa'siyetleri. Serpimli ha'm elastik deformaciylar.

4. Qatt'i' 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'rdeinde kristalli'q pa'njere turaqlilari'n esaplaw.

23-variant

1. Fizikali'q qa'siyetleri boyi'nsha, soni'n' ishinde elektr o'tkizgishliktin' shaması' ha'm xarakteri boyi'nsha qatt'i' denelerdin' klassifikasiyası'.

2. Kubli'q pa'njereler ushi'n (a'piwayi', qaptaldan oraylasqan ha'm ko'lemde oraylasqan) keri 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. Qatt'i 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 qatt'i deneler. Kristalli'q ha'm amorf denelerdin' bir birinen ayi'rmashi'lli'g'i'. Kristalli'q quri'li's.

2. Qatt'i denelerdegi atomlar ha'm molekulalar arasi'ndag'i' baylani'slar. Van-der-Vaals ha'm kovalentlik baylani'sli'r.

3. Qatt'i denelerdin' mexanikali'q qa'siyetleri. Serpimli ha'm elastik deformaciylar.

4. Kristallardag'i' mikro - i makroskopiyali'q elektr maydanlari'. Lokalli'q maydan. Qatt'i denelerdin' polyarizaciysi'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'lshemli jag'day ushi'n uli'wmalasti'ri'w.

2. Garmonikali'q oscillyator haqqi'ndag'i' elementar kvantmexanikali'q ma'sele. Kristalli'q pa'njererenin' terbelislerinin' energiyalari'ni'n' kvantlani'wi'. Plank tarqali'wi'.

3. Pa'njere atomlari'ni'n' terbelislerindegi angarmonizm. Ji'lli'li'q ken'eyiwi. Qatt'i denelerdin' ji'lli'li'q ken'eyiw koefficienti.

4. Fononlardı'n' o'z-ara ta'sir etisiwi. Normal processler menen asi'ri'p o'tkiziw processleri. Ji'lli'li'q o'tkizigishlik.

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. Qatt'i denelerdegi fazali'q o'tiwler. Birinshi ha'm ekinshi a'wlad fazali'q o'tiwleri.

2. Kristallofizikadag'i' Kyuri ha'm Neyman principleri. Bul principlerdi qollani'w.

3. Garmonikali'q oscillyator haqqi'ndag'i' elementar kvantmexanikali'q ma'sele. Kristalli'q pa'njererenin' terbelislerinin' energiyalari'ni'n' kvantlani'wi'. Plank tarqali'wi'.

4. Ha'r qanday singoniyali' kristallardag'i' kristallografiyali'q 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. Qatt'i denelerdegi baylani's energiyasi'. Metallardag'i' baylani's energiyasi'.

3. Metallardag'i' erkin elektronlar. Qatt'i denelerdin' zonal'i'q strukturas'i'.

4. Piroeffekttin' ta'biyati'. Piroeffekttin' 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 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.

28-variant

1. Kristallardi'n' serpimplilik 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.

29-variant

1. Simmetriya haqqi'ndag'i' tu'sinik. Simmetriya elementleri. Kristallardi'n' translyaciyalı'q simmetriyasi' ha'm Brillyuen zonalari'.
2. Ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'ni'n' kvant teoriyası'. 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.

30-variant

1. Kovalentlik baylani's: almasi'w ta'sirlesiwi, 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 qatt'i'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 mm² 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'njerinin' ani'qlaması'. Tuwri' ha'm keri pa'njereler arasi'ndag'i' baylani's. Keri pa'hjere vektorlari'ni'n' qa'siyetleri.
2. Qatti' denelerdegi 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'njerinin' kishi terbelisleri. A'piwayi' kubli'q pa'njerinin' kishi terbelisleri.
4. Qatti' denelerdin' optikali'q qa'siyetleri. Optikali'q indikatrisa. 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 deformaciysi'n ani'qlan'.

32 variant

1. Kristallografiyali'q pa'njere tegislikleri ha'm Miller indeksleri.
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 polyarizaciyalani'wshi'li'q. Elektronli'q polyarizaciyalani'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' qatt'i'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. Qatt'i' denelerdegi fononlar ha'm pa'njererin' 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. Qatt'i' denelerdegi diamagnetizm menen paramagnetizm. Paramagnetizmnin' kvantli'q teoriyası'.
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?

35-variant

1. Kovalentlik baylani's: almasi'w ta'sirlesowi, baylani'slardı'n' bag'i'tlang'anli'g'i' ha'm toyi'ni'wshi'lil'g'i'.
2. To'rtinshi rangali' serpimli berilgishlik ha'm serpimli qatt'i'li'q tenzorlari'.
3. Qatt'i' denelerdin' ji'lli'li'q o'tkizgishligi. Pa'njererin' ji'lli'li'q qarsi'li'g'i'. Normal processler ha'm ali'p o'tiw processleri.
4. Qatt'i' denelerdegi energiya zonalari' (energetikali'q zonalar). Energiya zonalari'ni'n' payda boli'wi'.
5. Qatt'i'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. Qatt'i' denelerdegi foto'o'tkizgishlik. Ken'isliklegi zaryad yamasa polyarizaciyalı'q effektler.
5. Qatt'i'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. Qatt'i' denelerdegi metalli'q baylani's.
2. Segnetoelektriklerdin', piroelektriklerdin' ha'm pezoelektrlerdin' 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. Qatt'i' 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. Qatt'i' deneler pa'njeresindegi atomlardı'n' terbelisleri.
2. Qatt'i' denelerdin' atomli'q-kristalli'q strukturasi'n izertlew usi'llari'. Rentgenografiyadi'g'i' polixromatikali'q Laue usi'li'.
3. Qatt'i' denelerdegi 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 simmetriyali' kristallarda piroelektriklik qa'siettin' bolmaytug'ni'li'gi'n da'lillew.
5. Massasi' 10 g bolg'an oq zatvori'ni'n' massasi' 200 g bolg'an mi'lti'qtin' stvoli'ni'n' awzi'nan 300 m/s tezlik penen ushi'p shi'g'adi'. Mi'lti'qtin' zatvori' stvolg'a qatt'i'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 principleri. 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. Qatt'i' denelerdin' elektr o'tkizgishligi. Metallar menen yari'm o'tkizgishlerdin' elektr o'tkizgishlikleri arasi'ndag'i' ayi'rma.
4. Qatt'i' denelerdin' optikali'q qa'siyetleri. Optikali'q aktiv kristallar.
5. Qatt'i'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 deformaciyasi' 3 sm ge ten' bolatug'i'nday etip sozi'ladi'. Prujinalardi' sozi'wda atqari'lg'an jumi's esaplansi'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' kristallografiyali'q 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 qili'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 cuti'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 deformaciylar.
4. Diametri 2 sm, uzi'nli'g'i' 60 m bolg'an qorg'asi'n joqarg'i' ushi'nan qozg'almaytug'i'nday qili'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 polyarizaciyalı'q mikroskop penen izertlew.

43-variant

1. Kristallografiyali'q pa'renje. Pa'njerenin' tu'yinleri ha'm vektorlari'. Kristallografiyali'q sistemalar, kategoriylar, 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 deformaciylar.
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'rdeinde kristalli'q pa'njere turaqlı'lari'n esaplaw.

44-variant

1. Fizikali'q qa'siyetleri boyi'nsha, soni'n' ishinde elektr o'tkizgishliktin' shaması' ha'm xarakteri boyi'nsha qattı' denelerdin' klassifikasiyası'.
2. Kubli'q pa'njereler ushi'n (a'piwayı', qaptaldan oraylasqan ha'm ko'lemde oraylasqan) keri 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. Qattı' denelerdin' elektrlik o'tkizgishligi. Metallar ha'm yarı'm o'tkizgishler.
5. Qorg'asi'n si'm joqarı' 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 shegarası' 12,3 MPa.

45-variant

1. Kristalli'q ha'm amorfli'q qattı' deneler. Kristalli'q ha'm amorf denelerdin' bir birinen ayı'rmashi'lli'g'i'. Kristalli'q quri'li's.
2. Qattı' denelerdegi atomlar ha'm molekulalar arasi'ndag'i' baylani'slar. Van-der-Vaals ha'm kovalentlik baylani'sli'r.
3. Qattı' denelerdin' mexanikali'q qa'siyetleri. Serpimli ha'm elastik deformaciyalar.
4. Kristallardag'i' mikro - i makroskopiyali'q elektr maydanları'. Lokalli'q maydan. Qattı' denelerdin' polyarizaciyası'ni'n' mexanizmleri. Dielektriklik sin'irgishlik.
5. Diametri 1 mm bolg'an polat si'mni'n' bekkemlik shegarası' 294 MPa dan artpastan ko'bi menen qansha mug'dardag'i' ju'kke shi'dawi' mu'mkin. Usı' 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'lshemli jag'day ushi'n uli'wmalasti'ri'w.
2. Garmonikali'q oscillyator haqqı'ndag'i' elementar kvantmexanikali'q ma'sele. Kristalli'q pa'njererin' terbelislerinin' energiyaları'ni'n' kvantlani'wi'. Plank tarqali'wi'.
3. Pa'njere atomları'ni'n' terbelislerindegi angarmonizm. Ji'lli'li'q ken'eyiwi. Qattı' denelerdin' ji'lli'li'q ken'eyiw koefficienti.
4. Fononlardı'n' o'z-ara ta'sir etisiwi. Normal processler menen asi'ri'p o'tkiziw processleri. Ji'lli'li'q o'tkizigishlik.
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. Qattı' 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 principleri. Bul principlerdi ayqi'n mi'sallar ushi'n qollani'w.
3. Garmonikali'q oscillyator haqqı'ndag'i' elementar kvantmexanikali'q ma'sele. Kristalli'q pa'njererin' terbelisleri energiyaları'ni'n' kvantlani'wi'. Plank tarqali'wi'.
4. Ha'r qanday singoniyali' kristallardag'i' kristallografiyalı'q tegislikler arasi'ndag'i' qashi'qliqlar. Strukturalı'q kristallografiyanı'n' tiykarg'i' ten'lemeleri.
5. Uzi'nli'g'i' 2 m ha'm ko'ldenen' kese-kesim maydani' 2 sm² bolg'an sterjen 10 kN ku'sh penen sozi'lmaqta. Sozi'lg'an sterjennin' potencial energiyasi' ha'm energiyani'n' ko'lemlilik ti'g'i'zli'g'i' tabi'lsi'n.

48-variant

1. Guk ni'zami'. Yung moduli. Serpimlilik moduli tenzori'.
2. Qattı' denelerdegi baylani's energiyasi'. Metallardag'i' baylani's energiyasi'.
3. Metallardag'i' erkin elektronlar. Qattı' denelerdin' zonalı'q strukturası'.
4. Piroeffekttin' ta'biyati'. Piroeffekttin' 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 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 tenzorları', olardi'n' qa'siyetleri.
2. Qattı' denelerdegi baylani's energiyasi'. Molekulalar aralı'q kristallardi'n' baylani's energiyasi'.
3. Qattı' denelerdegi baylani's energiyasi'. Ionlı'q ha'm kovalentlik kristallardag'i' baylani's energiyaları'.
4. Kristallardi'n' strukturası' ha'm kristallardag'i' rentgen nurları'ni'n' difrakciyası'. Vulf-Bregg ten'lemesi.
5. Qattı'li'qları' 1 kN/m ha'm 3kN/m bolg'an eki prujina parallel jalg'ang'an. Usı' sistemani'n' absolyut deformaciyası' 5 sm bolg'an haldag'i' potencial energiyası' ani'qlansi'n.

50-variant

1. Simmetriya haqqı'ndag'i' tu'sinik. Simmetriya elementleri. Kristallardi'n' translyaciyalı'q simmetriyası' ha'm Brillyuen zonaları'.
2. Ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'ni'n' kvant teoriyası'. Eynshteyn ha'm Debay modelleri.
3. Dielektriklerdin' elektrlik qa'siyetleri. Polyarizaciya. Polyarizaciya vektorı'.
4. Yarı'm o'tkizgishlerdin' zonalı'q strukturası'. Yarı'm o'tkizgishlerdegi menshiklik, elektronlı'q ha'm tesikshelik o'tkizgishlik.
5. Polat sterjen sozi'lg'anda sterjen materialı'ndag'i' mexanikali'q kernew 300 MPa bolg'an. Sozi'lg'an sterjen potencial energiyası'ni'n' ko'lemlik ti'g'i'zli'g'i' tabi'lsi'n.

Qosi'msha sorawlar

1. Kristalli'q ha'm amorf deneler. Qattı' denelerdin' simmetriyası'.
2. Simmetriya operaciyaları': translyaciyalı'q simmetriya, bazis, elementar qutı'sha, pa'njere simmetriyası', tegis pa'njereler ha'm olardi'n' simmetriyası'.
3. Eki o'lshemli noqatlı'q topalar ha'm ken'isliklik gruppalar.
4. U'sh o'lshemli kristalli'q sistemalar, noqatlı'q gruppalar ha'm ken'isliklik gruppalar.
5. Keri pa'njere. Keri pa'njere vektorları'. Difrakciya sha'rti. Brillyuen zonaları'.
6. Van-der-Vaals ta'sirlesivi.
7. Ionlı'q baylani's, onı'n' ju'zege keliwi ha'm xarakteristikaları'. Madelung turaqli'si'. Ionlı'q kristallardi'n' strukturası'na mi'sallar.
8. Kovalentlik baylani's, onı'n' ju'zege keliwi, elektronlar alması'wdı'n' ma'nisi.
9. Vodorodlı'q baylani's.
10. Metalli'q baylani's. Elektronlardı'n' kollektivlesiwi ha'm metaldi'n' modeli. Metalli'q baylani'sti'n' izotroplı'g'i'.

11. Miller indeksleri ha'm kristallografiyali'q bag'i'tlar. Elementar quti'shadag'i' noqatlardi'n' iyelep turg'an ori'nları'n ani'qlaw. A'piwayi' kristalli'q strukturalar (xlorli' natriyin', xlorli' ceziyin' strukturaları', ti'g'i'z etip jaylastı'ri'lğ'an geksagonalli'q struktura).

12. Awi'si'w ha'm ta'rtiplesiw tiplerindegi strukturalı'q fazalı'q o'tiwler. Fazalı'q o'tiwlerdegi simmetriyani'n' o'zgerisleri. Ta'rtip parametri. I ha'm II a'wlad fazalı'q o'tiwleri. Landaudi'n' fenomenologiyali'q teoriyası.

13. Difrakciya izertlew usi'li' si'patı'nda. Nurlanı'wdı'n' u'sh tipin paydalani'w. Vulf-Breggtin' difrakciya sha'rtı. Shashi'rawdi'n' atomlı'q faktori'. Strukturalı'q faktor.

14. Kristallardi'n' strukturası'n' rentgenografiyali'q izertlewdin' eksperimentalli'q usı'lları': Laue usı'li', kristallardi'n' aylanı'wi' usı'li', untalg'an kristall usı'li' (Debay - Sherrer usı'li'). Amorf denelerdegi difrakciya.

15. Noqatlı'q defektler, olardı'n' payda boli'wi' ha'm diffuziyası'. Vakansiyalar ha'm tu'yinler arası'ndag'i' atomlar. Frenkel ha'm Shottki defektleri. Ten' salmaqlı'q haldag'i' defektlerdin' ti'g'i'zli'g'i'.

16. Stexiometriya. Dislokaciya. Dislokaciyalardı'n' ti'g'i'zli'g'i'.

17. Mexanikalı'q kernew. Deformaciya. Izotrop deneler ushi'n Guk ni'zami'. Anizotrop qattı' deneler ushi'n Guk ni'zami'. Deformaciya tenzori'.

18. Kristalli'q qattı' denelerdin' elastiklik qa'siyetleri. Mort qı'yraw.

19. Serpimli tolqi'nlar, atomlardı'n' awi'si'wi' ha'm fononlar. Bir atomlı' pa'njerinin' terbelis modaları'. Si'zi'qli' bir atomlı' shi'nji'r.

20. U'sh o'lshemli bir atomlı' kristaldi'n' terbelisleri. Modalar sani', hallardi'n' ti'g'i'zli'g'i'. Bazisi bar pa'njerinin' terbelis spektri.

21. Si'zi'qli' eki atomlı' shi'nji'rди'n' normal terbelisleri. Optikalı'q shaqa. Ko'p atomlı' baziske iye u'sh o'lshemli pa'njere.

22. Ionlı'q polaryazacyyalanı'wshi'li'q. Lokallı'q fononlı'q modalar. Fotonlardı'n' fononlardag'i' shashi'rawı'.

23. Pa'njerinin' energiyasi'n esaplawdi'n' klassikali'q modeli. Eynshteyn modeli.

24. Debay modeli. Debay modelinin' da'lligin joqarı'latı'w. Debay temperaturası'.

25. Pa'njerelik ji'lli'li'q o'tkizgishlik ha'm fononlardı'n' erkin ju'riw joli'ni'n' uzi'nli'g'i'.

26. Angarmonikalı'q effektler. Normal processler ha'm ası'ri'p o'tkeriw processleri (processi' perebrosa). Defektlerge baylani'slı' fononlardı'n' shashi'rawı'.

27. Ha'r qı'ylı' processlerdin' (normal processler menen ası'ri'p o'tkeriw processi) ji'lli'li'q o'tkizgishlikke ta'siri.

28. Metallar menen yarı'm o'tkizgishlerdegi elektronlı'q ji'lli'li'q o'tkizgishlik.

29. Erkin elektronlar ha'm on' zaryadlı' atomlı'q qaldı'qlar (ionlar). Elektronlardı'n' xaotikalı'q ha'm ta'rtiplesken qozg'ali'sları'.

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' jaramsı'zli'g'i'.

32. Metallardi'n' ji'lli'li'q si'ymlı'g'i'. Fermi funkciyasi'. Metallardi'n' elektr o'tkizgishligi. Relaksaciya waqıti'.

33. Elektr qarsı'lı'g'i'ni'n' additivlik ta'biyatı'. Mattisen qaq'i'ydasi'.

34. Xoll effekti. Valentli elektronlardı'n' ji'lli'li'q o'tkizgishligi.

35. Azg'i'nbag'an (vi'rojdenni'y) elektron gazinin' salı'sti'rmali' ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'. Pauli paramagnetizmi.

36. Zommerfeldtin' metallı'q o'tkizgishlik modeli.

37. O'zi menen o'zi kelisilgen (samosoglasovanne pole) maydandag'i' elektronni'n' qozg'ali'sı'. Blox funkciyaları'.

38. Ruqsat etilgen ha'm qadag'an etilgen enerjiya zonaları'. Zonadag'i' qa'ddiler sani'. Metallar ha'm dielektrikler.

39. Fermi betinin' quri'li'si'. Elektronlar, tesiksheler ha'm ashi'q orbitalalar.
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 maydanları'. 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' salmaqlı'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 jaqtı'li'qti'n' ta'siri. Lyuminescenciya.
50. Xoll effekti.
51. Shi'g'i'w jumi'si'. Eki metaldi'n' kontakti'. Potencialardi'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. Kapillyarlı'q qubi'li'slar, menisk.
59. Noqatli'q simmetriya elementleri. A'piwayi' ha'm quramali' elementler.
60. Kristalli'q klasslar. Simmetriyanı'n' noqatli'q gruppasi'.
61. Translyaciyalı'q grupper. A'piwayi' ha'm quramali' pa'njereler.
62. Kristallografiyalı'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 klassifikasiyasi'.
66. Bir o'lshemli a'piwayi' pa'njeredegi terbelisler. Dispersiyali'q qatnas. Brillyuen zonası'.
67. A'piwayi' bir o'lshemli pa'njerenin' jiyiliklerinin' spektri.
68. Bir o'lshemli quramali' pa'njeredegi terbelisler. Optikalı'q ha'm akustikali'q shaqalar.
69. Eynshteyn jaqi'nlasi'wi'ndag'i' qattı' denelerdin' termodinamikalı'q funkciyalari'.
70. Debay jaqi'nlasi'wi'ndag'i' qattı' 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 funkciyalar. Energiya qa'ddileri.
74. 0 K temperaturadag'i' Fermi qa'ddi.
75. Energiyalı'q hallardi'n' energiyalar boyi'nsha tarqali'wi' funkciyasi'.
76. Energiyalı'q qa'ddinin' tolти'ri'li'w itimalli'g'i'. Fermi-Dirak funkciyasi'. Azg'i'ni'w.
77. Elektronlardı'n' energiyalar boyi'nsha tarqali'w funkciyasi'. Metallardi'n' ji'lli'li'q si'yi'mli'g'i'.
78. Metallardi'n' elektr o'tkizgishligi.
79. Qattı' denelerdin' zonali'q modeli. Zonalardi'n' payda boli'wi'. Brillyuen 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-tipindegi yari'm o'tkizgishler. Zaryad tasi'wshi'lardi'n' koncentraciyasi'. Fermi qa'ddinin' orni'.
84. n-tipindegi 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'l denen' 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'. Rekombinaciya mexanizmleri, xarakteristikalar.
89. Kristallardi'n' ren'i. Ren' oraylari'.
90. Ten' salmaqli' emes toq tasi'wshi'lar ha'm olardi'n' tiykarg'i' xarakteristikalari'.
91. Kristallardi'n' jaqtı'li'qtı' 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' xarakteristikalari'.
94. I ha'm II a'wlad (tu'r) asa o'tkizgishler.
93. Asa o'tkizgishlerdin' kritikalı'q parametrleri.
94. Asa o'tkizgishliktin' payda boli'wi'ni'n' fizikali'q mexanizmleri.
95. Asa o'tkizgishlerdin' magnitlik qa'siyetlerinin' makroskopiyali'q qa'siyetleri.
96. Atomlardı'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' xarakteristikalari'.
100. Ferromagnetizmnin' fizikali'q ta'biyati'. Spinlik tolqi'nlar.
101. Ferrimagnetikler. Olardi'n' kristalli'q strukturası' ha'm fizikali'q qa'siyetleri.
102. Antiferromagnetikler. Olardi'n' kristalli'q strukturası' ha'm fizikali'q qa'siyetleri.
103. Statikali'q elektr maydani'ndag'i' dielektrikler. Olardi'n' tiykarg'i' makroskopiyali'q xarakteristikalari'.
104. Dielektriklerdin' polyarizaciysi'ni'n' tu'rleri.
105. Elektronli'q polyarizaciyalani'wshi'li'q.
106. Ionli'q polyarizaciyalani'wshi'li'q.
107. Orientaciysi'q polyarizaciyalani'wshi'li'q.
108. Qattı' denelerdin' dielektriklik sin'irgishligi.
109. O'zgermeli elektr maydani'ndag'i' dielektrikler, olardi'n' tiykarg'i' makroskopiyali'q xarakteristikalari'.
110. Elektromagnit energiyani' rezonansli'q juti'w.
111. Dipollik relaksaciya. Polyar dielektriklerdegi dielektriklik jog'alti'wlar.
112. Spontan polyarizaciya. Piro- ha'm segnetoelektriklerdin' (ferroelektriklerdin') uli'wmali'q xarakteristikasi'.
113. Segnetoelektriklerdin' (ferroelektriklerdin') tiykarg'i' xarakteristikalari'.
114. Pezoelektrikler.
115. Magnitlik qa'siyetlerdin' makroskopiyali'q xarakteristikalari'.