M. Maşaýew
T. Ýusupow

Gaty jisimiň fizikasy

Ýokary okuw mekdepleriniň talyplary üçin okuw gollanmasy

Türkmenistanyň Bilim ministrligi tarapyndan hödürlendi

Aşgabat
2010

Sözbaşy

Türkmenistanyň hormatly Prezidenti Gurbanguly Berdimuhamedow Beýik Galkynyş eýýamynda ýurduň bilim we ylym ulgamyny dünýä derejesine çykarmak, talyplara bilim berlişiniň usulyýetini kämilleşdirmek hem-de täze okuw kitaplaryny, gollanmalaryny taýarlamak işlere uly üns berýär.

Hakykatdanam, häzirki zaman ylymlarynyň we tilsimatlarynyň gazananlaryny ykdysadyýetiň dürli pudaklaryna ornaşdyrmagy başarýan hünärmenleri taýarlamak üçin ýokary okuw mekdepleriniň talyplaryny döwrebap okuw kitaplary we okuw - usuly gollanmalar bilen üpjün etmek esasy meseleleriň biri bolup durýar.

Gaty jisimiň fizikasy umumy nazary dersi hökmünde Magtymguly adyndaky Türkmen döwlet uniwersitetiniň fizika fakultetinde radiofizika we elektronika hünäri boýunça okaýan talyplar üçin öňden bäri geçilýär. Bu seredilýän dersiň häzirki zaman ylmyň we tehnikanyň ösmeginde uly ähmiýete eýe bolandygyny görkezýär.

Mikro- we nanoelektronikada, tejribelikde peýdaly bolan fiziki häsiýetleri özünde jemleýän täze materiallaryň ýaýlasynda gazanan ägirt uly progress gaty jisimiň fizikasy bilen baglylykdadyr.

Häzirki wagta çenli türkmen dilinde umumy fizikasy dersi boýunça taýarlanan okuw gollanmalarda gaty hallardaky maddalaryň häsiýetleri bilen bagly bolan soraglar ýeterlik möçberde ýazyp beýan edilmändir. Şonuň üçin bu gollanmada gaty jisimiň fizikasy boýunça ylmy edebiýatlarda ýygnalan materiallary tertibe salmak we olary ýokary okuw mekdebiň talyplaryna aýdyň we düşnükli görnüşde beýan etmeklik maksat edilýär.

Okuw gollanmada gaty jisimiň fizikasy bilen bagly bolan soraglaryň hemmesini ýazyp beýan etmek goýulmandyr. Gollanmanyň esasy maksady geljekki hünärmenleri gaty jisimleriň esasy häsiýetleri we olaryň dürli şertlerde bolup geçýän prosessleriň mehanizmleri bilen tanyşdyrmakdan durýar.

Ýazarlar

Giriş

Gaty jisimiň fizikasy häzirki wagtda örän giň praktiki ulanylyşa eýe bolan ylmyň iň wajyp bölümleriniň biridir. Ol material öwrenişiň, ýarymgeçirijileriň, pýezoelektrikleriň, segnetoelektrikleriň, magnit materiallaryň, şol sanda spin aýnalaryň, magnitýarymgeçiriji maddalaryň, emeli gymmat daşlaryň (almazlaryň, rubinleriň we ş.m.), metalliki aýnalaryň, optiki kristallaryň we başga-da özboluşly fiziki häsiýetlere eýe bolan materiallaryň öndürilşiniň esasynda ýatyr.

Gaty jisimiň fizikasynyň wezipesi gaty jisimleriň düzümini, olaryň atom - electron gurluşyny öwrenmekden durýar, şeýle hem jisimleriň gurluşynyň we düzüminiň dürli fiziki häsiýetleriniň, birinji nobatda kristallik materiallaryň arasyndaky baglanyşygyny açmakdan ybaratdyr.

Bu gollanmada gaty jisimiň fizikasyna girýän soraglardan kristallik gözenekleriň görnüşleri boýunça kristallaryň klassifikasiýasy, gaty jisimleriň elektrik, ýylylyk we mehaniki häsiýetleri, gaty jisimleriň zolak nazaryýetiniň elementleri, gaty jisimleriň magnit häsiýetleri ýaly soraglar ýazyp beýan edilen.

Belli bolşy ýaly, tebigatdaky maddalar dört agregat hallarda bolup bilýärler: gaty, suwuk, gaz we plazma.

Suwuklyklardan tapawutlylykda gaty jisimler görnüşiniň maýyşgaklygyna eýedirler. Başgaça aýdylanda, daşky güýçleriň täsiri astynda gaty jisimiň görnüşiniň üýtgemeginde bu jisimde içki maýyşgak güýçler emele gelýär. Bu güýçler gaty jisimi öňki ýagdaýyna getirmäge ymtylýarlar. Diýmek, gaty jisim hemişelik temperaturalarda öz görnüşini we ölçeglerini saklamak ukybyna eýedir.

Gaty jisimler bu örän wajyp hiline görä tehnikada giň ulanylyşa eýedirler. Gaty jisimsiz hiç bir maşyny ýa - da mehanizmini döretmek mümkin däl. Eger öň gaty jisimler tehnikada diňe konstruksion material hökmünde ulanylýan bolsalar, häzirki wagtda olar takyk fiziki abzallaryň (optiki, ýarymgeüiriji, aşageçiriji we ş.m.) ýerine ýetirip, özbaşdak rol oýnaýarlar.

Kristallik gaty jisimleriň gurluşynyň tertipleşmekligi we munuň bilen bagly bolan olaryň häsiýetleriniň anizotroplygy, kristallaryň ylymda we tehnikada giňden ulanylyşyna sebäp boldy.

Kristallar rentgen şöhleleriň fiziki tebigatyny anyklamaga, elektronlaryň tolkun häsiýetlerini öwrenmäge ýardam etdi.

Soňky ýyllarda kristallaryň ýarymgeçiriji tehnikada ulanylyşy hem çalt ösýär. Şeýle hem kristallaryň kwant generatorlarda we güýçlendirijilerde (lazerlerde we mazerlerde) ulanylyşy mysal bolup biler.

Gaty jisimleriň öwrenilişi täze materiallary döretmekde uly ähmiýeti bar. Muňa ýokary temperaturalara çydamly, ýa - da tersine ýeňil eremeýän erginler, aşa gaty materiallar, täsin elektrik, magnit we mehaniki häsiýetlere eýe bolan erginler, şol sanda görnüşini ýatda saklaýan materiallar, uniwersal aýna kristallik materiallar, metallik keramiki materiallar we ş.m.

1. Kristal gaty jisimleriň gurluşy

Gaty jisimiň fizikasy häzirki ylmyň wajyp bölümleriniň biridir. Şu ylmyň üstünlikleri netijesinde kwant elektronikany döretmeklik oblastynda, ýarymgeçirijiler tehnikasynda, unikal fiziki häsiýetleri bolan materiallary almakda ýokary mümkinçilikler ýüze çykdy. Muňa ýylylyga çydamly, ýa-da tersine, ýeňil eredilýän erginler, aşagaty materiallar, täsin elektrik, magnit we mehaniki häsiýetleri bolan jisimler, şol sanda magnitýarymgeçiriji maddalar, uniwersal aýnakristallik materiallar, amorf kristallary we başgalar degişlidirler.

***a*) Umumy häsiýetnama**

Gaty jisimler gazlara görä million esse kiçi gysylmak ukyby bilen häsiýetlenýärler. Meselem, $NaCl$ kristallyň gysylmak ukyby deňdir $0{,}3 \cdot 10^{-12}\, sm^2/din$, suwuk simabyň - $3{,}8 \cdot 10^{-12}\, sm^2/din$, atmosfera basyşynda howanyň gysylmak ukyby bolsa deňdir $10^{-6}\, sm^2/din$. Muny kondensirlenen ulgamlaryň gazlardan tapawutlylykda olary düzýän bölejikleriň özara kontaktlarynda gurulýandygy bilen düşündirip bolar, ýagny bölejikleriň arasy olaryň diametrine deňdir. Gazlarda atmosfera basyşynda bölejikleriň arasyndaky aralyk 10 esse köpdür.

Bölejikleriň ýylylyk hereketleriniň häsiýeti hem tapawutlanýar. Gaty jisim ulgamlarda ol yrgyldylydyr, gazlarda bolsa – güýjeýändir.

Gaty jisim hallar bir belli ρ dykyzlyga eýedirler we maddanyň berlen mukdarynda bir belli V göwrüme eýedirler. Bu göwrümiň çäginde kondensirlenen ulgamlar daşky güýçler gatnaşmasa-da bölejikleriň tirkemeginiň (ildirmeginiň) içki güýçleriniň esasynda saklanýarlar, gazlar bolsa olara berlen göwrümi doldurmaga ymtylýarlar.

Ýokarda aýdylan konstantalar (hemişelikler) (şepbeşiklik, dykyzlyk we başg.) adaty basyşlara degişlidirler, ýokary we aşaýokary basyşlarda (müňlerçe we millionlarça atmosferalar) gaty jisimleri gysyp, olaryň göwrümini, $\Delta V / V \sim 20-30\%$ azaldyp bolýar. Bu ýagdaýda madda ilki metallik, soňra bolsa plazma halyna geçýär.

***b*) Gaty jisim hallaryň görnüşleri.**

Atom – molekulýar gurluşyň guramagyň derejesiniň tertip boýunça ýokarlanmagyna görä kondensirlenen hallar 5 görnüşe bölünýärler: suwuklyklar, aýnalar, amorflar, suwuk kristallar we kristallar.

Aýnalar – kwazideňagramly, izotrop, gurluşly-tertipsiz hallar. Olar gaty jisimleriň mehaniki häsiýetlerine eýedirler. Olarda $G \neq 0$. Şonuň üçin aýnalar görnüşleriniň maýyşgaklygyna eýedirler we olarda kese we boý maýyşgak tolkunlary ýaýrap bilýärler. (Suwuklyklarda we gazlarda bolsa diňe boý tolkunlary ýaýrap bilýär).

Amorflar – adatdan daşary şertlerde alynýan güýçli deňagramsyz, izotrop, gurluşly-tertipsiz hallar. Deňagramsyzlygyň derejesi barada amorf surmanyň partlamagyndan we jaýramaklygyndan bilip bolýar.

Suwuk kristallar – deňagramly, amizotrop, uly akyjylyga eýe bolan bölekleýin gurluşly-tertipli hallar.

Kristallar – deňagramly, amizotrop, doly gurluşly-tertipli hallar.

***ç*) Gaty jisimiň akyjylygy.**

Akyjylyk, süýgeşiklik ýaly düşünjeler görälidirler we tejribäniň şertlerine baglydyrlar (temperaturadan, wagt gözegçiliginden, ýüklenmäniň goýulan tizliginden).

Buz kristallik jisimiň portlugynyň mysaly bolup biler, sebäbi ol urgylarda böleklere döwülýär. Şol wagtda buz haýal deformasiýalara ýokary süýgeşiklige eýedir. Muňa tebigatdaky hadysalar şaýatlyk edýär: dag buzluklary ýa-da buzly derýalar. Beýiklikleriň uly üýtgäp durmaklygynda buzluklaryň akymynyň tizligi artýar, deformasiýa portly bolýar, şonuň üçin kert gaýa buzlugy emele gelýär. Kert gaýa buzlugyň aşagasynda buzluk ýene-de derýa öwrülýär.

Deformasiýanyň tizliginiň artmagy gaty jisimleriň döwülmegine ýardam edýär. Meselem, transformator ýag bilen kaniforly garyndysynyň akymy uly urgyda (23 *m/s* tizlik bilen) aýratyn böleklere bölünýär.

***d*) Gaty jisim hallaryň alnyşynyň esasy usullary**

Bu usullar aşakdakylardyr: aşa doýan suwuk erginleriň kristallaşmasy, gaty haldaky polimorf we faza öwrülmeleri. Ýene-de iki dürli erginleriň himiki usul bilen fazanyň bölünip çykýandygyny hem ýatlamak bolar.

Häzirki zaman gaty jisimiň ugurlarynyň biri – berlen mehaniki, magnit, elektrik we başga häsiýetli materiallary almaklykdyr.

Mälim bolşy ýaly, gaty jisimler suwuklyklar ýaly diňe bir öz göwrümlerini däl-de eýsem formalarany, hem saklaýarlar. Olar köplenç kristal halda bolýarlar.

Gaty jisimleriň gurluşy köplenç kristallaýyndyr.

Kristallar – atomlary ýa-da molekulalary giňişlikde kesgitli, tertipli ýagdaýda bolan gaty jisimlerdir.

Kristallik gaty jisimleri adaty ýagdaýda polikristallardan ybaratdyrlar, polikristallar bolsa tertipsiz gönektirilen ownuk **kristallitlerden** ýa-da **dänejiklerden** ybaratdyrlar.

Kristallik gaty jisimler aýratyn, ýeke kristallar görnüşinde bolup bilýärler. Olara **monokristallar** diýilýär.

Polikristallardaky kristallitleriň ululygy 0,1 ÷ 1000 mkm.

Kristall bir jinsly diýip atlandyrylýar eger-de onuň içindäki islendik nokat üçin oňa häsiýeti görä meňzeş we tükenikli aralykda başga bir nokat tapylsa.

Meňzeş nokatlar (düwünler) üç ölçegli periodik gözenek emele getirýärler. Olara giňlişlikdäki **kristallik gözenek** diýilýär.

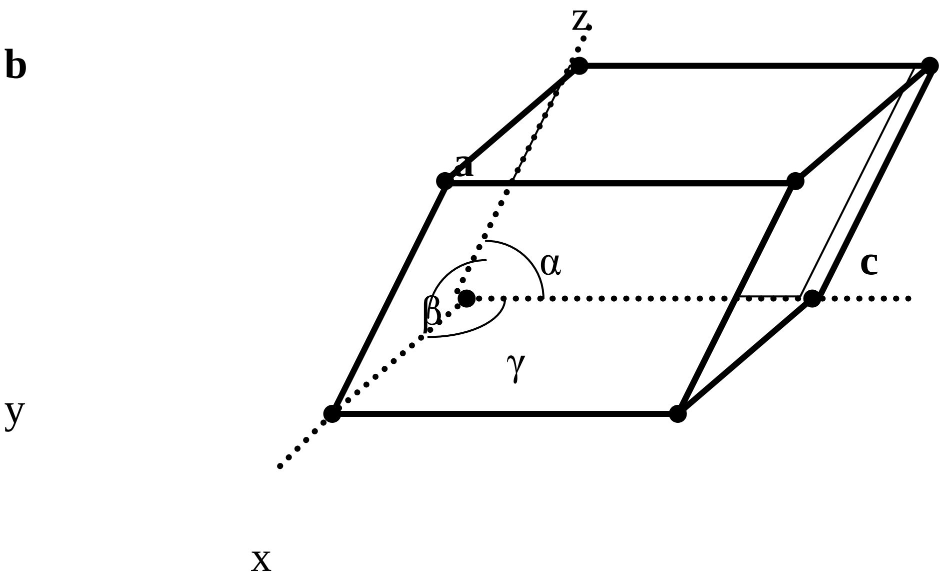
Gözenegi giňişlikde periodikly gaýtalanýan elementar parallelepipediň kömegi bilen beýän edip bolýar (elementar öýjük) ýa-da öz islegine saýlanan a, b, c birlik transläsiýalar bilen (Sur. 1.1).

Transläsiýalary gözenegiň bir nokadyna däl-de, tutuş ähli gözenege täsir edýärler. Düwüniň radius-wektoryny aşakdaky formuladan tapyp bolar:

$$\bar{R} = m\bar{a} + n\bar{b} + p\bar{c} \qquad \textbf{(1.1)}$$

Bu ýerde m, n, p – berlen düwüniň indekslary.

Umumy ýagdaýda elementar öýjigi gapyrgalary a, b, c we burçlary α, β, γ bolan gyşyk burçly parallelepiped görnüşinde görkezilýär (Sur. 1.1). Görkezilen 6 ululyklar gözenegiň **parametrleri** diýip atlandyrylýar, a, b, c ululyklar bolsa köplenç gözenegiň **hemişelikleri** diýip atlandyrylýar. Iň gysga transläsiýalarda gurulan elementar parallelepipeda **ýönekeý elementar öýjügi** diýilýär.



Sur. 1.1

1848-nji ýylda fransiýaly kristallograf O. Brawe elementar öýjügiň gapyrgalarynyň ululygyň gatnaşygyna we özara gönüktirilmegine görä kristallik gözenegiň 14 sany görnüşli bolup biler diýip görkezýär (Brawe gözenekleri).

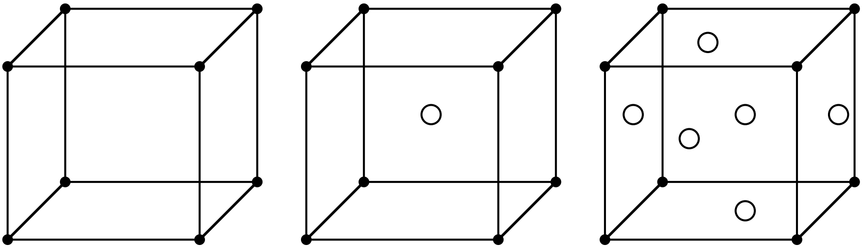
1867-nji ýylda rus inženeri we kristallografy A. F. Gadolin simetriýa elementleriniň 32 kombinasiýasy bolup biler diýip görkezipdir.

Olaryň her haýsysy simmetriýanyň klassy diýip atlandyrylýar.

1881-nji ýylda görnükli rus kristallografy E. E. Födorow 32 klassyn içinde 230 dürli gňişlik toparlary bolup biler diýip görkezipdir.

Öýjügiň granlarynyň arasyndaky burçlara we gapyrgalaryň a, b, c ululyklarynyň gatnaşygyna görä 7 sany kristallik ulgamlary (singoniýalary) bolup biler:

1) kub ýa-da dogry (Sur. 1.2) 5) rombik (Sur. 1.6)
2) geksagonal (sur. 1.3) 6) monoklin (Sur. 1.7)
3) tetragonal (Sur. 1.4) 7) triklin (Sur. 1.8)
4) romboedrik ýa-da trigonal (Sur. 1.5)



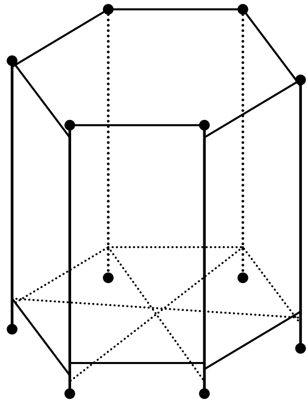
ýonekeý göwrümmerkezleşen granymerkezleşen

Sur. 1.2

Kub ulgamy we onuň gözenekleri

$\alpha = \beta = \gamma = 90^0$ $a = b = c$

Geksagonal ulgamyň elementar öýjügi göni prizma bolup durýar. Onuň esasynda 60 we 120 gradusly romb ýatyr. Öýjügiň oklarynyň arasyndaky iki sany burç göni, biri bolsa 120^0 deňdir (Sur. 1.3).

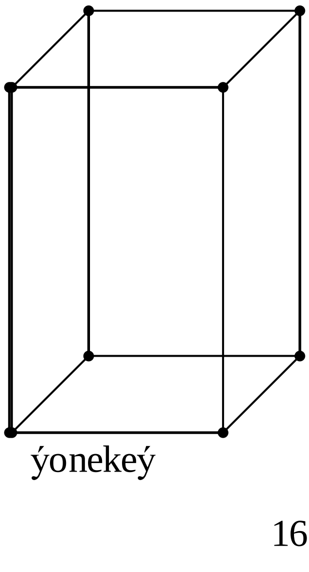


Sur. 1.3 Geksagonal ulgam

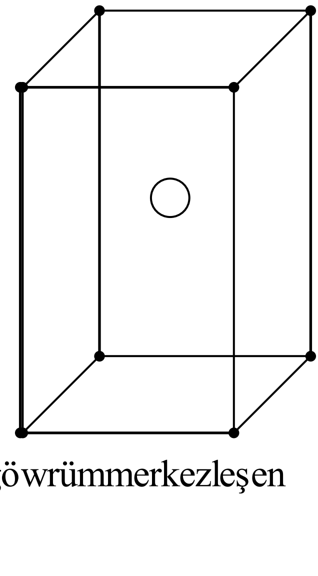
$\alpha = \beta \quad \gamma = 120^0 \qquad a = b \neq c$

Tetragonal ulgamyň ýonekeý öýjügi göni burçly parallelepipetden bolup durýar.

Onuň esasynda kwadrat ýatyr (Sur. 1.4).



ýonekeý

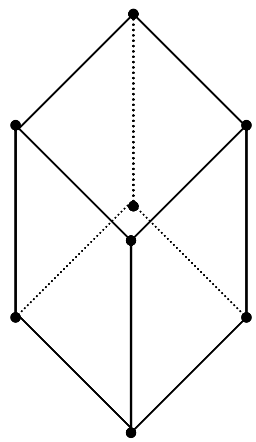


göwrümmerkezleşen

Sur. 1.4 Tetragonal ulgam we onuň gözenekleri

$\alpha = \beta = \gamma = 90^0$ $a = b \neq c$

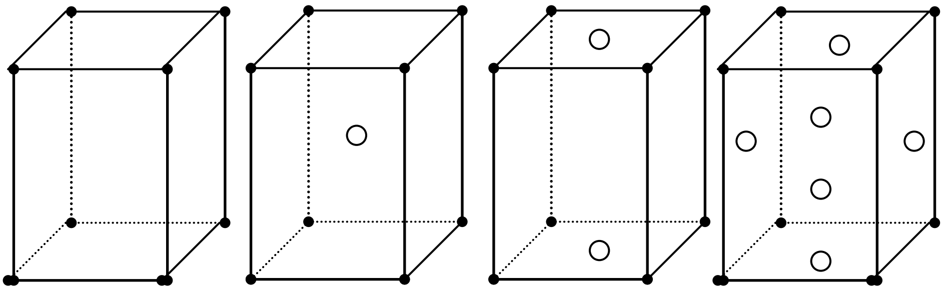
Trigonal ulgamynyň elementar öýjügi romboedrden bolup durýar,şonuň üçin ol ulgam romboedrik ulgamy diýip atlandyrylýar. (Sur. 1.5)



Sur. 1.5 Trigonal ulgam

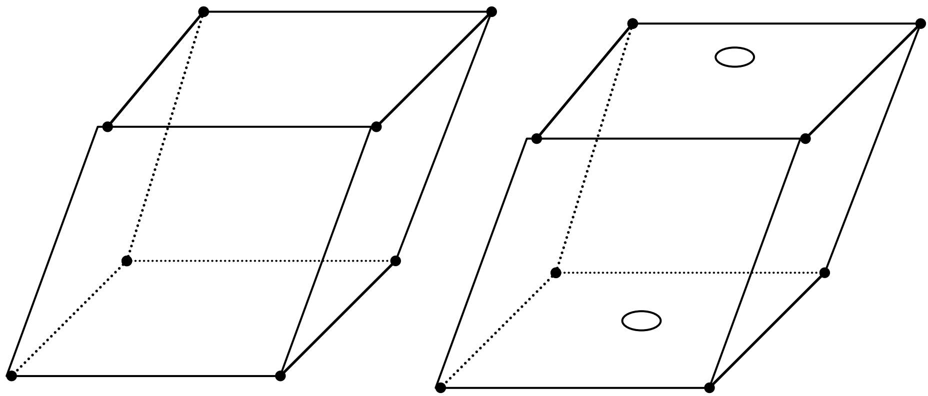
$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^0 < 120^0$ $a = b = c$

Rombik ulgamyň elementar öýjügi gapyrgalaryň uzynlygy dürli bolan göni burçly parallelepipetden bolup durýar. Onuň 4 sany giňişlikdäki gözenegi bar: ýönekeý, göwrümmerkezleşen, bazamerkezleşen, granymerkezleşen. (Sur. 1.6)



ýonekeý göwrüm-merkezleşen baza-merkezleşen grany-merkezleşen

Sur. 1.6 Rombik ulgamy we onuň gözenekleri
$\alpha = \beta = \gamma = 90^0$ $a \neq b \neq c$



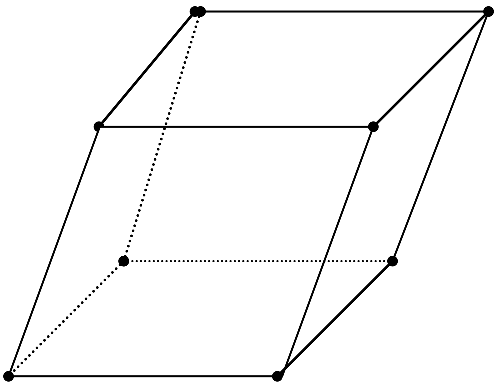
ýonekeý merkezleşen bazisly

Sur. 1.7 Monoklin ulgamy we onuň gözenekleri
$\gamma = \beta = 90^0$ $\alpha \neq 90^0$ $a \neq b \neq c$

Monoklin ulgamyň elementar öýjügi ýapgyt parallelepipetdir. Onuň iki jübüt granlary göniburçlukdyr, bir jübüti bolsa –parallelogram (Sur. 1.7)

Triklin ulgamyň giňişlik gözenegi parallelepiped görnüşli elementar öýjükden bolup durýar. Onuň hemme gapyrgalary dürlidir, burçlary bolsa öz aralarynda deň däl (Sur. 1.8)

Tebigatda köplenç köp-granlyklar görnüşde dogry daşky formaly kristallar duşuşýarlar. Olaryň granlary we gapyrgalary periodikly gaýtalanýarlar. Bu ýagdaýda kristal **simmetriýa** eýedir diýilýär. Geometrik figuralara göra simmetriýa olaryň öz-özünde deň we birmeňzeş ýerleşen bölekleriň



Sur. 1.8 Triklin ulgamy

$\alpha \neq 90^0$ $\beta \neq 90^0$ $\gamma \neq 90^0$ $a \neq b \neq c$

bardygyny aňladýar. Okuň daşyna aýlanmagy bilen figurany öz-özi bilen gabat getirip bolýar. Şu operasiýalara **simmetrik özgertmeleri** diýilýär, aýratyn simmetrik özgertmesini häsiýetlendiren geometrik obraza bolsa **simmetriýa-nyň elementi** diýilýär.

Kristallarda simmetriýa elementleriň sany çäklenen.

Simetriýa elementleriň esasy görnüşleri: simmetriýanyň aýna tekizligi, simmetriýanyň aýlama oky (ýonekeý we aýna), simmetriýanyň merkezi ýa-da inwersiýa merkezi.

Kristallarda diňe 5 sany dürli atly simmetriýa oky bolup bilýär: birinji, ikinji, üçinji, dördünji we altynjy.

Bäşinji, ýedinji we olardan ýokary oklar kristallarda bolup bilemeýär, çünki olaryň barlygy kristallik gözenegiň düşünjesi bilen gabat gelenok.

Obýektiň simmetriýasyny häsiýetlendiren simmetriýa elementleriň doly jemine **simmetriýa klasy** diýilýär.

2. Gaty jisimlerdäki defektler

Kristallyň periodik gurluşynyň üýtgemesine defekt diýilýar. Gurluş defektleriň gaty jisimleriň häsiýetlerine bolan täsiri örän güýçlidir.

Defektler 4 sany klasa bölünýärler:

a) **Nokatlanyç defektler**.

Şu defektlere wakansiýeler (kristallik gözenegiň wakant düwünleri), düwünleriň arasyndaky atomlar, düwünlerdäki we düwünleriň arasyndaky garyndy atomlar degişlidirler.

b) **Çyzykly (bir ölçegli) defektler**.

Bu defektleriň bir ölçegdäki uzaklygy gözenegiň parametrinden köp esse ulydyr, başga iki ölçeglerde bolsa birnäçe parametrlerden köp däldir.

Çyzykly defektlere dislokasiýalar we mikrojaýryklar degişlidirler.

ç) **Üst (iki ölçegli) defektler**.

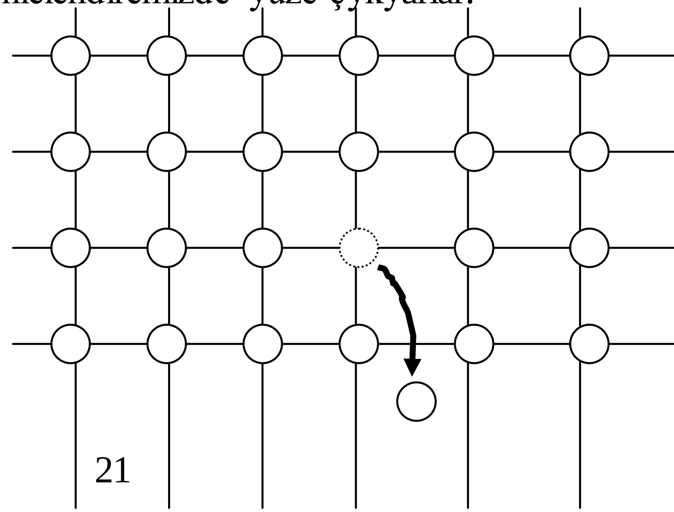
Bu defektler iki ölçeglerde gözenegiň parametrinden köp esse ulydyr, üçünji ölçegde bolsa birnäçe parametrlerden köp däldir.

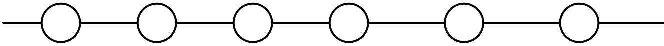
Üst defektlere dänejikleriň araçägi, fazaara araçägler, domenleriň diwarjyklary degişlidirler.

d) **Göwrüm (üç ölçegli) defektler**.

Bu defektlere – mikroboşluklar we başga fazanyň garyndylary degişlidirler.

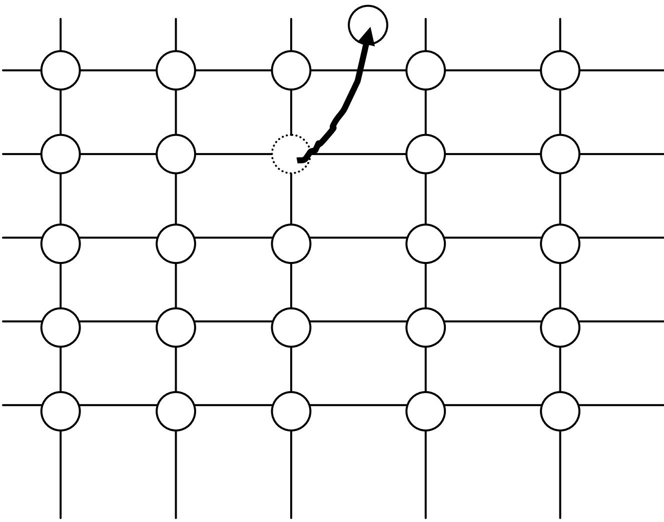
Indi nokatlanyç defektlere jikme-jik seredeliň. Nokatlanyç defektler köplenç gaty jisimleri gyzdyramyzda, çalt bölejikler bilen şöhlelendiremizde ýüze çykýarlar.





Sur. 2.1

Kristallyň üst gatlagynda ýerleşen atomlar kristally gyzdyramyzda kinetik energiýa eýe bolýarlar. Frenkeliň çaklamasyna görä kristallyň islendik atomy (üst we içindäki) onuň orta kinetik energiýasyndan ep-esli köp energiýa alyp bilýar. Şonuň ýaly atom öz deňagramlyk ýagdaýyndan çykyp bilýar. Kristallyň içinde ýerini üýtgedip we başga atomlara energiýasyny berip, ol täze deňagramlyk ýagdaý tutýar. Eger gözenegiň golaýdaky düwünleriniň ýerleri boş bolmasa, onda ol düwünleriniň arasynda ýerleşýär.



Sur. 2.2

Gözenegiň galan boş düwüni **wakansiýa** diýip atlanýar. Düwünleriň arasyndaky atomlara we wakansiýalaryň jemine Frenkele göra defektler diýilýar (Sur. 2.1).

Şottki göra defektler atomlaryň ykjamlygy ýokary bolan krisrallarda bolup bilýär. Şol kristallarda energetiki taýdan düwünler arasyndaky atomlaryň emele gelmegi mümkin däl.

Şottki görä defektler dörände, käbir üst golaýynda ýerleşen atomlar kristallyňüstine çykyp bilýärler (Sur. 2.2). Emele gelen boşluklar kristallyň göwrümine göçýärler. Ottki görä defektler kristallyň dykyzlygyny azaldýar, sebäbi onuň göwrümini (m = const) ulalýar.

Frenkele görä defektler emele gelende kristallyň dykyzlygy üýtgänok, sebäbi kristallyň göwrümi üýtgemeýär.

Kristallary çalt bölejikler bilen şöhlelendirimizde (neýtronlar, portonlar, elektronlar bilen) emele gelýän nokatlanyç defektlere radiasion defektler diýilýär. Radiasion defektler termodinamiki taýdan deň agramly däl. Şol sebabden şöhlelendirme kesilende kristallyň ýagdaýy stasionar däl.

Bölejikler kristallyň içinden geçende çylşyrymly prosesler emele gelýärler.

Olaryň arasynda esaslary aşakdakylar:

a) çalt bölejikleriň kristallyň atomlarynyň ýadrolary bilen maýyşgakly çaknyşmagy.

b) kristallyň atomlarynyň elektron gatlaklarynyň oýanmagy we ionlaşmasy.

ç) ýadro öwrülmeleri, ýa-da başgaça aýdanda, kristallardaky bölejikleriň radioaktiw ýagdaýa geçmekligi we radioaktiw dargamakdan soň alaryň garyndy atomlara öwrülmeligi.

Radiasion defektleri ýüze çykarmak üçin esasy rol çalt bölejikleriň kristallyň atomlary bilen maýyşgakly çaknaşmagy oýnaýar.

Kristallyň atomynyň iň golaý düwün arasyndaky ýagdaýa energiýanyň iň kiçi bahasyna bosaga energiýa diýilýär. Ony E_d haryp bilen belleýärler.

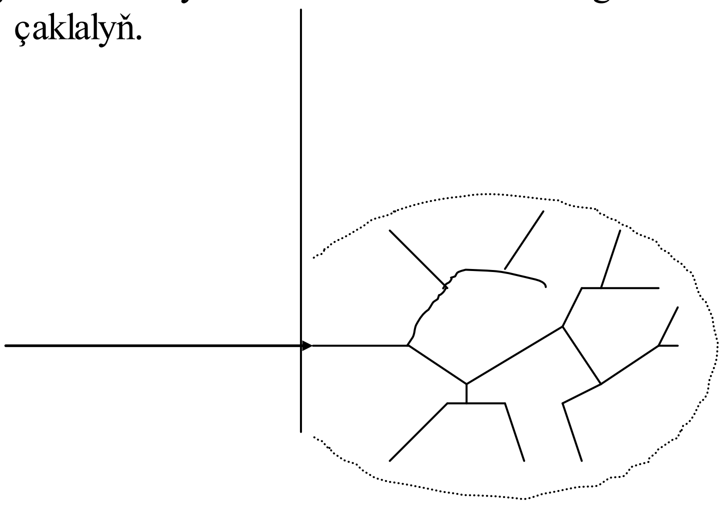
Kristallaryň köpüsi üçin $E_d \approx 25$ ew. Şol kristallarda atomlaryň baglanyşykly energiýasy takmynan 10 ew deňdir.

Kristallyň çalt bölejiginden alýan her bir atomynyň $E > E_d$ energiýa olary düwünleriň arasyna geçirýär.

Onda bir wagtda wakansiýa we düwün arasyndaky atom ýüze çykýar. Kristallyň göwrüminde süýşen atomlaryň kaskady emele gelýär (Sur. 2.3).

Umumy ýagdaýda kristallda hem Frenkel görä defektler, hem-de Şottki görä defektler bardyr.

Goý kristallda ýeke-täk defekt – Frenkel görä defekt bar diýip çaklalyň.



Sur. 2.3

Şondan başga-da aşakdaky şertler ýerine ýetirilýär:

1) kristallyň göwrümi temperatura bagly däl.

2) defektler bir-birine bagly däl.

3) gözenekdäki atomlaryň yrgyldylarynyň ýygylygy boşluklaryň (wakansiýalaryň) we düwün arasyndaky atomlaryň bolandygyna bagly däl.

Goý E_F Frenkel defektleriniň (jübütleriniň) emele gelmek energiýasy.

N – kristalldaky atomlaryň sany.

N^1 – kristalldaky düwün aralygynyň sany.

Goý indi belli “T” termodinamiki temperaturada düwünlerde düwün aralygyna n atomlar geçdi we şonça-da boşluklar (wakansiýalar) döredi. Şu ýagdaýda kristallyň entropiýasy artýar:

$$S = K_B \ell_n W \qquad \textbf{(2.1)}$$

Bu ýerde K_B – Bolsmanyn hemişeligi.

W – termodinamika ähtimallygy (berlen sistema ýagdaýynyň amala aşyrylmagy ukyplarynyň usullar sany).

$$W = \frac{N!}{(N-n)!n!} \qquad \textbf{(2.2)}$$

Meňzeşlikde n atomlaryň N^1 düwün aralygynda ýerleşme ukyplarynyň usullar sany.

$$W^1 = \frac{N^1!}{(N^1-n)!n!} \qquad \textbf{(2.3)}$$

Onda

$$S = K_B[\ell_n W + \ell_n W^1] = K_B\left[\ell_n \frac{N!}{(N-n)!n!} + \ell_n \frac{N^1!}{(N^1-n)!n!}\right]$$

(2.4)

Stirlingiň formulasyna esaslanyp, ýazyp bolýar:

$$\ell_n x! \approx x(\ell_n x - 1)$$

Onda (2.4) aňlatmadan alýas:

$$S = K_B\left[NN - (N-n)\ell_n(N-n) - n\ell_n n\right] +$$
$$+ K_B\left[N^1\ell_n N^1 - ({}^1N - n)\ell_n(N^1 - n) - n\ell_n n\right] \quad \textbf{(2.5)}$$

Eger Frenkel görä ýeke defekt emele gelmek üçin E_F energiýa harj edilýän bolsa, onda n sany defekt emele gelmek üçin kristallyň içki energiýasynyň artmagy deňdir:

$$E = nE_F \quad \textbf{(2.6)}$$

Erkin energiyanyň aňlatmasy:

$$F = nE_F - K_B T\left\{\begin{array}{l}\left[N\ell_n N - (N-n)\ell_n(N-n) - n\ell_n n\right] + \\ + \left[N^1\ell_n N^1 - (N^1-n)\ell_n(N^1-n) - n\ell_n n\right]\end{array}\right\}$$

(2.7)

Ýylylyk deň agramlyk ýagdaýynda erkin energiýa n-iň üýtgemegine görä minimal bolmalydyr, başgaça aýdylanda aşakdaky şert ýerine ýetirilmeli:

$$\left(\frac{\partial F}{\partial n}\right)_T = 0 \quad \textbf{(2.8)}$$

Layykly özgertmelerden soňalarys:

$$E_F = K_B T \ell_n \frac{(N-n)(N^1-n)}{n^2} \quad \textbf{(2.9)}$$

ýa-da

$$\frac{n^2}{(N-n)(N^1-n)} = \exp.\left(-\frac{E_F}{K_B T}\right) \qquad \textbf{(2.10)}$$

Bu ýerden Frenkel jübütleriniň sanyny tapýas:

$$n = \sqrt{(N-n)(N-n)}\exp.\left[-{E_F}\big/{(2K_B T)}\right] \qquad \textbf{(2.11)}$$

Eger n<<N we n<<N^1 bolsa, onda

$$n = \sqrt{NN^1}\exp.\left[-{E_F}\big/{(2K_B T)}\right] \qquad \textbf{(2.12)}$$

(2.12) gelip çykýan netije: Frenkel jübütleriniň konsentrasiýasy T = O^0K deň bolanda nola deň bolýar we temperaturanyň artmagy bilen artýar.

Meňzeslikde Şottki görä defektleriň könsentrasiýasy

$$n = N\left(\frac{\vartheta}{\vartheta^1}\right)\exp.\left(-\frac{E_F}{K_B T}\right) \qquad \textbf{(2.13)}$$

Bu ýerde: ϑ - 3nz ossilätorlaryň ýygylygy.

ϑ^1 - 3N – 3nz ossilätorlaryň ýygylygy.

Frenkel görä defektleriň könsentrasiýasyny (2.13) aňlatma meňzeş formula bilen beýan edip bolýar:

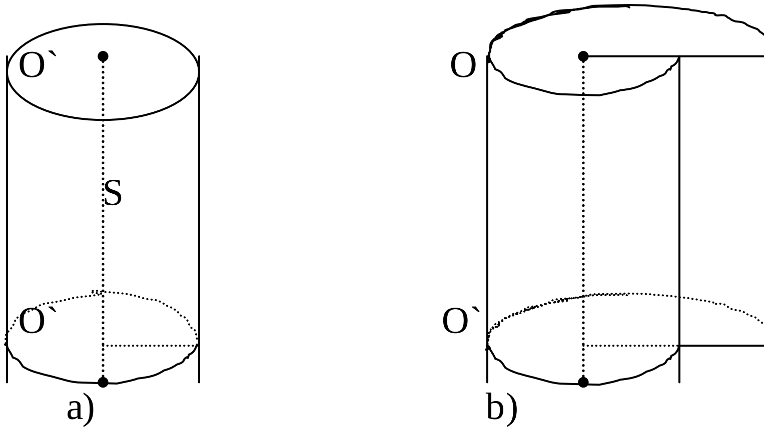
$$n = \sqrt{NN^1}\left(\frac{\vartheta}{\vartheta^1}\right)^{3z}\exp.\left(-\frac{E_F}{2K_B T}\right) \qquad \textbf{(2.14)}$$

Mott tarapyndan kesgitlenen $\left(\frac{\vartheta}{\vartheta^1}\right)$ koeffisiýentiň bahasy NaCl üçin takmynan 64 deňdir.

Dislokasiýalar.

Çyzykly defektler – dislokasiýalar ilkinji XX asyryň başlanýan ýylynda W. Wolter tarapyndan derňeldi.

Mysal hökmünde rezin silindra seredeliň. Şol silindri S tekizlik boýunça keseliň, (Sur. 2.4) ondan soň kesilen ýeriň gyrasyny 1b suratda görkezilen ýaly süýştireliň we kleýläliň.



Sur. 2.4

Süýşme oblastyny süýşmedik oblastyndan bölýan OO` çyzyga **gislokasiýa** diýilýar.

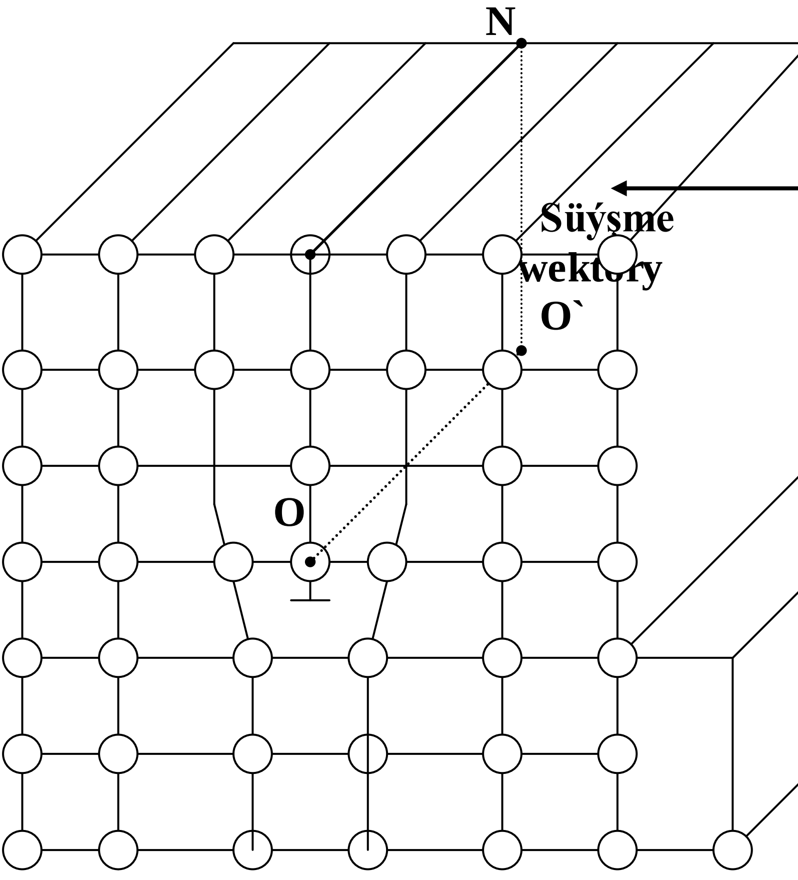
30-nji ýyllarda D. Teýlor we başgalary meňzeş defektler kristallardada bolup biler diýip çaklapdyrlar.

Ikinji suratda kristallyň böleginiň bir atom aralygyna süýşmegi esasynda dörän OO` dislokasiýa görkezilipdir.

Süýşme tekizligiň aşagysynda ýerleşen "n" atom tekizliklerine süýşme tekizligiň ýokarsynda ýerleşen n + 1 atom tekizlikleri düşýär.

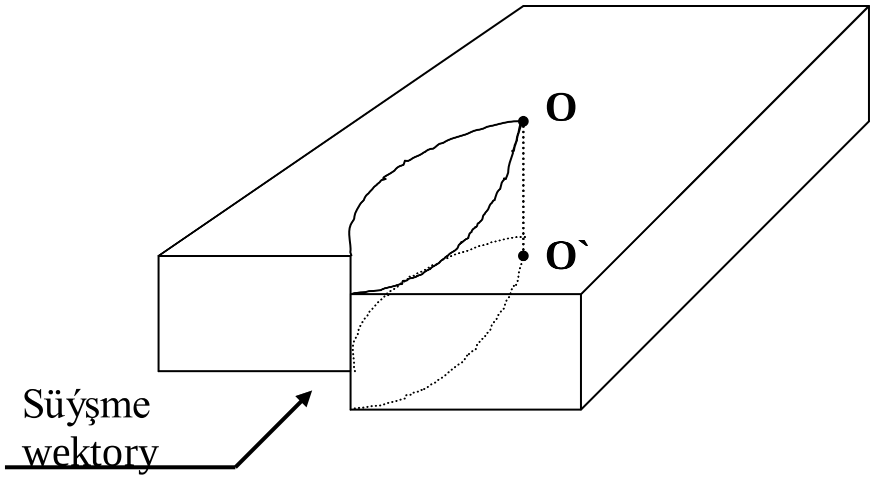
MNO`O ýarym tekizligiň çyzygyny düşündirýän dislokasiýa "gyra" dislokasiýasy atlandyrylýar.

J. Bürger ýene-de bir dislokasiýa barada duşunje girizdi.



Sur. 2.5

Kristallda 2.6-nji suratda görkezinemiz ýaly süýşme amala aşyryldy diýeli.

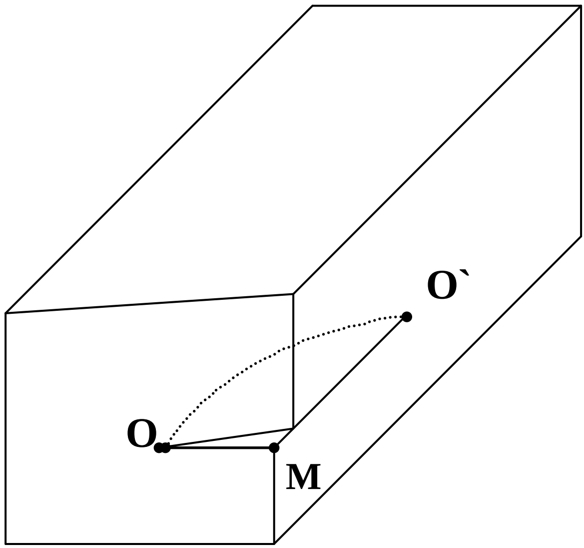


Sur. 2.6

Süýşme bolan oblastyny süýşmedik oblastyndan bölýän OO` gislokasiýa çyzygy bu ýerde süýşme wektoryna perpendikulär däl-de, parallel.

Şu ýagdaýda atom tekizligi OO` dislokasiýa töwereginde towlanan ýaly bolandygy üçin, şoňa nurbat (wint) dislokasiýasy diýilýär.

Indi dislokasiýanyň ýene-de bir görnüşine seredeliň. 2.7-nji suratda görkezilen OO` çyzygy gyşykçyzykly dislokasiýanyň bardygyny görkezýär.



Sur. 2.7

“O” nokatdaky dislokasiýa süýşme wektoryna parallel, şonuň üçin nurbat häsiýete eýedir.

Şu dislokasiýa **garyşyk** dislokasiýa diýilýär.

Dislokasiýa $\perp$ simwol bilwn bellenýär.

b) Bürgensiň wektory.

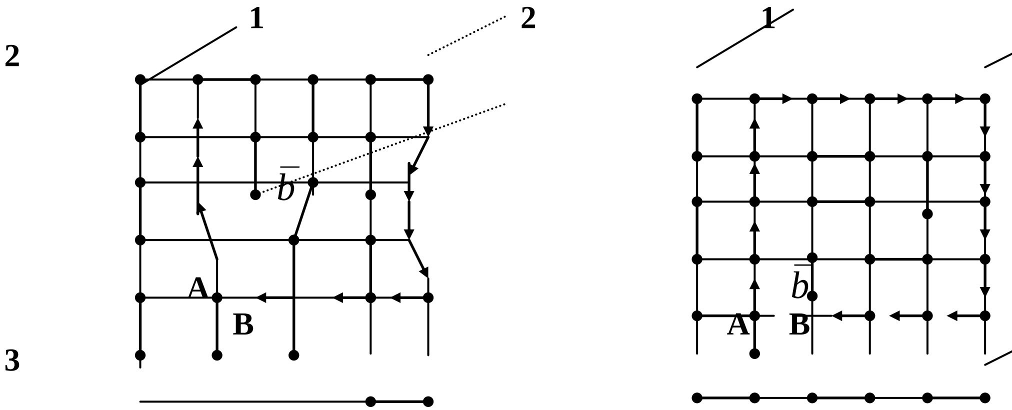
Dislokasiyanyň möhäm häsiýetnamasynyň biri süýşme wektorydyr. Şol wektora Bürgersiň wektory diýilýär.

Iki kristallik gözenege garalyň: dürli görnüşli defektleri bolan real kristallik gözenege we hiç hili defekt bolmadyk ideal kristallik gözenege.

Real kristallynda gurulan islendik formadaky ýapyk kontura **Bürgersiň_kontury** diýilýär. Eger real kristallynda dislokasiýanyň töwereginde kontur geçirilen bolsa (Sur. 2.8a), onda laýyklykdaky ideal kristallyndaky kontur arasy açyk bolýar (Sur. 2.8b).

Şu kontury utgaştyrmak üçin, şony $\bar{b}$ wektor bilen kemini doldurmak zerurdyr.

Gyra dislokasiýanyň Bürgers wektory dislokasiýanyň çyzygyna perpendikulärdyr. Nurbat (wint) dislokasiýa ýagdaýda Bürgersiň wektory dislokasiýanyň çyzygyna paralleldir.

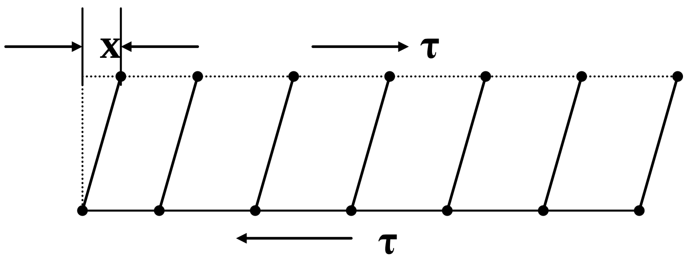


Sur. 2.8

Kristallorda dislokasiýa emele gelmek üçin zerur bolan napräženiýalar.

Ideal kristallynda dislokasiýany emele getirmek üçin, size mälim bolşy ýaly,tyrpma tekizligiň bir bölejiginde süýşürme amala aşyrmaly. Diýmek, dislokasiýalary emele getirýan zerurly napräženiýalary kesgitlemek üçin süýşürme wektoryny ($\tau_{teor.}$) tapmaly. $\tau_{teor.}$ kesgitleýän ýonekeý usul Frenkel tarapyndan hödürlendi.

Göni burçly gözenege garalyň. Goýulan “τ” süýşürme wektoryna laýyk gelýän gozgamany “x” haryp bilen belläliň. (Sur. 2.9)



Sur. 2.9

Bir atom tekizlikligini beýleki atom tekizligine görä süýşürsek “τ” napräženiýe emele gelýär. Şol napräženiýe bozulan deňagramlygy dikeltmäne ymtylyýar.

Gözenegiň simmetriýasyna laýyklykda $\tau = 0$ eger-de $x = nb/2$

Bu ýerde $n = 0, 1, 2\ldots..$

Şonuň ýaly şertleri kanagatlandyran ýonekeý funksiýa

$\tau > 0$ eger $0<x< b/2$ we $\tau < 0$ eger $\frac{b}{2} < x < b$.

(2.15)

Şeýlelik bilen gozgama täsir edýän garşylyk sinusoýida kanuny boýunça süýşürmä bagly bolýar.

(2.15) deňlemä girýän “k” koeffisiýenti hemişelik koeffisiýentidir. Ol Gukyň kanuny boýunça tapylýar.

Kiçi süýşürmelerde

$$\sin(2\pi x/b) \approx 2\pi x/b$$

Şonuň üçin

$$\tau = k(2\pi x/b) \qquad \textbf{(2.16)}$$

Başga tarapdan kiçi süýşermeleri üçin Gukyň kanuny ýerine ýetirilýär:

$$\tau = G(x/a) \qquad \textbf{(2.17)}$$

Bu ýerde G – gozgama wektory.

Şeýlelik bilen ýazyp bolar:

$$k(2\pi x/b) = G(x/a) \qquad \textbf{(2.18)}$$

Bu ýerden “k” koeffisiýentini tapylýar:

$$k = \frac{b}{a}\frac{G}{2\pi} \qquad \textbf{(2.19)}$$

Ýene-de (2.15) aňlatma garalyň.

Şol aňlatmadan gelip çykýan netije: “k” koeffisiýenti gözenegiň gozgama täsir edýän maksimal garşylygydyr.

Şol ululyk kristallyň gozgamalygynyň teoretiki berkligidir.

$$\tau_{teor} = \frac{b}{a}\frac{G}{2\pi} \qquad \textbf{(2.20)}$$

Kritiki teoretiki berklik

$$\tau_{teor.} \approx \frac{G}{10} \qquad \textbf{(2.21)}$$

Teoretiki hasaplamalara görä

$\tau_{tor.} \approx \delta / 30$

Tejribelere görä real kristallaryň köpüsinde gozgama prosessleri ep-esli kiçi napräženiýelerde başlanýar.

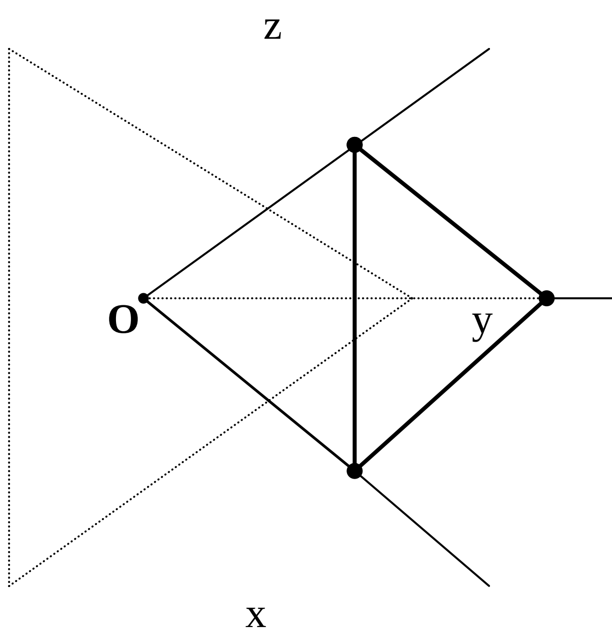
Dislokasiýa bolmadyk kristallary almak mümkin däl. Dislokasiýalaryň dykyzlygy, başgaça aýdanda dislokasion çyzyklarynyň sany ideal kristallar üçin takmynan 10^2 – $10^3 sm^{-2}$ (Ge, Si kristallarda) deňdir, örän güýçli deformirlenen kristallar üçin şol san 10^{11} – $10^{12} sm^{-2}$ deňdir.

3. Kristallarda difraksiýa we ters gözenek

Kristallografiýada göni çyzyklary we tekizlikleri giňişlik gözenekleriň düwünlerinden geçirýärler. Olara düwün çyzyklary we düwün tekizlikleri diýip atlandyrýarlar.

Dekart koordinat sistemasy hökmünde ýonekeý öýjügiň gapyrgalaryny saýlalyň. Giňişlik gözenekde düwünlerden geçýän tekizlik geçireliň (Sur.3.1). Saýlanan koordinat sistemada onuň ýaly tekizlik birinji derejeli deňleme bilen aňladylýar:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \qquad \textbf{(3.1)}$$



Sur. 3.1

Koordinat ulgamynyň başlangyç nokadyndan (O nokady) geçýäň tekizligiň deňlemesi:

$$Ax + By + Cz = 0 \qquad \textbf{(3.2)}$$

Şu tekizlikde iki sany düwün alsak, onda olaryň koordinatalary

$$x_1 = m_1a; \qquad y_1 = n_1b; \qquad z_1 = p_1c$$
$$x_2 = m_2a; \qquad y_2 = n_2b; \qquad z_2 = p_2c$$

Bu ýerde m_1, n_1, p_1, m_2, n_2, p_2 –bitin sanlar, a, b, c – elementar öýjügiň parametrleri.

Düwünleriň koordinatlary aşakdaky deňlemäni kanagatlandyrmaly:

$$Aam_1 + Bbn_1 + Ccp_1 = 0$$
$$Aam_2 + Bbn_2 + Ccp_2 = 0$$

Çyzykly deňlemeleriň teoriýasyna laýklykda:

$$Aa : Bb : Cc = \begin{vmatrix} n_1 & P_1 \\ n_2 & P_2 \end{vmatrix} : \begin{vmatrix} P_1 & m_1 \\ P_2 & m_2 \end{vmatrix} : \begin{vmatrix} m_1 & n_1 \\ m_2 & n_2 \end{vmatrix} = ht : kt : \ell t$$

(3.3)

Eger (3.2) deňlemäniň A, B we C koeffisiýentleriniň ýerine (3.3) deňlemeden tapylan olaryň bahalaryny ýerine göýsak, onda koordinat ulgamyň başlangyç nokadynyň geçýän tekizligiň deňlemesi:

$$hx + ky + 1z = 0 \qquad \textbf{(3.4)}$$

Bu ýerden x =x/a; y = y/b; z = z/c, başgaça aýdaňda her okuň boýundaky birlikler dürlidirler we transläsiyalara – elementar öýjügiň gapyrgalaryna deňdirler.

Başlangyç nokatdan geçýän tekizligi parallel islendik tekizligiň deňlemesi:

$$hx + ky + 1z = t \qquad \textbf{(3.5)}$$

Bu ýerde t – bitin san.

Başlangyç nokatdan geçýän tekizlik üçin t = 0, baslangyç nokadyna iň golaý tekizlik üçin t = 1.

t = 1 ýagdaý üçin (3.5) deňleme aşakdaky deňleme bilen beýan edilýär:

$$\frac{x}{(a/h)} + \frac{y}{(b/k)} + \frac{z}{(c/\ell)} = 1 \qquad \textbf{(3.6)}$$

h, k, l –tekizligiň indeksleri. Olar tegelek skobka alynýarlar: (hkl).

Eger indeksiň ýokarsynda çyzyk bolsa, onda oňa minusly indeks düşünmeli: (h$\bar{k}$l).

Göni çyzyklaryň indekslary kwadrat skobka alynýar:[hkl].

Geksagonal kristallarda tekizlikleriň indekslerini kesgitlemek üçin dördünji indeks girizilýar: (hkil).

Dördünji kömekçi okyny ç okyna perpendikulär tekizliginde girizýärler (Sur. 3.2).

AB göniçyzyk (hkl) tekizligininiň yzy.

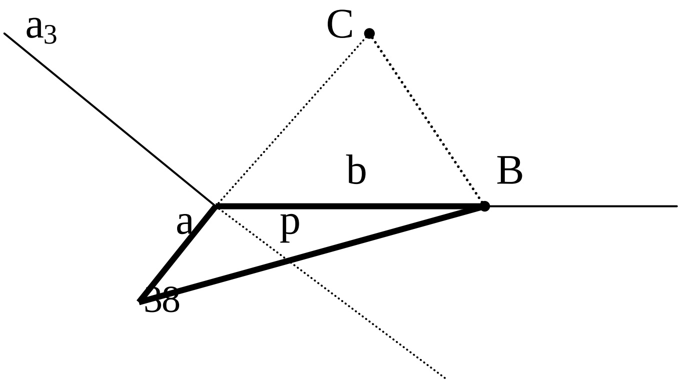
OD = P –a_3 okyndan (hkl) tekizligiň kesýän kesigi.

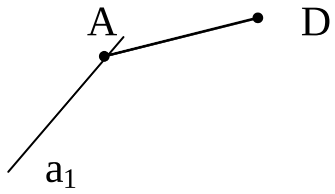
OC = BC = b

$$-\frac{1}{p} = \frac{a+b}{ab}; \qquad -\frac{1}{p} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}; \qquad -\frac{1}{p} = -i;$$

$$\frac{1}{a} = h; \qquad \frac{1}{b} = k$$

$$h + k + i = 0 \qquad \textbf{(3.7)}$$



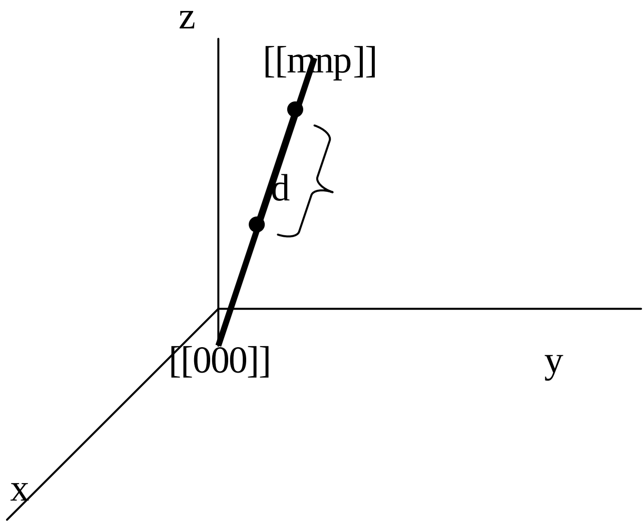


Sur. 3.2

ABC we ADO üçburçlyklaryň meňzeşliklerinden gelip çykýa aňlatmalar:

Dört indeksly usul amatlydyr, çünki ol göz-göni geksaganal kristallarda ekwiwalent tekizlikleri kesgitlemäge mümkinçilik berýär.

Indi giňişlik gözeneginde kristallografik koordinat ulgamyny guralyň we koordinatalaryň başlangyç nokadyndan düwün göniçyzyk geçireliň (Sur. 3.3).



Sur. 3.3

Şu göniçyzygyň boýunda d perioda deň aralyklarynda meňzeş düwünler ýatyr. Goý [[mnp]] – başlangyç nokadyna iň golaý düwüniň simwoly.

[[mnp]] dUwUn [[000]] dUwUn bilen bilelikde koordinatanyň baslangyç nokadyndan geçýan göniçyzygyň ugryny kesgitleýär. Düwüniň simwolyny göniçyzygyň simwoly hökmünde kabul edilýär we kwadrat skobkasynda ýazylýar: [mnp].

Bu ýerde m, n, p – bitin sanlar. [mnp] simwoly tutuşlygyna bir topar parallel düwün göniçyzyklaryny häsiýetlendirýar, sebäbi kristallarda şonyň ýaly ugurlar meňzeşdirler. Bir näçe düwün göniçyzyklaryň jemleriniň meňzeşligini görkezmek üçin <mnp> simwol görnüşinde bellik girizýärler. Meselem, kub kristallarda koordinat ugurlaryň indeksleri [100], [010], $[\bar{1}00]$, [001], $[0\bar{1}0]$, $[00\bar{1}]$ simmetriýa laýyklykda meňzeşdirler, şonuň üçin olaryň hemmesini <100> simwol bilen belleýärler.

Gaty jisimiň fizikasynda köp hadysalaryň analizinde (difraksiýa, periodik potensial meýdanynda elektronlaryň hereketi, fononlaryň dargamagy) **ters_gözenek** örän wajyp we peýdaly rol aýnaýar.

Ters gözenek – abstraksiýa düşünje, emma ol gaty jisiminde geçýän hadysalaryny ýonekeý we takykly beýan edip bilýär. Kristallyň adaty göniçyzygynyň parametrleriniň we ters gözenegiň parametrleriniň arasynda kesgitli baglanyşyklyk bardyr. Şu baglanyşyklygy tapmak üçin x, y, z koordinata sistemanyň başlangyç nokadyndan (hkl) tekizlik geçireliň (Sur. 3.4). (hkl) tekizlik üç sany koordinata tekizlikler ((100), (010), (001)) bilen bilelikde AOBC tetraedr emele getirýär. Eger tetraedriň granlarynyň meýdanlaryny $\bar{s}$ wektor bilen bellesek, onda wektor hasaplamasyna görä:

$$\bar{S}_{\Delta(hkl)} = \bar{S}_{\Delta(100)} + \bar{S}_{\Delta(010)} + \bar{S}_{\Delta(001)}$$

(3.8)

Tetraedriň göwrüminiň formulasyna laýyklykda:

$$V = \frac{1}{3} SH$$

Bu ýerden

S = 3V/H

(3.9)

(H –tetraedriň beýikligi)

O nokatdan (hkl) tekizligine perpendikulär geçirsek, onda ol tekizlikleriň arasyndaky d_{hkl} uzaklyga deň bolmaly.

“B” depeden (010) koordinata tekizligine geçirilen beýiklik – d_{010}/k, “C” depeden (001) koordinata tekizligine geçirilen beýiklik – d_{001}/l. Onda (3.8) we (3.9) aňlatmalardan gelip çykýar:

$$H = \frac{1}{d_{hkl}} = h\frac{1}{d_{100}} + k\frac{1}{d_{010}} + \ell\frac{1}{d_{001}} = ha^* + kb^* + \ell c^*$$

(3.10)

Bu ýerde a*, b*, c* - ters gözenegiň ok wektorlary.

(3.8) aňlatmanyň sag tarapyndaky granlaryň meýdanlaryny wektor köpeltme bilen çalyşan soň, alarys:

$$\frac{3v}{d_{hkl}} = \frac{1}{2}\left[\frac{\bar{b}}{k}\cdot\frac{\bar{c}}{\ell}\right] + \frac{1}{2}\left[\frac{\bar{c}}{\ell}\cdot\frac{\bar{a}}{h}\right] + \frac{1}{2}\left[\frac{\bar{a}}{h}\cdot\frac{\bar{b}}{k}\right]$$ ýa-da

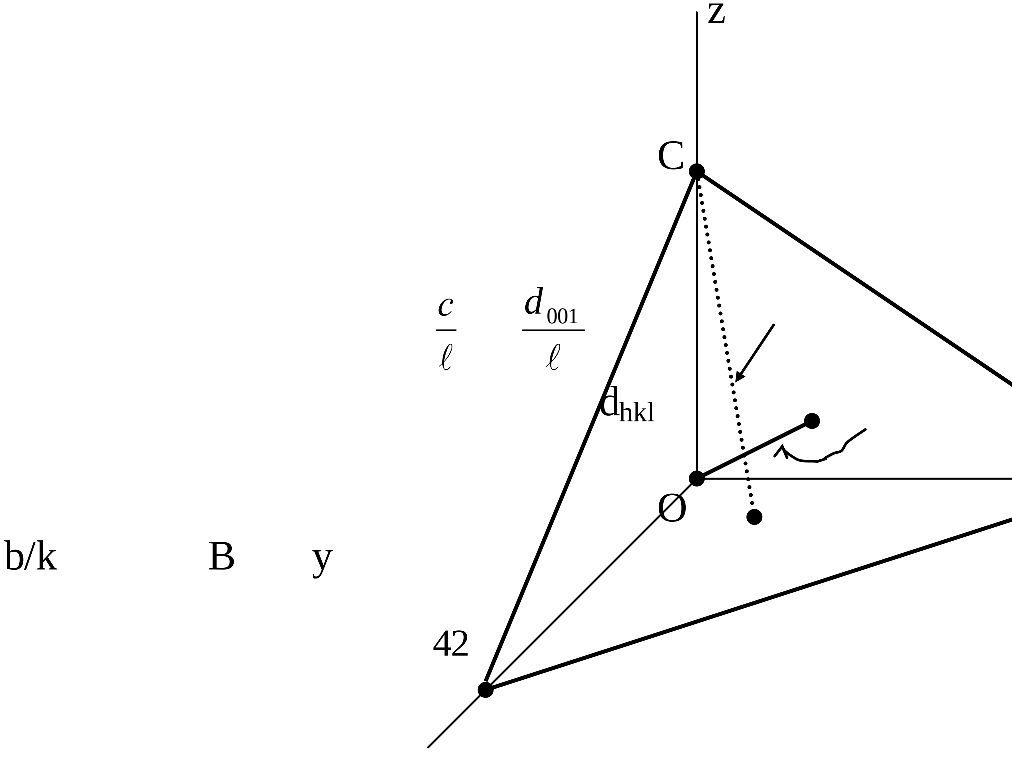
$$\frac{3V}{d_{hkl}} = \frac{[\bar{b}\cdot\bar{c}]}{k\ell} + \frac{[\bar{c}\cdot\bar{a}]}{\ell h} + \frac{[\bar{a}\cdot\bar{b}]}{hk}$$

$$6V = \bar{a}[\bar{b}\cdot\bar{c}]/(hk\ell) = V_{\text{öýj.}} / (hkl)$$

görä, ($V_{\text{öýj.}}$ - $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}$ wektorlarda gurulan elementar öýjigiň göwrümi)

$$\frac{1}{d_{hk\ell}} = h\frac{[\bar{b}\bar{c}]}{V_{oyj}} + k\frac{[\bar{c}\bar{a}]}{V_{oyj}} + \ell\frac{[\bar{a}\bar{b}]}{V_{oyj}}$$

(3.11)



a/h

A x

Sur. 3.4

(3.10) we (3.11) aňlatmalary deňeşdiren soň, getirip çykarýas:

$$a^* = \frac{1}{d_{100}} = \frac{\left[\bar{b}\,\bar{c}\right]}{V_{oyj}}; \qquad b^* = \frac{1}{d_{010}} = \frac{\left[\bar{c}\,\bar{a}\right]}{V_{oyj}};$$

$$c^* = \frac{\left[\bar{a}\,\bar{b}\right]}{V_{oyj}} \qquad \textbf{(3.12)}$$

$(\bar{a}[\bar{b}\,\bar{c}]) = (\bar{b}[\bar{c}\,\bar{a}]) = (\bar{c}[\bar{a}\,\bar{b}]) = V_{öýj}$ sebäbli, ýazmak bolar:

$$(\bar{a}\bar{a}^*) = (\bar{b}\bar{b}^*) = (\bar{c}\bar{c}^*) = 1$$

$$(\bar{b}\bar{c}^*) = (\bar{b}^*\bar{c}) = (\bar{c}\bar{a}^*) = (\bar{c}^*\bar{a}) = (\bar{a}\bar{b}^*) = (\bar{a}^*\bar{b}) = 0$$

(3.13)

(3.13) aňlatmadan gelip çykýan düzgün: $\bar{a}^*, \bar{b}^*, \bar{c}^*$ wektorlar laýyklykda $\bar{b}$ we $\bar{c}$, $\bar{c}$ we $\bar{a}$, $\bar{a}$ we $\bar{b}$ jübüt wektorlara perpendikulär, we tersine, a, b, c wektorlar $\bar{b}^*$ we $\bar{c}^*$, $\bar{c}^*$ we $\bar{a}^*$, $\bar{a}^*$ we $\bar{b}^*$ jübüt wektorlara perpendikulär- dyrlar.

Göni gözenegiň wektorlary ters gözenegiň wektorlary bilen meňzeş aňlatmalary bilen baglanyşyklydyrlar:

$$\bar{a} = [\bar{b}^*\bar{c}^*]/V^*; \qquad \bar{b} = [\bar{c}^*\bar{a}^*]/V^*;$$

$$\bar{c} = [\bar{a}^*\bar{b}^*]/V^* \qquad \textbf{(3.14)}$$

Bu ýerde V* - ters gözenegiň elementar öýjiginiň göwrümi.

(3.12) aňlatmany skalärly $\bar{a}$ wektora köpelden soň, we (3.13), (3.14) aňlatmalary göz öňüne tutyp, alarys:

$$(\bar{a}\bar{a}^*) = \frac{[\bar{b}^* \bar{c}^*]}{V^*} \cdot \frac{[\bar{b}\bar{c}]}{V_{oyj}} = 1$$

$$[\bar{b}^* \bar{c}^*][\bar{b}\bar{c}] = \begin{vmatrix} (\bar{b}^* \bar{b}) & (\bar{b}^* \bar{c}) \\ (\bar{c}^* \bar{b}) & (\bar{c}^* \bar{c}) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} = 1 \qquad \text{sebäbli,}$$

$$V^* = \frac{1}{V_{oyj}} \qquad \textbf{(3.15)}$$

Şeýlelik bilen, göni we ters gözenekler özara bir-birine baglydyrlar.

Ýönekeý kub öýjigiň ters gözenegi $\frac{1}{a}$ taraply kub elementar öýjik bilen beýan edip bolýar.

Bu ýerde a – göni öýjigiň parametri.

4. Gaty jisimlerdäki baglanyşyklaryň görnüşleri

Gaty jisimleriň klassifikasiýasy.

Kristallardaky bölejikleri deň agramlyk ýagdaýynda saklaýan güýçler garşy zarädlanan bölejikleriň (elektronlaryň we ýadrolaryň) elektrostatiki dartyş we alamaty bir bolan zarädlanan bölejikleriň (elektronlaryň we elektronlaryň, ýadrolaryň we ýadrolaryň) iteleme güýçlerdir. Magnit güýçleri bu ýerde örän kiçi, grawitasion güýçlerini bolsa göz öňüne tutmasagam boljak.

Şeýlelekde atomlaryň arasyndaky özara täsirler birinji nobatda özara täsir edýän atomlaryň elektron gatlaklarynyň gurluşy bilen kesgitlenýär.

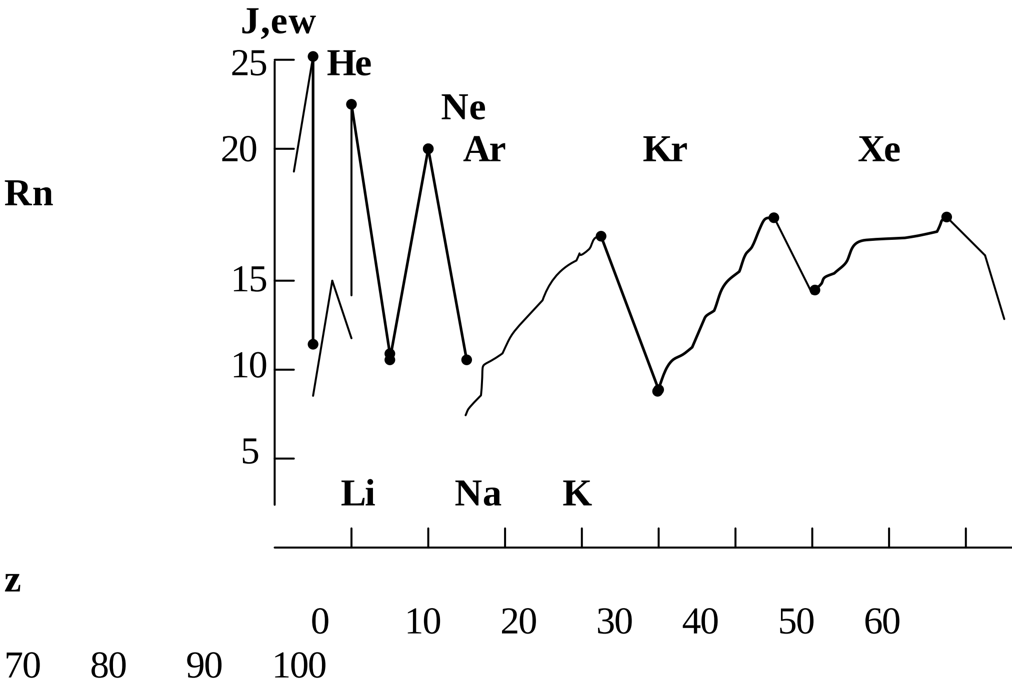
Gaty jisimleriniň klassifikasiýasynyň esasynda atomlaryň arasyndaky özara täsir güýçleriň häsiýetleri ýatyr. Şol klassifikasiýa laýyklykda gaty jisimler 4 gürnüşli kristallara bölünýärler: metalliki, kowalent, ion we molekulýar kristallar.

Başda aýdanymyza görä atomlaryň arasyndaky özara täsir güýçler özara täsir edýän atomlaryň elektron gatlaklarynyň gurluşy bilen kesgitlenýär.

Elementleriň köpüsinde atomlaryň arasyndaky baglanyşykda hemme daşky walent elektronlary gatnaşýarlar. Cu, Ag, Au ýaly elementlerde dolan d – gatlaklaryň elektronlarynyň baglanyşyk energiýalary kiçi bolan sebäbli atomlaryň arasyndaky baglanyşykda sol gatlaklaryň 1 – 2 elektronlary goşmaça gatnaşyp bilýärler. Köp sanly Walent elektronlary bolan käbir elementlerde olaryň atom bilen ýokary baglanyşyk energiýalary bolan sebäbli elektronlaryň hemmesi atomlaryň arasyndaky baglanyşyklara gatnaşyp bilmeýärler (O, F, Fe, Co, Ni we başgalary). Neýtral oýanylmadyk atomdan elektronlary goparyp aýyrmak zerur bolan energiýa birinji ionizasion potensial diýip atlanýar.

4.1-nji suratda atomlaryň birinji ionizasion potensialynyň (j) atom nomerinden (z) baglanyşygy görkezilipdir.

Grafikden J = f(z) baglanyşygyň periodik häsiýetini görüp bolýar. Aşgar metallar (Zi, Na, K, Rb, Cs) beýleki elementlere görä ionizasion potensialynyň minimal bahasyna eýedirler.



Sur. 4.1

Şu metallaryň atomlarynda ýeke walent elektron bardyr. Şol elektron doly elektron gatlagynyň daşynda ýerleşýär. Onuň üçin ol atom bilen otnositel gowşak baglydyr. Dürli reaksiýalarda bu elementler aňsatlyk bilen öz daşky elektronlaryny ýitirýärler we položitel zarädlanan – **kationlara** öwrülýärler. (Zi^+, Na^+, K^+, Rb^+, Cs^+)

Daşky walent elektronyny ýitiren soň atomlaryň elektron gatlaklary inert gazlaryň gatlaklaryna meňzeş bolýarlar. (He, Ne, Ar, Xe, Rn). Inert gazlary örän durnukly elektron gatlaklaryna eýedirler. Olaryň birinji ionizasion potensialy örän ulydyr (12-den 25ew çenli).

Inert gazlaryň öňünde galogenler ýerleşýärler (periodik sistemanyň VII toparynyň elementleri – F, Cl, Br, I). Olaryň birinji ionizasion potensiallary 10-dan 18ew çenlidir. Galogenlerde inert gazlaryndaky ýaly durnukly elektron gatlaklary emele gelmek üçin ýekeje elektron ýetmeýär, şonuň üçin olar özlerine aňsatlyk bilen elektron çekip, otrisatel ionlara - **anionlara**`` F^-, Cl^-, Br^-, I^- öwrülýärler.

Neýtral oýanylmadyk atoma elektrony birleştirenimizde ýuze çykýan energiýa atomyň elektrona **garyndaşsyrama** energiýasy diýilýär.

Galogenleriň atomlary iň ýokary garyndaşsyrama energiýa eýedirler: F – 3,4 ew, Cl – 3,6 ew, Br – 3,4 ew, I – 3,1 ew.

Ionizasion potensialy we garyndaşsyrama energiýa düşünjeler bilen başga bir düşünje – **ion walentligi** ysnyşykly baglydyr. Ion walentligi atomyň özüne çekýän ýa-da ýitirýän elektronlaryň sanyny kesgitlaýär. Mysal üçin Na atomyň walentligi + 1 deňdir, Cl atomynky bolsa – 1 deňdir. Meňzeşlik boýunça ikinji toparyň elementleriniň atomlary iki elektron ýitirip inert gazlaryndaky ýaly elektron gurluşyny emele getirýärler: Be^{2+}, Mg^{2+}, Ca^{2+}. Şonuň üçin atomlar položitel walentlige eýedirler.

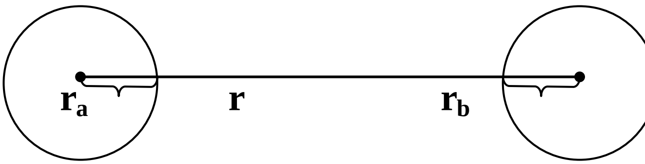
Mendileýewiň periodik sistemasynyň üçünji toparynyň elementleriniň atomlary 3 elektron ýitirip + 3 walentli ion emele getirýärler.

Bir sortly atomlaryň başga sortly atomlaryň özara täsirliklemede himiki baglanyşygyň häsiýeti olaryň walent elektronyny özine çekmek ýa-da bermek ukyby bilen kesgitlenýär. Bu ukyp atomlaryň elektrik otrisatelligi bilen häsiýetlendirilýär we X haryp bilen bellenýär:

$$X = \frac{1}{2}(J + Э) \qquad \textbf{(4.1)}$$

b) Baglynyşyk energiýasy.

Geliň indi bir birinden r aralygynda ýerleşen radiuslary r_a we r_b bolan A we B iki atoma garalyň (Sur. 4.2).

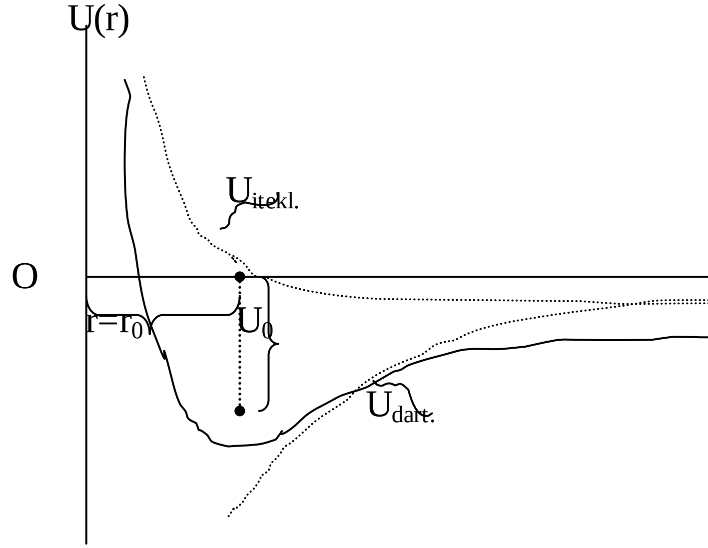


Sur. 4.2

Eger atomlar bir-birinden uzak aralykda ýerleşen bolsalar, onda olar özüni erkin elektronlar ýaly alyp barýarlar. Şonuň ýaly sistemanyň energiýasy atomlaryň energiýalarynyň jemine deňdir we görkezilen ýagdaýda nola deňdir.

Atomlaryň aralygy olaryň radiuslaryndan ep-esli uly bolsa, onda olar bir-biri bilen özara täsirlemeýärler. Eger-de atomlaryň aralygy azalýan mahalda izolirlenen atomlaryň arasynda dartyş güýç emele gelýär. Şoňa sistemanyň potensial energiýasynyň U(r) azalmaga laýyklydyr. $r = r_0$ deň bolanynda U(r) energiýa minimal baha ýetýär, bu bolsa F güýjine laýyklydyr:

$$F = -\left(\frac{dU}{dr}\right)_{r=r_0} = 0 \qquad \textbf{(4.2)}$$



Sur. 4.3

Atomlary golaýlaşdyramyžda olaryň arasynda itekleme güýçler emele gelýär. “r” aralygyň azalmagy bilen şol güýçler örän çalt ösýärler, bu bolsa sistemanyň potensial energiýasyny ulaldýar.

Diymek sistemanyň potensial energiýasy dartyş we itekleme güýçleriň energiýalarynyň jemine deňdir:

$$U(r) = U_{dart.}(r) + U_{itekl.}(r) \qquad \textbf{(4.3)}$$

4.3 suratda shema görnüşünde şol potensiallaryň we olaryň jemleýji energiýalarynyň egrileri görkezilipdir.

$r = r_0$ deň bolan ýagdaýda sistemanyň energiýasy minimal bolup durýar. Bu ýagdaýda dartyş we itekleme güýçler bir-birine deň bolýarlar.

Onda durnukly konfigurasiýaly molekula emele gelýär ($r = r_0$, $u(r) = u_0$).

Minimumyň çünligi molekullardaky atomlaryň baglanyşyk energiýasyna deňdir. Baglanyşyk ýa-da sepleşiklik energiýa sistemanyň başlangyç we gutarnykly ýagdaýlaryndaky energiýalarynyň tapawudyna deňdir:

$$u = u_1 - u_2 \qquad \textbf{(4.4)}$$

Sistemanyň başlangyç ýagdaýynda bölejikler (atomlar, molekulalar, ionlar) bir-birinden uzak aralagynda ýerleşýärler we özara täsir etmeýärler.

$$u = - u_2 \qquad \textbf{(4.5)}$$

Şeýlelekde kristallardaky baglanyşyk energiýa “r” atom aralygyndaky uzaklyga baglydyr we iki esasy çlenlere asylydyr: 1) atomlaryň arasyndaky dartyş güýçlerine (walent elektronlara bagly) we 2) kulon itekleme güýçlerine (atomlaryň içki gatlaklarynyň we ýadrolaryň arasyndaky güýçlere bagly).

Iki atomyň özara täsiriniň doly potensial energiýasy aşakdaky formuladan tapylýar:

$$U = -\frac{a}{r^m} + \frac{b}{r^n} \qquad \textbf{(4.6)}$$

Bu ýerde r – atomlaryň merkezleriniň arasyndaky uzaklyk.

a we b – hemişelikler. m > 0, n > 0 (hemişelik sanlar)

(4.6) formulada $U_{dart.} = -\frac{a}{r^m}$ dartyş potensialyny aňladýar

$U_{itekl.} = \frac{b}{r^n}$ itekleme potensialyny aňladýar.

Eger $u(r_{ij})$ bellik bilen aralyklary r_{ij} bolan iki bölejikleriň özara täsirlemelerini bellesek, onda “i” bölejigiň başga bölejikleriň hemmesi bilen özara täsiri potensial energiýasynyň bahasy deňdir:

$$U_i = \sum_{i+j} {}^{-}U(r_{ij}) \qquad \textbf{(4.7)}$$

Onda kristallyň gözeneginiň doly potensial energiýasy deňdir:

$$U = \frac{1}{2} NU_i = \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} U(r_{ij}) \qquad \textbf{(4.8)}$$

Bu ýerde N – kristalldaky bölejikleriň sany.

(4.8) formulada koeffisiýentiň bolmalygy bölejikleriň her jübütiniň özara täsir energiýasy jemlenende iki gezek göz öňünde tutmaklygyndan gelip çykýar.

Molekullär kristallar.

Molekulär kristallar ýa-da kristallik gözenekleriň düwünlerinde doýgun baglanyşykly meňzeş molekulalary bolan (N_2, Cl_2, Br_2, I_2) gaty jisimler, ýa-da inert gazlaryň atomlary (Ar, Ne, Kr, Xe, Rn) degişlidirler. Inert gazlaryň toparyna geliý (He) hem degişlidir, emma geliýniň atomlarynyň arasyndaky özara täsir güýçleri örän kiçidirler (serpeleşlik energiýasynyň ululygy $0,75 \cdot 10^{-3}$ew). Şol sebäbten geliý tä 0^oK çenli suwuklyk halyndadyr. Ony gaty hala geçirmek üçin $2,5 \cdot 10^6$Pa bolan basyş zerurdyr.

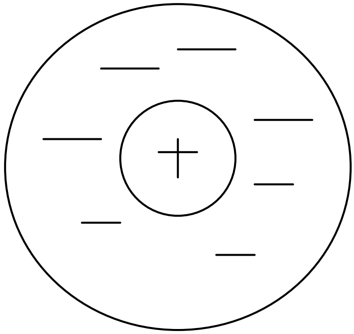
Molekulýar kristallaryň sepleşik energiýalary örän kiçidirler we 0,02 – 0,15ew deňdirler. Şol sebäbten molekulär kristallaryň eýemek temperaturalary örän pesdir (tablisa 4.1).

Tablisa 4.1

Kristall	Z – tertip nomerleri	Eremek temperaturalary $T,^0K$
Ne	10	24,5
Ar	18	83,8
Kr	36	115,9
Xe	54	161,2
Rn	86	202,1
N_2	7	27,1
F_2	9	55,1
Cl_2	17	117,2
Br_2	35	265,8
I_2	53	386,1

Wan-der-Waalsyň güýçleriniň bolandygy sebäbli neýtral atom ýa-da neýtral molekula elektrik meýdanynyň täsiri astynda polärlanýär.

Wan-der-waalsyň güýçleriniň döremegini aşakdaky pikirleriň esasynda düşündirip bolar: inert gazlaryň atomlarynda daşky elektronlar 8 elektrondan düzülen örän durnukly toparlar döredýärler (S^2P^6), şonuň üçin elektronlaryň hereket etmekligine goňşy atomlaryň bolmaklygynyň täsiri gowşakdyr.



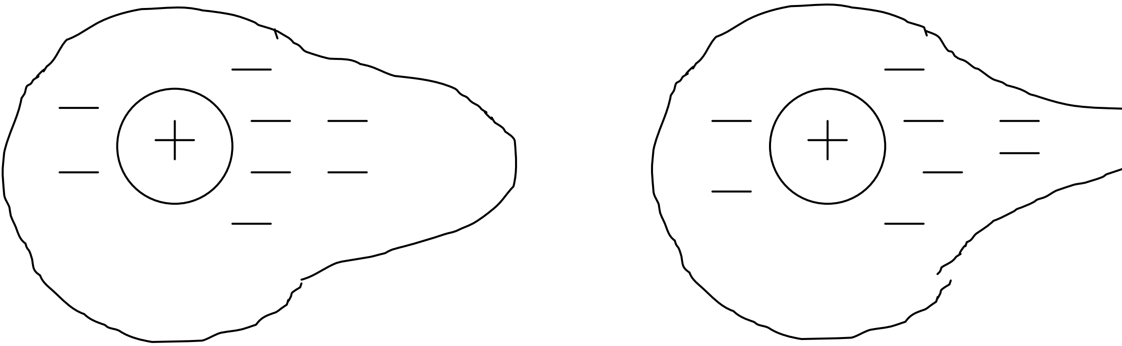
Sur. 4.4

Orta hasap bilen izolirlenen atomda zarädyň paýlanmagy sferiki simmetriýa eýedir (Sur. 4.4): položitel zaräd ähli elektronlaryň otrisatel zarädlaryna deňdir.

Şol sebäbli atom elektrik taýdan neýtraldyr, zarädlaryň merkezleri bolsa ýadronyň merkezinde ýerleşýär.

Eger şonuň ýaly iki atom bir-birinden uzakda ýerleşen bolsalar, onda olar özara täsirlemeýärler. Atomlary golaýlaşdyranymyzda belli bir pursatda atomlaryň biriniň otrisatel zarädy süýşýär, şonuň üçin položetel we otrisatel zarädlaryň merkezleri gabat gelmeýär, dipol elektrik momenti emele gelýär.

Atomyň dipol momenti beýleki atomyň merkezinde edil şonuň ýaly dipol momentini emele getirýär, başgaça aýdylanda atomlaryň zarädlary bölünýärler. Şeýlelikde, atomlar bir-birine golaýlaşanda olaryň durnukly konfigurasiýasy iki sany elektrik dipollaryna ekwiwalent bolup durýar (Sur. 4.5).



Sur. 4.5

Bir-birinden “r” aralykda ýerleşen iki meňzeş garmonik ossilätorlaryň sistemasy üçin kwant-mehaniki hasaplama 1930-nji ýylda G. London tarapyndan amala aşyryldy. Iki özara täsir edýän ossilýätorlaryň doly energiýasy olaryň aralygynyň altynjy derejesine ters proporsionaldyr:

$$\Delta U = -\hbar\omega_0 \frac{\alpha^2}{2r^6} = -\frac{a}{r^6} \qquad \textbf{(4.9)}$$

Bu ýerde ω_0- ýonekeý garmonik ossilýatoryň hususy ýygylygy.

$\hbar = \dfrac{h}{2\pi}$ - Plankyň hemişeligi.

a- hemişelik.

Atomlaryň aralygyny azaldanymyzda olaryň elektron gatlaklary bir-biriniň üstlerini örtýärler we atomlaryň arasynda itekleme güýçleri emele gelýär.

Itekleme güýçleriň potensialy

$$U_{itekl.} = b/r_n$$

Şol ýerde n =12

Dartyş güýçleriň potensialy

$$U_{dart.} = -\frac{a}{r^m}$$

Şol ýerde m = 6

Bir-birinden r_{ij} uzaklykda ýerleşen iki atomyň özara täsiriniň doly potensialy

$$U = -\frac{a}{r_{ij}^6} + \frac{b}{r_{ij}^{12}} \qquad \textbf{(4.10)}$$

Adatça elektrik neýtral atomlaryň we polärdäl molekulalarynyň özara täsirlerini beýan etmek üçin Lennard – Jonsiň potensialy ulanylýar.

$$U = 4E\left[\left(\frac{\sigma}{r_{ij}}\right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r_{ij}}\right)^{6}\right] \qquad \textbf{(4.11)}$$

Potensial (4.11) iki parametrlere baglydyr:

$$\varepsilon = \left(\frac{b}{a}\right)^{1/6} \text{ we } \sigma = \frac{a^2}{4b};$$

ε parametriň ölçeg birligi energiýanyň ölçeg birligi ýalydyr we $r_0 = 2^{1/6}\sigma$ bolan ýagdaýyndaky potensial energiýanyň minimumyna deňdir. σ parametri potensial energiýanyň nol bolan ýagdaýyndaky atom aralygyna laýyklydyr.

r_0 bahasyny (6.4) formula goýanymyzdan soň, alarys:

$$U_0 = -N\varepsilon\frac{A_6^2}{2A_{12}} = -8{,}6N\varepsilon \qquad \textbf{(4.12)}$$

Bu ýerde $A_6 = \sum_{i \neq j} \left(\frac{1}{\sigma_{ij}^6} \right)$, $A_{12} = \sum_{i \neq j} \left(\frac{1}{\sigma_{ij}^{12}} \right)$ - kristallik gözenegini bagly bolan gurluş jemleri.

$r_{ij} = r\sigma_{ij}$ (r – golaý atomlaryň arasyndaky uzaklyk)

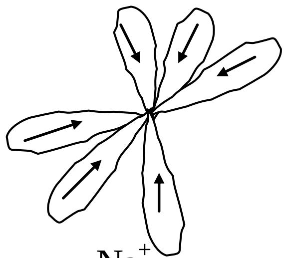
Ion kristallar.

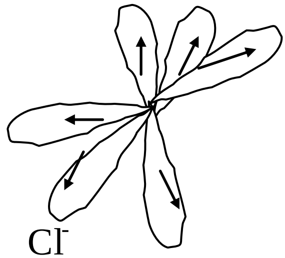
Ion kristallara himiki baglanyşygyň ion häsiýetli birleşmeler degişlidirler. Olaryň esasynda zarädlanan ionlaryň arasyndaky elektrostatiki özara täsiri ýatyr.

Ion kristallara aşgar metallaryň galogenleri, mysal üçin NaCL we CsCl degişlidirler.

Nahar duzynyň (NaCl) kristallary emele gelende galogenleriň atomlary (F, Cl, Br, I) aşgar metallaryň (Li, Na, K, Rb, Cs) walent elektronlaryny özüne çekýärler.

Şonda položitel we otrisatel ionlar emele gelýär. Olaryň elektron gatlaklary inert gazlaryň gatlaklaryna meňzeşdir (S^2P^6).





Sur. 4.6

Mysal üçin Na^+ ionyň gatlagy neonyň gatlagy ýalydyr, Cl^- ionyň gatlagy bolsa argenyňky ýalydyr.

Anionlaryň we kationlaryň dartyşmaklygynda NaCl gözenegi emele gelýar. Onuň koordinasion sany 6 deňdir. (Her bir atomyň goňşy atomlar bilen 6 walent baglanyşygy aňladýar). (Sur. 4.6).

Ion kristallarda udel elektrik garşylygy ýokary bolan dielektrikler degişlidirler.

Ion kristallaryň elektrik geçirijiligi otag temperaturasynda metallaryň elektrik geçirijiliginden 20 dereje pesdir. Ion kristallarynyň elektrik geçirijiligi esasan ionlar bilen amala aşyrylýar.

Ion kristallaryň köpüsi elektromagnit spektriň göze görünýän oblastynda durulydyrlar.

$Z_1\ell$ we $Z_2\ell$ zarädly ionlardan düzülen we bir-birinden r_{ij} aralykda ýerleşen iki ionlaryň özara täsir energiýasynyň aňlatmasy iki sany çlendan ybaratdyr:

$$U_{ij} = \pm \frac{Z_1 Z_2 \ell^2}{r_{ij}} + \frac{b}{r_{ij}^n} \qquad \textbf{(4.13)}$$

Bu ýerde birinji çlen dartyş güýçleriň potensialyna laýyklydyr, ikinji bolsa – itekleme güýçleriň potensialyna:

Eger $r_{ij} = r_{ij}$ deň bolsa ($r = r_a + r_k$ – golaýda ýerleşen ionlaryň aralygy), onda $i \neq j$ ýagdaýda hemme ionlar boýunça jemläp, "i" ionyň galan ionlar bilen özara täsir energiýasyny alarys:

$$U_i = -\frac{AZ_1 Z_2 \ell^2}{r} + \frac{B}{r^2} \qquad \textbf{(4.14)}$$

A gurluş jemi **Madelungyň hemişeligi** diýip atlanýar. Ol koordinasion sana we kristallik gözenegiň tipine baglydyr. + ýa-da – alamatlary laýyklykda pojožitel we otrisatel ionlara degişlidirler.

2N ionlardan düzülen kristallyň gözeneginiň u(r) doly energiýasy aşakdaky formuladan tapylýar:

$$U(r) = NU_i = -N\left(\frac{Z_1Z_2\ell^2A}{r} - \frac{B}{r^n}\right)$$

(4.15)

Bu ýerde N – ion jübütleriň sany.

Deň agramlyk ýagdaýynda ($r = r_0$) U(r) energiýa minimaldyr.

$$\left(\frac{dn}{dr}\right)_{r=r_0} = N\left(\frac{Z_1Z_2\ell^2A}{r_0^2} - \frac{nB}{r_0^{n+1}}\right) = 0$$

$B = \frac{Z_1Z_2\ell^2A}{n} r_0^{n-1}$ bahasyny (7.8) goyanymyzdan soň, bir ion jübütine gelýän ion kristallyň sepleşik energiýasy aşakdaky formuladan tapylýar:

$$U(r_0) = -\frac{Z_1Z_2\ell^2A}{r_0}\left(1 - \frac{1}{n}\right) \qquad \textbf{(4.16)} –$$

Born-Landeniň formulasy.

Teoriýa boýunça hasaplanan we ekseriment boýunça tapylan energiýalaryň tapawudy takmynan 3% deňdir.

Şu sany biz azaldyp bileris eger-de (4.15) formulada Bornuň dereje potensialy ulansak:

$$U_{itekl.} = b\ell^{-r/\rho}$$

Bu ýerde ρ - koeffisiýent.

Onda kristallyň energiýasy asakdaky görnüşde ýazylýar:

$$U(r) = -N\left(\frac{Z_1Z_2\ell^2A}{r} - B\ell^{-r/\rho}\right) \qquad \textbf{(4.17)}$$

$r = r_0$ ýagdaýynda alynýan önüm.

$$\left(\frac{dn}{dr}\right)_{r=r_0} = N\left(\frac{Z_1 Z_2 \ell^2 A}{r_0^2} - \frac{1}{\rho} B \ell^{-r_0/\rho}\right)$$

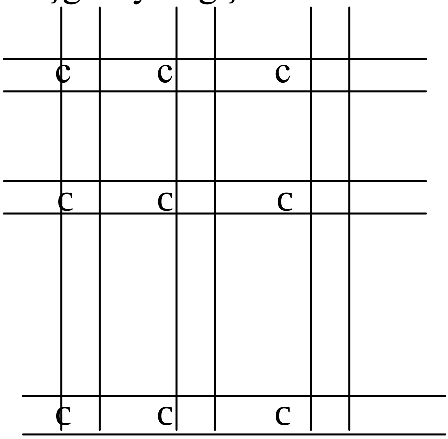
Mundan soň kristallyň sepleşme energiýasy

$$U(r_0) = -\frac{Z_1 Z_2 \ell^2 A}{r_0}\left(1 - \frac{\rho}{r_0}\right) \qquad \textbf{(4.18)}$$ – Born-Meýeriň formulasy.

Kowalent kristallary.

Kowalent kristallara kowalent baglanyşygy esasynda dörän gaty jisimler degişlidirler.

Şol gaty jisimlere almaz, kremniý, germaniý, çal galaýy we başgalary degişlidirler.

a) 

b) H = H

Wodorod

Almaz

Sur. 4.7

Gomopolýar molekulardaky yaly(H_2, Cl_2, I_2) kowalent baglanyşygy alyş-çalyş elektron atomlaryň arasyndaky özara täsiri bilen düşündirilýär. Birinji suratda almazyň gurluşyndaky (Sur. 4.7a) we wodorodyň molekulasyndaky (Sur. 4.7b) kowalent baglanyşygy görkezilipdir.

Uglerodyň her bir atomy baglanyşyga öziniň 4 sany walent elektronyny berýär. Wodorodyň molekulasynda wodorodyň her bir atomy baglanyşyga bir sany elektron berip, lokalizlenen baglanyşygy döredýär.

Izolirlenen ýagdaýynda wodorodyň atomynyň daşgy gatlagynda $1S^1$ elektron bardyr. Geliý inert gazyndaky ýaly doly elektron gatlagy emele gelmek üçin oňa ýeke-täk elektron ýetmeýär. Wodorodyň iki sany atomy bir-birine ýakynlaşanda olaryň elektron gatlaklary bir-biriniň üstini örtüp, bir atomyň beýleki atomyň orbitasyna geçmekligine mümkinçilik berýärler.

Eger iki özara täsir edýän atom sistemasynyň üst örtülýän ýagdaýyndaky energiýa izolirlenen (atomlar bir-birinden uzak aralykda ýerleşýärler) kiçi bolsa, onda sistemada dartyş güýçleri ýuze çykýarlar, soňra bolsa (atomlar bir-birine ýakynlaşanda) ýagdaýlaryň itekleme güýçleri bilen çalyşýarlar.

Sistemanyň minimal energiyasyna laýyklykdaky ýagrolaryň arasyndaky uzaklykda dartyş güýçleri itekleme güýclere deň bolýarlar we H_2 molekula emele gelýär. Şol molekulanyň elektron gatlagy geliýiňki ýalydyr. Şonuň ýaly molekulada wodorodyň atomlary ýok, onuň diňe atomlaryň düzümindäki bölejikleri bar – 2 proton we 2 elektron. Elektronlar iki ýadrolar bilen umumylaşýarlar.

Umumylaşan elektronlaryň tertibiniň meselesini çözmek üçin Şredingeriň stasionar halyndaky ulgamy beýan edýän deňlemesine seredeliň:

$$\hat{H}\psi = \varepsilon\psi \qquad \textbf{(4.19)}$$

Bu ýerde $\hat{H} = \hat{K} + U$ Gamiltonyň operatory.

$\hat{K}$ - kinetik energiýanyň operatory.

U – ulgamyň potensial energiýasy.

E – ulgamyň doly energiýasy.

(4.19) deňlemäniň iki bölejiginiň sopräžonly ψ* funksiýa köpeldip we göwrüm boýunça integrirläp, alýarys:

$$\varepsilon = \frac{\int \psi^* \ddot{H}\psi dV}{\int \psi^* \psi dV} \qquad \textbf{(4.20)}$$

(4.20) deňlemede ulgamyň gamiltoniýany $\hat{H}$ bellidir. Energiyany hasaplamak üçin ψ tolkun funksiýany tapmaly.

Iki sany “a” we “b” izolirlenen atomlary üçin

$\Psi = c_a\,\psi_a + c_b\,\psi_b = N(\psi_a + \lambda\psi_b)$;

$$N = c_a; \qquad \lambda = \frac{c_b}{c_a}; \qquad \textbf{(4.21)}$$

Bu ýerde ψ_a we ψ_b – atom tolkun funksiýalary.

C_a we C_b – atom orbitalarynyň molekulär tolkun funksiýasynda gatnaşan bölegini häsiýetlendiren hemiselik koeffisiýentleri.

Tolkun funksiýanyň normirowka şertinden:

$$\int_{\vartheta} |\psi|^2 \, в\vartheta = 1 \qquad \textbf{(4.22)}$$

tapýarys:

$$C_a^2 + 2CaCbS + C_b^2 = 1 \qquad \textbf{(4.23)}$$

Bu ýerde $S = \int_{\upsilon} \phi_a \phi_b d\upsilon$ - atom tolkun funksiýalarynyň özara täsirlerinde örtülmekligiň derejesini häsiýetlendiren integral.

(4.21) molekulär tolkun funksiýasyny (4.20) deňlemä goysak, ulgamyň energiýasy üçin alarys:

$$\varepsilon = \frac{C_a^2 E + 2C_a C_b A + C_b^2 E}{C_a^2 + 2C_a C_b S + C_b^2} \qquad \textbf{(4.24)}$$

$$E_a = \int_{\vartheta} \psi_a^* \hat{H} \psi_a d\vartheta; \qquad E_b = \int_{\vartheta} \psi_b^* \hat{H} \psi_b d\vartheta$$

(4.25)

elektronlaryň ýadrolar bilen, elektronlaryň bir-biri bilen we ýadrolaryň bir-biri bilen elektrostatiki özara täsirine laýyklykdaky energiýalar.

$$A = \int_{\vartheta} \psi_a^* \hat{H} \psi_b d\vartheta = \int_{\vartheta} \psi_b^* \hat{H} \psi_a d\vartheta$$ - çalyş integraly.

Energiýanyň minimal bahasyny (8.6) deňlemeden E ululygyny C_a we C_b parametrleri boýunça üýtgedip, tapyp biolýar:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial c_a} = 0; \qquad \frac{\partial \varepsilon}{\partial c_b} = 0 \qquad \textbf{(4.26)}$$

Şondan soň C_a we C_b koeffisiýentlere görä çyzykly deňlemeleriň sistemasyny ýazyp

$$(Ea - E)Ca + (A - ES)Cb = 0$$

$$(A - ES)Ca + (Eb - E)Cb = 0 \qquad \textbf{(4.27)}$$

(4.27) deňlemeleriň sistemasyny çözüp bolýar, eger determinant

$$\Delta = \begin{vmatrix} (E_a - E) & (A - ES) \\ (A - ES) & (E_b - E) \end{vmatrix} = 0 \qquad \textbf{(4.28)}$$

Gelip çykýan aşakdaky deňlemeden E energiýany kesgitläp bolýar:

$$(E - E_a)(E - E=) - (A - ES)^2 = 0 \qquad \textbf{(4.29)}$$

Iki atomly molekula üçin ($E_a = E_b$) $\lambda = \frac{C_b}{C_a}$ bellesek, (4.27) deňlemeden alarys:

$$x^2 = 1 \quad \text{ýa-da } \lambda = \pm 1$$

$\lambda = \pm 1$ baha simmetrik tolkun funksiýasyna laýyklydyr.

$$\psi_{sim.} = \psi_a + \psi_b \qquad \textbf{(4.30)}$$

$\lambda = -1$ baha antisimmetrik tolkun funksiýasyna layyklydyr

$$\psi_{antisim.} = \psi_a + \psi_b \qquad \textbf{(4.31)}$$

(4.30) we (4.31) deňlemeden $\psi_{sim.}$ We $\psi_{antisim.}$ funksiýalaryna laýykly energiýalary tapyp bolýar:

$$E_1 = U_{sim.} = \frac{E_a + A}{1 + S} \quad \text{we} \quad E_1 = U_{antisim.} = \frac{E_a + A}{1 + S}$$

$$\textbf{(4.32)}$$

Wodorodyň molekulasyndan kristallara geçenimizde bir zady bellemek zerurdyr: kowalent kristallaryn aýratynlygy aşakdakydandyr: kowalent baglanyşyklaryň sany atomyň daşky elektronlarynyň erkin ýagdaýdaky bolan sanyna ýa-da oýanmadyk walent halyndaky sanyna deňdir.

Metallar.

Metallaryň örän gyzykly aýratynlyklary bardyr. Şu aýratynlyklara ýokary elektrik geçirijilik, metaliki ýalpyldy, ýokary ýylylyk geçirijilik, ýokary süýgeşiklik we başgalar degişlidirler. Metallaryň udel elektrik geçirijiligi otag temperaturada 10^6 – 10^8 $Om^{-1}m^{-1}$ deňdir. Metal däl materiallarda, mysal üçin, kwarsda elektrik geçirijilik 10^{24} esse metalla görä kiçidir. Metallaryň elektrik geçirijiligi temperaturanyň artmagy bilen peselýär.

D. J. Mendeleyewiň periodik sistemasyndaky 105 elementden diňe 19 metal däldir.

Metalliki baglanyşyk dasky walent elektronlaryň yadro bilen örän gowsak özara täsirlenen atomlarda ýüze çykýar.

Metallarda atomlaryň daşky walent elektronlary umumylasandyrlar we ionlaryň arasyndaky giňişligi gaz ya-da suwuklanan ionlar otrisatel zarädlanan elektron gaz tarapyndan çekilýär.

Aşgar metallary üçin položitel ionlaryň we otrisatel zarädlanan elektronlaryň arasyndaky kulon dartyş energiýa aşakdaky görnüşde beyan edip bolýar:

$$U_{dart.} = -\frac{24,35}{(r_s / a_0)}\left[\frac{ew}{atom}\right] \qquad \textbf{(4.33)}$$

Bu ýerde $a_0 = 0,529 \cdot 10^{-10}$ – Boruň radiusy.

$$r_s = \left(\frac{3}{4\pi n}\right)^{1/3}$$ - sferznyň radiusy.

$$n = \frac{N}{n}$$ - umumylaşan elektronlaryň sany.

Bir walentli asgar metallary üçin orta kinetik energiýa

$$U_{kin.} = \frac{3}{5}E_f = \frac{30{,}1}{(r_s / a_0)^2} \qquad \textbf{(4.34)}$$

Bu ýerde $E_f = \frac{\hbar^2}{2m}(3\pi^2 n) = \frac{\hbar^2}{2m}\frac{1}{\left(\frac{r_s}{a_0}\right)^2 a_0^{\ell}}\left(\frac{9\pi}{4}\right)^{2/3}$ - Ferminiň energiýasy.

Uitekl. We Ukin. Energiýalaryndan başga kristallyň energiýasynyň formulasynda ýene-de elektron-elektron özara täsirini göz öňüne tutmaly:

$$U_{el.} = -\frac{12{,}5}{(r_s / a_0)} \qquad \textbf{(4.35)}$$

Şeýlelikde asgar metallary üçin sepleşme energiýasy üç çleniň jemine deňdir:

$$U = U_{dart.} + U_{kin.} + U_{el.} = \frac{30{,}1}{(r_s / a_0)^2} - \frac{36{,}8}{(r_s / a_0)}$$

(4.36)

Deň agramlyk ýagdaýda (4.36) deňlemeden alarys: $r_s/a_0 = 1{,}6$

Eksperiment 2-den 6-çenli sifra berýär. Şunyň sebäbi metallyň ion modeliniň gödektiligi bilen düşündirilýär.

Metallarda erkin elektronlar olaryň diňe elektrik, magnit we başga häsiyetlerini däl-de, eýsem kristallik gurluşyny kesgitleýärler.

Kristallik gurluşa görä şol bir element metall, ýarymgeçiriji ýa-da dielektrik bolup bilýär.

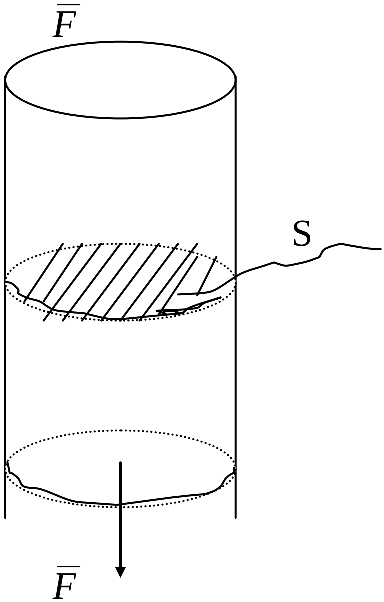
Mysal üçin, ak galaýy – metalldyr, çal – ýarymgeçirijidir, uglerod almaz görnüşinde dielektrikdir, grafit görnüşinde bolsa metallik häsiýetini ýüze çykarýar.

5. Kristallik gözenegiň yrgyldylary we fononlar

Gaty jisimleriň mehaniki häsiyetleri olaryň käbir daş ky faktorlaryň (gysylma, süýnme, egilme, towlanma, urgy) täsirine bolan reaksiýalarydyr.

Gaty jisimleriň mehaniki häsiýetleri birinji nobatda atomlaryň we molekulalaryň arasyndaky baglanyşyk güýçleri bilen kesgitlenýär. Berlen mehaniki häsiýetleri almak – häzirki zaman gaty jisim fizikasynyň esasy ugurlarynyň biridir.

Eger jisim daşky güýçleriň täsiri astynda bolsa, onda onuň her bir nokadynda



Sur. 5.1

mehaniki naprýaženiýe döreýär. Şu ýagdaýda gaty jisim dartgynly ýagdaýda bolýar diýip aýdýarlar.

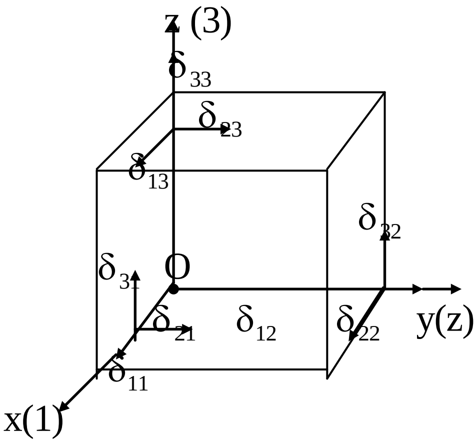
Naprýaženiýe ýa-da has takygy mehaniki naprýaženiýe diýip jisime täsir edýän F güýjiň modulynyň onuň S kese-kesiginiň meýdanyna bolan gatnaşygyna aýdýarlar: (Sur. 5.1).

$$\delta = \frac{F}{S} \qquad \textbf{(5.1)}$$

JS-de naprýaženiýe birligi deregine, basyş üçin bolşy ýaly, $1P_a = 1N/m^{\ell}$ kabul edilýär.

Dartgynly ýagdaýy beýan etmek üçin jisimiň hemme nokatlarynda naprýaženiýe bir jynslydyr biýip hasap edeliň.

Şu jisimiň göwrüminde islendik “O” nokat alyp, şonuň töwereginde tükeniksiz kiçi kub guralyň (Sur. 5.2)



Sur. 5.2

“j” okyna perpendikulär bolan “i” ugry boýunça kubyň gyrasyna täsir edýän naprýaženiýeniň komponentini δ_{ij} haryp bilen belläliň.

δ_{11}, $\delta_{22,}$ δ_{33} – normal (süýnme ýa-da gysylma) naprýaženiýelerdir, $\delta_{12,}$ δ_{21}, δ_{23} - galtaşýan (süýşme) naprýaženiyelerdir. Şeýlelikde nokatdaky dartgynly ýagdaý δ_{ij} dokuz ululyklar bilen häsiýetlendirilýär. Olar ikinji rangly tenzoryň komponentleridir:

$$T_{dartg.} = \begin{vmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \delta_{13} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \delta_{23} \\ \delta_{31} & \delta_{32} & \delta_{33} \end{vmatrix}$$

Deň agramlyk ýagdaýda $\delta_{23} = \delta_{32}$, $\delta_{31} = \delta_{13}$, $\delta_{12} = \delta_{21}$. Onda 9 komponentden diňe altysy bir-birine bagly däl.

Şonuň üçin tenzoryň baş diagonalyna simmetrik bolan komponentler deňdirler ($\delta_{ji} = \delta_{jj}$).

Gaty jisimler formasyny saklaýarlar, emma özlerine goýlan güýçleriň täsiri astynda jisimleriň formasy üýtgeýär, ýagny deformasiýa döreýär. Jisimiň formasynyň ýa-da göwrüminiň üýtgemegine **deformasiýa** diyilýär.

Rezin ýüpi uçlaryndan tutup süýndüriň. Ýüpiň bölekleriniň biriniň beýlekisine görällikde süýşýändigi aýdyňdyr: ýüp deformirlener – uzalar we inceler. Jisimiň dürli bölejikleri güýçleriň täsiri astynda orunlaryny birmeňzeş üýtgetmänlerinde mydama deformasiýa doreýär.

Ýüp özine edilýän güýçleriň täsiri kesilenden soň ilkibaşdaky halyna gaýdyp gelýär. Daşky güýçleriň täsiri kesgitlenden soň doly ýok bolup gidýän deformasiýalara maýyşgaklyk deformasiýalary diýilýär. Rezin ýüpden başga-da, pružin, polat şarjagazlar çaknyşanda we şolara meňzeş maýyşgaklyk deformasiýasyna sezewar bolýarlar.

Indi plastilin bölejigini gysyň. Siziň eliňizde ol islendik formany aňsatlyk bilen alar. Plastiliniň başdaky formasy öz-özünden gaýdyp gelmez. Özüniň öňki formasynyň nähilidigi plastiliniň “ýadyna düşmez”.

Daşky güýçleriň täsiri kesilenden soň ýok bolup gitmeýän deformasiýalara süýgeşiklik (plastik) deformasiýalar diyilýär.

Uly bolmadyk (emma gysga wagtlaýyn däl) täsirlerde mum, toýun, gurşun we başgalar süýgeşiklik deformasiýasyna sezewar bolýarlar.

Eger bir ujy berkidilen bir jynsly sime okunyň ugruna tarap $\overline{F}$ güýç goýulsa, onda sim süýnme deformasiýasyn asezewar bolýar (Sur. 5.3). Süýnme deformasiýasyny

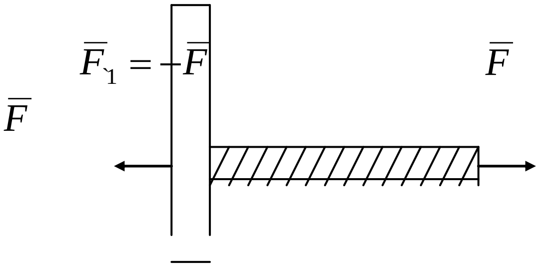
$\Delta\ell = \ell = \ell_0$ **(5.2)** absolüt uzalma we

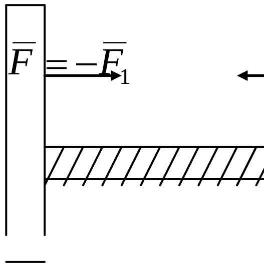
$$\varepsilon = \frac{\ell - \ell_0}{\ell_0} = \frac{\Delta\ell}{\ell} \qquad \textbf{(5.3)}$$ otnositel uzalma

bilen häsiýetlendirýärler.

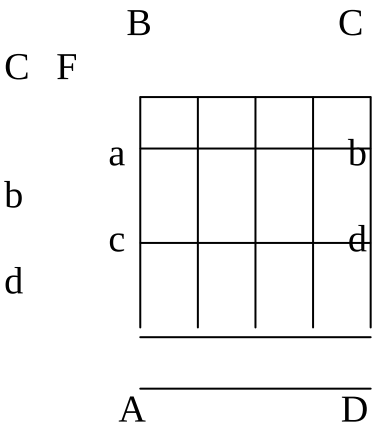
Bu ýerde ℓ_0 - simiň başdaky uzynlygy.

ℓ - ahyrky uzynlygy.

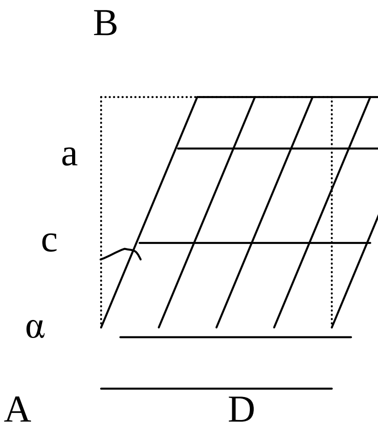




Sur. 5.3 **Sur. 5.4**



a)



b)

Sur. 5.5

Kiçi süýnmelerde ($\Delta\ell<<\ell_0$) jisimleriň köpüsiniň deformasiyasy maýyşgakdyr.

Eger şol sime berkidilen ujina tarap $\overline{F}$ güýç bilen täsir edilse (Sur. 5.4), onda sim gysylma deformasiýasyna sezewar bolýar. Şu halda göräli deformasiýa otrisateldir: E < 0.

Süýnmek ýa-da gysylmaga jisimiň kese kesiginiň meýdany üýtgeýär. Muny metal halka geýdirilen rezin turbajygy süýndirip ýüze çykarmak bolýar. Ýeterlik gaty süýndirilende halka aşak gaçýar. Gysylanda, tersine, jisimiň kese kesiginiň meýdany ulalýar.

Indi ýüzüne gorizontal we wertikal çyzyklar çyzylan kub ýa-da parallelepiped görnüşinde rezin jisimi alalyň (Sur. 5.5a). Jisimiň ýokarsyna gorizontal güýç goýalyň (Sur. 5.5b). Jisimiň ab, cd we şolara meňzeş gatlaklary parallelligine galyp, süýşerler, wertikal granlary bolsa, tekizligine galyp, α burça gyşarýarlar.

Jisimleriň gatlaklarynyň bir-birine göräli süýşmesi bolup geçýän deformasiýa süýşme deformasiýasy diýýärler.

Eger $\overline{F}$ güýç iki esse ulaldylsa, onda α burç hem iki esse ulalýar. Maýyşgak deformasiýalarda φ süýşme burçynyň F goýlan güýjüň modulyna göni proporsionaldygyny tejribeler görkezýär.

Mälim bolşy ýaly, kristallar-atomlary ýa-da molekulalary giňişlikde kesgitli, tertipli ýagdaýda bolýan gaty jisimlerdir, şoňa görä-de kristallaryň tekiz granlary bardyr.

Dogry daşky forma kristalyň tertipli gurluşyň ýeke-täk we hatda iň esasy netijeleriň kristalda saýlanyp alnan ugra bagly bolmagydyr.

Kristallaryň mehaniki berkliginiň bölejigi ugurlaryň birinde ýukajyk gatlaklara perpendikulýar bolan ugurda döwmek has kyndyr.

Fiziki häsiýetleriň kristalyň içindäki ugurlara bagly bolmagyna **anizotropiýa** diýilýär. Ähli kristallik jisimler anizotropdyrlar.

Eger uly bölek metal alynsa, onda göräýmege onuň kristallik gurluşy bölegiň daşky görnüşindede, onuň fiziki häsiýetlerindede birbada ýüze çykmaýar. Adaty ýagdaýda metallarda anizotropiýa bolmaýar.

Bu ýerde ýagdaý, adatça metalyň kiçijik kristallaryň bir-biri bilen bitişen ägirt köp mukdaryndan düzülýändiginden ybaratdyr. Her bir kristalyň häsiýeti ugurlara baglydyr, emma kristallar bir-birine görä tertipsiz ýerleşendirler. Netijede kristallaryň göwrüminden ep-esli uly bolan göwrümde metallaryň içindäki ugurlar deňhukuklydyrlar we metallaryň häsiýetleri ähli ugurlar boýunça birmeňzeşdir (izotropdyr).

Kiçijik kristallaryň köp sanyndan ybarat bolan gaty jisime **polikristallik** jisim diýilýär. Ýeke-täk kristallara **monokristallar** diýilýär.

Sim görnüşdäki polikristal gaty jisimiň süýnme deformasiýasyny derňemek üçin ýörite gurluşlaryň kömegi bilen ony süýnmeklige sezewar edýärler, soňra bolsa ony nusganyň uzalyşyny we onda döreýän naprýaženiýani ölçeýärler. Geçirilen tejribeleriň netijeleri boýunça naprýaženiýaniň süýnme diagrammasy diýen ady alan “E” otnositel uzalma bolan baglylyk grafigini çyzýarlar

Kiçi deformasiýalarda naprýäženiýäniň E otnositel uzalma göni proporsionaldyr (diogrammanyň OA uçastogy).

Bu netijä ilkinligezek 1678 ýylda R. Guk gelipdir. Onuň kesgitlemesine görä izotrop jisimlerde deformasiýa goýulan naprýäženiýä göni proporsionaldyr (Gukuň kanuny):

$$\delta = |\varepsilon| E \qquad \textbf{(5.4)}$$

(5.4) formulada $E = \frac{\Delta\ell}{\ell}$ otnositel uzalma modul boýunça alnan, çünki Gukuň kanuny süýnme deformasiýasy üçin dogry bolşy ýaly, $\varepsilon < 0$ bolanda gysylma deformasiýasy üçin hem dogrudyr.

Gukuň kanunyna girýän E proporsionallyk koeffisiýentine **maýyşgaklyk** moduly ýa-da Ýunguň moduly diýilýänr. Kiçi deformasiýalarda δ naprýäženiýäni we ε otnositel uzalmany ölçäp, (5.4) formula boýunça Ýunguň modulyny kesgitleýärler.

Giň ýaýran materiallaryň köpüsi Ýunguň moduly eksperimental ýol bilen kesgitlenendir. Meselem, hromnikel polady üçin $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Pa, alüminiý üçin $E = 7 \cdot 10^{10}$ Pa. Ýunguň moduly näçe uly bolsa, beýleki deň şertlerde (F, S, ℓ_0 birmeňzeş bolanda) sim şonça-da az deformirlenýär.

Ýunguň moduly süýnme ýa-da gysylma maýyşgaklyk deformasiýasynda materialyň görkezýän garşylygyny häsiýetlendirýär. (5.4) formulada $\delta = \frac{F}{S}$ we $\varepsilon = \frac{|\Delta\ell|}{\ell_0}$ bahalary ornunda goýup, alarys:

$$\frac{F}{S} = E\frac{|\Delta\ell|}{\ell_0}$$

Bu ýerden

$$F = \frac{SE}{\ell_0}|\Delta\ell| \qquad \textbf{(5.5)}$$

$\frac{SE}{\ell_0} = K$ bilen belgiläliň, onda

$$F = K\,|\Delta\ell| \qquad \textbf{(5.6)}$$

Şeýlelikde, simiň “K” berkligi Ýunguň modulynyň simiň kese kesiginiň meýdanyna köpeltmek hasylyna göni proporsionaldyr we onuň uzynlygyna ters proporsionaldyr.

Gukuň kanuny başga görnüşde-de ýazyp bolýar:

$$\delta = C\varepsilon \qquad \textbf{(5.7)}$$

Bu ýerde $C = \frac{1}{S}$ - gatylygyň maýyşgaklyk hemişeligi.

Uly bolmadyk deformasiýalarda, diýmek, käbir çäkden ýokaryk geçmeýän naprýäženiýelerde Gukuň kanunynyň ýerine ýetýändigini biz eýýäm aýdypdyk. Gukuň kanuny entek ýerine ýetýän mahalynda maksimal naprýäženiýä (Sur. 5.5) **proporsionallyk çägi** diýýärler.

Eger ýük ulaldylsa, onda deformasiýa çyzykly däl bolýar, naprýäženiýe bolsa otnositel uzalma bolan göni proporsionallygyny bes edýär. Muňa garamazdan, uly bolamadyk çyzykly däl deformasiýälarda ýük aýrylandan soň jisimiň formasy we ölçegleri praktiki taýdan öňki ýagdaýyna gelýär (diagrammanyň AB uçastogy). Galyndy deformasiýa heniz aýdyň ýüze çykmadyk mahalyndaky maksimal naprýäženiýä (otnositel galyndy deformasiýasy

0,1 %-den ýokaryk geçmeýär) δ maýyşgaklyk çägi diýýärler.

Monokristall anizotrop gaty jisimler üçin Gukuň kanunyny şeýle ýazyp bolar:

$$\delta_{ij} = C_{ijkl}\varepsilon_{kl} \qquad (5.8)$$

Bu ýerde C_{ijkl} – kristallyň gatylygynyň hemişeligi, ε_{ij} we δ_{ij} – laýyklygynda kristallyň deformasiýa we naprýaženiýe tenzorynyň komponentleri. ε_{ij}-iň sany 9 deň we δ_{ij}-iň sany 9 deň. Onda jemi C_{ijkl}-niň 81 sany komponentasy bolup biler.

Eger indi daşky ýük materialdaky naprýäženiýe maýyşgaklyk çäginden ýokary geçse, onda ýük aýrylandan soň nusga azrak gysgalan hem bolsa, ol öňki ölçeglerini almaýär, deformirlenen bolup galýar.

Ýük artdygyça deformasiýa barha çalt ulalýar. Diagrammadaky C nokada degişli naprýäženiýäniň käbir bahasynda praktiki taýdan ýük artdyrylmasa-da uzalma ösýär. Bu hadysa materialyň akyjylygy diýýärler(CD - uçastok). Diagrammadaky egri çyzyk şonda gorizontal diýen ýaly gidýär.

Şondan soň deformasiýanyň ulalmagy bilen naprýäženiýe egri çyzygy birneme ulalyp başlaýar we E nokatda maksimuma ýetýär. Soňra naprýäženiýe birden pese düşýär we nusga berbatlanýar (K nokat).

Şeýlelikde, naprýäženiýe berklik çägi diýilýän δ_b maksimal baha ýetenden soň üzülmeklik bolup geçýär (nusga daşgy ýük ulalmazdan, tä berbat bolýança süýnýär). Ol ululyk nusganyň materialyna we onuň işleniş hiline baglydyr.

Eger desgalar ýa-da konstruksiýalar ulanylanda olarda ýüze çykýan naprýäženiýeler berklik çäginden bir näçe esse kiçi bolsa, onda olar ygtybarlydyrlar.

Gaty jisimiň süýnüşiniň (gysylmasynyň) derňemek Gukuň kanunyndaky baglydygyny takyklamaga mümkinçilik berýär. Eksperimental ýol bilen alnan süýnme diagrammasy materialyň mehaniki häsiýetleri baradaky maglumaty ýeterlik doly berýär we onuň berkligine baha bermäge mümkinçilik berýär.

Plastiliniň, toýunyň ýa-da gurşunyň maýyşgaklyk deformasiýa oblasty kiçidir. Ujypsyz ýüklerde süýgeşiklik deformasiýalar döreýän materiallara süýgeşiklik (plastik) materiallary diýilýär.

Döreýän naprýäženiýelere baglylykda şol bir material özüni ýa-da maýyşgak ýaly, ýa-da süýgeşikli ýaly alyp barýar. Meselem, örän uly naprýaženiýelerde polat süýgeşiklik häsiýetleri üýze çykarýar. Bu bolsa örän uly agram döredýän desgalaryň kömegi bilen önümler ştamplananda giňden peýdalanylýar.

Sowuk polady ýa-da demri çekiç bilen ýençgiläp süýndürmek kyn bolýar. Emma gaty gyzdyrylandan soň ýençgiläp, olara islendik formany bermek aňsatdyr.

Otag temperaturasynda plastik bolan gurşun 1000C-den aşak temperaturada sowadylanda, ol aýdyň ýüze çykýan maýyşgaklyk hasiýetlere eýe bolýar.

Gaty jisimleriň mayyşgaklyk we süýgeşiklik häsiýetlerine baglanyşyk güýçleriň häsiýeti örän uly täsir edýär.

Kowalent kristallar (almaz, kremniý, germaniý) otag temperaturada gaty we portlu bolýarlar. Ion kristallar olara görä süýgeşikliräk, metallar bolsa beter süýgeşiklidirler: olarda dislokasiýalar erkin hereket edýärler.

Ideal we real kristallaryň mehaniki häsiýetlerini aşakdaky tablisadan görüp bolar:

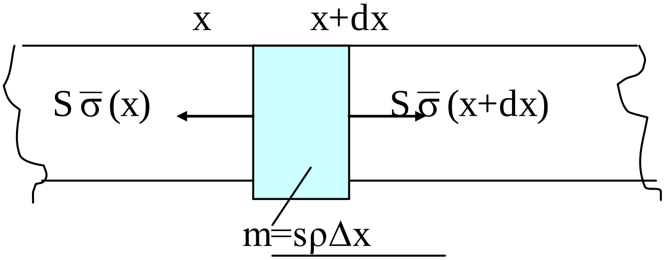
Tablisa 5.1

Kristall	Berklik çägi, Pa	Maýyşgaklyk deformasiýa, %	Süýgeşikli deformasiýa
al kristall	$(1,5 - 2) \cdot 10^{10}$	1^{-5}	0
l kristallar metallar)	$(0,1 - 1) \cdot 10^{7}$	10^{-2}	10 – 500

Gaty jisimleridäki atomlar islendik temperaturada özleriniň orta deňagramlyk ýagdaýlarynyň töwereginde arakesmesiz (üznüksiz) yrgyldaýarlar. Kiçi amplitudalarda şonuň ýaly yrgyldamalary garmonikli (yzygiderli) hasap edip bolýar. Temperaturanyň artmagy bilen yrgyldamalaryň amplitudalary we energiýalary ulalýar. Bu ýagdaýda atomlaryň biriniň yrgyldamasynyň oýanmagy golaýyndaky goňşy atomlara geçýär, olar bolsa öz gezeginde şol yrgyldamalary başga gonşy atomlara berýärler. Bu prosess gaty jisimdäki ses tolkunlarynyň ýaýramagyna meňzeşdir. Gaty jisim öz ululyklaryna görä çäkli bolan sebäbli, berlen temperaturada yrgyldamalaryň stasionar ýagdaýy aralaşýar.

Kristallik gözenegiň atomlarynyň yrgyldamalary bilen gaty jisimlerdäki ençeme fiziki hadysalar baglanyşykdyr (ýylylyk sygym, ýylylykgeçirijilik, termiki giňelme, elektrik geçirijilik we basgalary). Üç ölçegli kristallyň atomlarynyň yrgyldamalarynyň teoriýasy örän çylşyrymlydyr. Şonuň üçin biz ilki birölçegli gözenekdäki atomlaryň yrgyldamalaryna seredeliň. Ondan soň alnan netijeleri üçölçegli kristallik gözeneklerine umumylaşdyrmak bolar.

Çyzykly dykyzlygy ρ bolan bir jynsly kirşdäki dik tolkunlaryň ýaýramagyna seredeliň. Dik tolkun ýaýranda kirşiň galyňlygy Δx bolan elementine (Sur. 5.6) güýçler täsir edýär: çepden Sσ(x), sagdan Sσ(x+dx).



Sur. 5.6

Bu ýerde S – kirşiň kese kesiginiň meýdany, σ(x) we σ(x+dx) – normal maýyşgakly naprýaženiýalar. Δx element jemleýji güýç täsir edýär:

$$F = S\sigma(x+\Delta x) - S\sigma(x) \qquad \textbf{(5.9)}$$

Şu güýjiň täsiri astynda Δx elementle süýşme döreýär. Elementiň massalar merkeziniň süýşmesini U(x,t) bilen belgiläliň. Onda Nýutonyň ikinji kanunyna laýyklykda hereketiň deňlemesi:

$$\rho s\Delta x\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = S\sigma(x+\Delta x) - S\sigma(x) \qquad \textbf{(5.10)}$$

Bu ýerde ρsΔx = m – galyňlygy Δx bolan elementiň massasy. $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$ - tizlenme.

(5.10) deňlemäni aşakdaky görnüşde ýazalyň:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\sigma(x+\Delta x) - \sigma(x)}{\Delta x}$$

$\Delta x \to 0$ şertde ol aşakdaka geçýär:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma}{\partial x} \qquad \textbf{(5.11)}$$

Izotrop jisimler üçin Gukyň kanunyna laýyklykda σ = Eε, bu ýerde E – Ýungyň moduly:

$\varepsilon \frac{\partial u}{\partial x}$ - nokatdaky deformasiýa.

Bu ýerde $\frac{\partial \sigma}{\partial x} = E \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = E \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$

Onda U(x,t) süýşme üçin hereketiň deňlemesi gutarnykly aşakdaka deň bolar:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \qquad \textbf{(5.12)}$$

Bu kirşin boýundan ýaýraýan maýyşgakly tolkunlar üçin adaty hereketiň deňlemesi.

Bu deňlemäniň çözülişini hereket edýän dik monohromatik tolkun görnüşde gözläliň:

$$u = u_0 \exp[i(kx - \omega t)] = u_0 \sin 2\pi\left(\frac{x}{\lambda} - \nu t\right) = u_0 \sin(kx - \omega t)$$

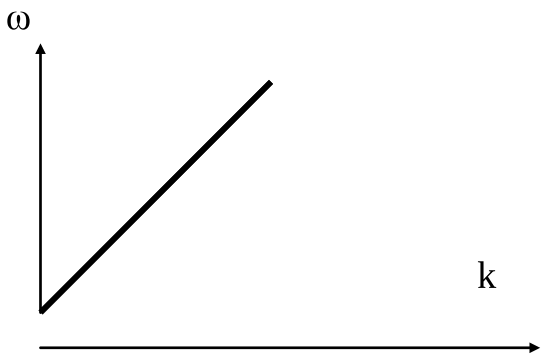
(5.13)

Bu ýerde u_0 – yrgyldynyň amplitudasy
ν – yrgyldylaryň ýygylygy
t – wagt
ω = 2πν – tegelek ýygylyk
k = 2π/λ – tolkun san

(5.13) çözülişini (10.4) deňlemä goýsak, alarys:

$$\omega = \sqrt{E/\rho} \cdot k = \upsilon k \qquad \textbf{(5.14)}$$

(5.14) gelip çykýan netije: tükeniksiz kirşde ýaýraýan maýyşgakly tolkun üçin yrgyldamalaryň ýygylygy tolkun sanyna çyzykly baglydyr (Sur. 5.7).



= 2π/λ

Sur. 5.7

Berlen material üçin $v = \sqrt{E/\rho}$ hemişelik bolmalydyr, sebäbi E we ρ ululyklar diňe materialyň häsiýetnamalarydyr.

Meselem, demir kirş üçin $E = 2{,}1 \cdot 10^{11}$Pa, $\rho = 7{,}8 \cdot 10^{3}$ kg/m^3

Onda $\nu = 5 \cdot 10^{3}$m/s

Kristallardaky maýyşgak tolkunlaryň ýaýrama prosessleri elektromagnit tolkunlarynyň ýaýrama prosesslerinden çylşyrymlylykdyr. Elektromagnit tolkunlary mydama kesedirler, maýyşgak (ses0 tolkunlary bolsa hem dik, hem-de kese bolup bilýärler.

Dykyzlygy “ρ” bolan kristalldaky maýyşgak tolkunlarynyň ýaýramagyna seredeliň.

Kristallyň içinde x, y, z koordinat oklaryna parallel Δx, Δy, Δz gapyrgaly elementar parallelepiped saýlalyň. Maýyşgak kirşdäki ýaly maýyşgak tolkunuň kristall boýunça hereket eden mahalynda σ_{ij} naprýaženiýe täsir astynda parallelepipediň her bir grany kiçiräk ýerini üýtgedýär (maýyşgak oblastynda).

Maýyşgak tolkunuň “x” ugry boýunça güýjeýän ýerini üýtgedýän hereketiň deňlemesi getirip çykaralyň (Sur. 5.8).

“x” grama täsir edýän naprýaženiýe:

$$\sigma_{11}(x+\Delta x)\approx\sigma_{11}+\frac{\partial\sigma_{11}}{\partial x}\Delta x$$

“x” ugry boýunça täsir edýän jemleýji güýç deňdir

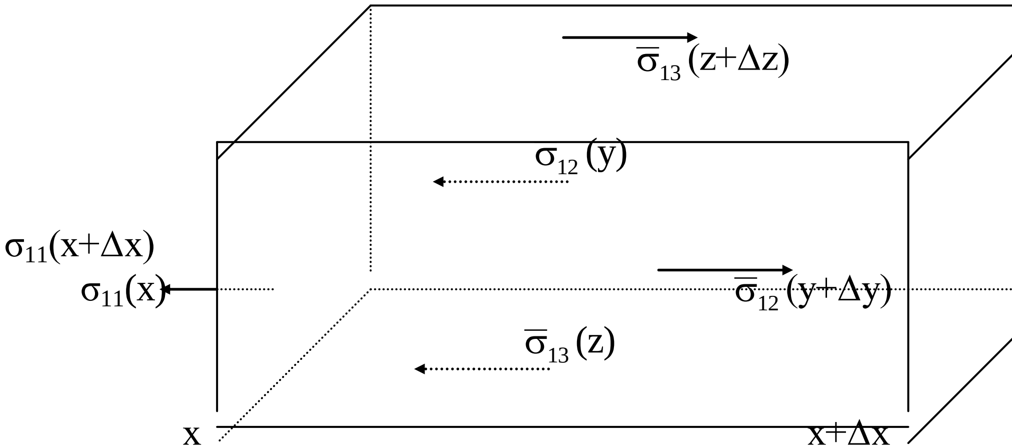
$$\left(\frac{\partial\sigma_{11}}{\partial x}\Delta x\right)\Delta y\Delta z$$

Şol ugur boýunça täsir edýän başga güýçler parallelepipediň içindäki σ_{12} we σ_{13} naprýaženiýalaryň üýtgemeginde dörän güýçlerdir.

Şonuň üçin “x” ugur boýunça jemleýji güýç:

$$F(x)=\left(\frac{\partial\sigma_{11}}{\partial x}+\frac{\partial\sigma_{12}}{\partial y}+\frac{\partial\sigma_{13}}{\partial z}\right)\Delta x\Delta y\Delta z$$

(5.15)



Sur. 5.8

Indi parallelepipediň massa merkeziniň süýşmesiniň komponentlerini U, ν we ω haryplary bilen belgiläliň.

Nýutonyň ikinji kanunyna laýyklykda güýç parallelepipediň ρΔxΔyΔz massasynyň $\frac{\partial^2 U}{\partial t^2}$ tizlenmäniň komponentasynyň köpelmek hasylyna deňdir.

Şonuň üçin “x” ugur boýunça naprýaženiýanyň täsiri astyndaky hereketiň deňlemesi aşakdaky ýalydyr:

$$\rho\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}=\frac{\partial\sigma_{11}}{\partial x}+\frac{\partial\sigma_{12}}{\partial y}+\frac{\partial\sigma_{13}}{\partial z} \qquad \textbf{(5.16)}$$

Eger U, ν we ω süýşmeleri “x_i” bilen belgilesek, onda hereketiň deňlemesini aşakdaky görnüşinde ýazyp bolar:

$$\rho\frac{\partial x_i}{\partial t^2}=\sum\frac{\partial\sigma_{ij}}{\partial x_j}\left(j=1,2,3\right) \qquad \textbf{(5.17)}$$

Bu ýerde σ_{ij} – naprýaženiýalaryň tenzorynyň komponentleri.

Kub kristallary üçin:

$$\sigma_{11} = C_{11}\frac{\partial u}{\partial x} + C_{12}\left(\frac{\partial \vartheta}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial x}\right)$$

$$C_{12} = C_{44}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial \vartheta}{\partial x}\right); \qquad C_{13} = C_{44}\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial \omega}{\partial x}\right)$$

(C_{ij} – maýyşgak komponentleri)

Şu aňlatmalary (10.9) aňlatma goýsak kub kristally üçin hereketiň denlemelerini alarys:

$$\rho\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = C_{11}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + C_{44}\left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) + (C_{12} + C_{44})\left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2}{\partial x}\right.$$

(5.18)

$$\rho\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial t^2} = C_{11}\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + C_{44}\left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2}\right) + (C_{12} + C_{44})\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + \frac{\partial}{\partial y}\right.$$

(5.19)

$$\rho\frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} = C_{11}\frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} + C_{44}\left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2}\right) + (C_{12} + C_{44})\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z} + \frac{\partial}{\partial y}\right.$$

(5.20)

[100] ugur boýunça ýaýraýan tekiz tolkunlary üçin hereketiň deňlemeleriniň çözülişini tapalyň. (10.10) deňlemäniň çözülişini dik tolkun görnüşinde ýazyp bolar:

$$u = u_0 \exp[i(\bar{k}\bar{x} - \omega t)] \qquad \textbf{(5.21)}$$

Bu ýerde u_0 – yrgyldamalaryň amplitudasy.

$|k| = 2\pi/\lambda$ – tolkun wektory.

Tolkun wektory we “u” süýşme kubuň gapyrgasynyň ugry boýunça gönükdirilenirler we ugur boýunça “x” oky bilen gabat gelýärler.

(5.21) aňlatmany (10.10) deňlemä goýsak alarys:

$$\vartheta_{\ell} = \frac{\omega}{k} = \sqrt{C_{11} / \rho} \qquad \textbf{(5.22)}$$

Bu ýerde ν_{ℓ} - [100] ugur boýunça maýyşgak (ses) tolkunyň ýaýramasynyň tizligi.

(5.18) deňlemäniň başga çözülişi kese tolkuny ýa-da süýnme wektorydyr:

$$\vartheta = \vartheta_0 \exp[i(\bar{k}\bar{x} - \omega t)] \qquad \textbf{(5.23)}$$

(5.23) aňlatmany (5.19) goýsak, alarys:

$$\vartheta_t = \frac{\omega}{k} = \sqrt{C_{44} / \rho} \qquad \textbf{(5.24)}$$

Bu ýerde ν_t – [100] ugur boýunça maýyşgak tolkunyň ýaýramasynyň tizligi.

(5.18) deňlemäniň üçüňji çözülişi – “x” ugur boýunça gabat gelýän we kubuň gapyrgasy boýunça gönükdirilen tolkun wektorly süýnme wektorydyr:

$$\omega = \omega_0 \exp[i(\bar{k}\bar{x} - \omega t)] \qquad \textbf{(5.25)}$$

Şu çözülişi (5.20) deňlemä goýsak, alarys:

$$\vartheta_t = \sqrt{C_{44} / \rho} \qquad \textbf{(5.26)}$$

Şeýlelikde şol bir “k” tolkun wektory üçin üç sany maýyşgak tolkunlary döreýärler: biri – dik, ikisi bolsa – kese.

Bir atomly çyzykly zynjyrjagazyň yrgyldamasynyň ýygylygy:

$$\omega = \omega_{\max} = \left(4\beta / M\right)^{\frac{1}{2}} \approx 5 \cdot 10^{13}\, s^{-1} \qquad \textbf{(5.27)}$$

Bu ýerde β – güýç berýän hemişelik.

M – atomyň massasy.

San bahasyna görä bu ýygylylyk gaty jisimlerdäki atomlaryň ýylylyk yrgyldamalarynyň ýygylyklaryna laýyklydyr.

6. Gaty jisimleriň ýylylyk häsiýetleri

Gaty jisimlerdäki atomlar islendik temperaturada öz orta deňagramlyk ýagdaýlarynyň töwereginde yrgyldyýarlar. Gaty jisimi gyzdyramyzda onuň ýuwudýan ýylylygy ýylylyk hereketiň intensiwligine harj edilýär. Mylaýym ýokary temperaturada atomlaryň yrgyldamalarynyň amplitudasy $T^{1/2}$ proporsionallyk artýar.

1 mol maddanyň temperaturasyny 1k üýtgedemizde oňa berilýän ýa-da alynýan energiýa – 1 mola degişli maddanyň ýylylyk sygymydyr.

Şoňa görä-de hemişelik göwrümdäki ýylylyk sygymy

$$C_V = \left(\frac{\partial E}{\partial T}\right)_V \qquad \textbf{(6.1)}$$

Başgaça aýdanymyzda, sistemanyň energiýasynyň üýtgemegi bilen (∂E) şonuň temperaturasy hem üýtgeýär (∂T).

1918-nji ýylda fransiýa alymlary eksperimental taýdan ýeterlik derejede ýokary temperaturalarda ähli gaty jisimleriň ýylylyk sygymy temperatura bagly däl we takmynan 25 J./mol·k deňdir diýip anykladylar.

Şu fakty energiýanyň erkinlik derejiligi boýunça deňölçegli paýlanmaklygynyň belli kanunyndan düşündirip bolar. Eger sistemanyň her bir erkinlik derejiligine degişli energiýa kT/2 deň bolsa ($k = 1{,}38 \cdot 10^{-23} J \cdot k^{-1}$ –Bolsmanyň hemişeligi), onda şu kanuna laýyklykda şonuň ýaly sistemanyň orta energiýasy erkinlik derejiliginiň sanynyň kT/2 köpeltmek hasylyna deňdir.

Gaty jisimde her bir atom kristallik gözenegiň düwünlerinde üç özara perpendikulär ugurlarda yrgyldyýarlar. Şonuň ýaly atom üç sany çyzykly garmoniki ossilýator görnüşinde göz öňüne getirip bolýar. Ossilýator yrgyldanda onuň kinetik energiýasy yzygiderli potensial energiýasyna we tersine, potensial energiýasy kinetik energiýasyna öwrülýär. Bir erkinlik derejiligine degişli orta kinetik energiýa $\left(\frac{kT}{2}\right)$ üýtgemeýan sebäbli we orta potensial energiýasyna deň bolan sebäbli ossilýatoryň orta doly energiýasy kinetik we potensial energiýalarynyň jemine deň bolmaly, ýagny kT.

Eger kristall N_A atomlardan düzülen bolsa ($N_A = 6{,}022 \cdot 10^{23} mol^{-1}$ – Awogadronyň hemişeligi), onda her bir atomyň üç sany yrgyldama erkin derejiligi bolan sebäbli, kristally $3N_A$ erkinlik derejiligi sistema hökmünde göz öňüne tutyp bolar. Onda şonuň ýaly sistemanyň doly orta ýylylyk energiýasy

$$E = 3N_A kT \qquad \textbf{(6.2)}$$

Bu ýerden molýar ýylylyk sygymy

$$C_V = \left(\frac{\partial E}{\partial T}\right)_V = 3kN_A = 3R \qquad \textbf{(6.3)}$$

Bu ýerde $R = 8{,}314\ J \cdot mol^{-1} \cdot k^{-1}$ – molýar gaz hemişeligi.

Şeýlelikde, (6.3) aňlatmadan C_v-nyň bahasyny tapýas:

$$C_v = 25\ J \cdot mol^{-1} \cdot k^{-1}$$

Bu netije gaty jisimleriň köpüsi üçin tejribeleriň esasynda alynan netijeleri bilen ylalalyşykdyr.

Klassiki fizikasynda metaly yrgyldaýan atomlaryň we erkin elektronlaryň jemi hökmünde göz öňüne getirip bolýar.

Şonuň ýaly sistemanyň doly orta ýylylyk energiýasy aşakdaka deňdir:

$$E = 3N_AkT + 3NkT/2 \qquad \textbf{(6.4)}$$

Bu ýerde N – erkin elektronlaryň sany. Bir walentli metal üçin $N_A = N$, onda

$$E = 3N_A kT + 3N_A kT/2 = \frac{9}{2} N_A kT = \frac{9}{2} RT \qquad \textbf{(6.5)}$$

Bu ýerde $C_V = \frac{9}{2} R = 37{,}6 J \cdot mol^{-1} \cdot k^{-1}$ ýagny klassiki fizikanyň berýan ýylylyk sygymy 1,5 esse eksperimentiň berýaninden köpdür. Şonuň üçin erkin elektronlar ýylylyk sygymyna goşand goşanaklar.

Dülonyň we Ptiniň kanuny diňe ýeterlik ýokary temperaturalarda ýerine ýetirilýär. Muny 6.1-nji suratda görüp bolar.

Şu suratdan görüşimiz ýaly, aşaky temperaturalarda ýylylyk sygymy hemişelik däl-de, temperaturanyň artmagy bilen noldan tä Dülong we Ptiniň kanuny boýunça kesgitlenýän bahasyna çenli artýar. Bu fakty düşündirmek üçin kwant statistikanyň düşünjelerini ulanmaly.

1907-nji ýylda Eýnşteýn, Plankyň gipotezasyna esaslanyp, aşakdakylary çäklady:

1. gaty jisim üç özara perpenolikulýar ugry boýunça yrgyldyýan bir meňzeş garmoniki ossilýatorlardan ybaratdyr.
2. Ossilýatorlaryň energiýasy Plank boýunça kwantlanan.

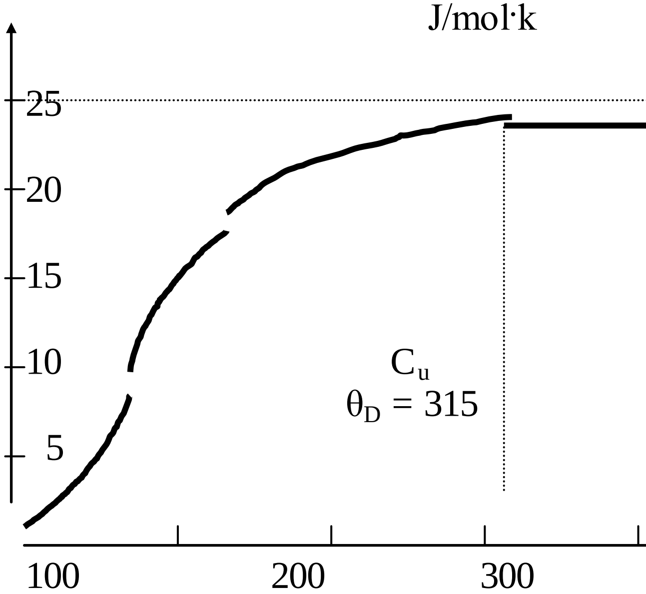
Ossilýatoryň orta energiýasy deňdir:

$$\langle E \rangle = \frac{\hbar\omega}{\ell^{\hbar\omega / kT} - 1} \qquad \textbf{(6.6)}$$

Bu ýerde $\hbar = \dfrac{h}{2\pi}$ - Plankyň hemişeligi.

C_V, J/mol·k

$C_v = 3R$



400 T,k

Sur. 6.1

Eger gaty jisimde N_A atom bar bolsa, onda doly ýylylyk energiýa aşakdaka deň bolar:

$$E = 3N_A\langle E\rangle = 3N_A \frac{\hbar\omega}{\ell^{\hbar\omega/kT} - 1} \qquad \textbf{(6.7)}$$

(6.7) aňlatmadan molýar ýylylyk sygymy üçin umumy görnüşde aňlatmany alarys:

$$C_V = \left(\frac{\partial E}{\partial T}\right)_V = \frac{3kN_A\left(\frac{\hbar\omega}{kT}\right)^2}{\left(\ell^{\hbar\omega/kT} - 1\right)}\ell^{\hbar\omega/kT} \qquad \textbf{(6.8)}$$

Iki çäkli wakalara seredeliň.

1. Ýokary temperaturaly waka (kT>>ħω).

Bu ýagdaýda (6.8) deňlemäni ýönekeýleşdirip bolar, eger-de onuň maýdalawçyny hatara dargatsak:

$$\left(\ell^{\hbar\omega/kT} - 1\right)^2 = \left(1 + \frac{\hbar\omega}{kT} + \ldots. - 1\right)^2 \approx \left(\frac{\hbar\omega}{kT}\right)^2$$

(6.9)

Sanawjydaky eksponenta birlige ymtylyýar ($\ell^{\hbar\omega/kT} \to 1$).

Onda (6.8) aňlatmadan alarys:

$$C_v \approx 3N_A \cdot k = 3R \approx 25\ J \cdot mol^{-1} \cdot k$$

2. Pes tamperaturaly waka (kT<<ħω).

Bu ýagdaýda $\ell^{\hbar\omega/}kT>>1$.

Onda (6.8) aňlatmadan alarys:

$$C_V = 3N_A k\left(\frac{\hbar\omega}{kT}\right)^2 \ell^{-\hbar\omega/kT} \qquad \textbf{(6.10)}$$

Ýylylyk sygymyň çalt pese düşýän θ_ε temperatura nokadyna Eýnşteýniň häsiýetlendiriji temperaturasy diýilýär. Şol temperatura aşakdaky deňlemeden tapylýar:

$$h\omega_\varepsilon = k\theta_\varepsilon \qquad \textbf{(6.11)}$$

Eger $\omega_\varepsilon = 2\cdot10^{13} s^{-1}$, $\hbar = 1{,}05\cdot10^{-34} J\cdot s$ bolsa, onda $\theta_\varepsilon \approx$ 150K.

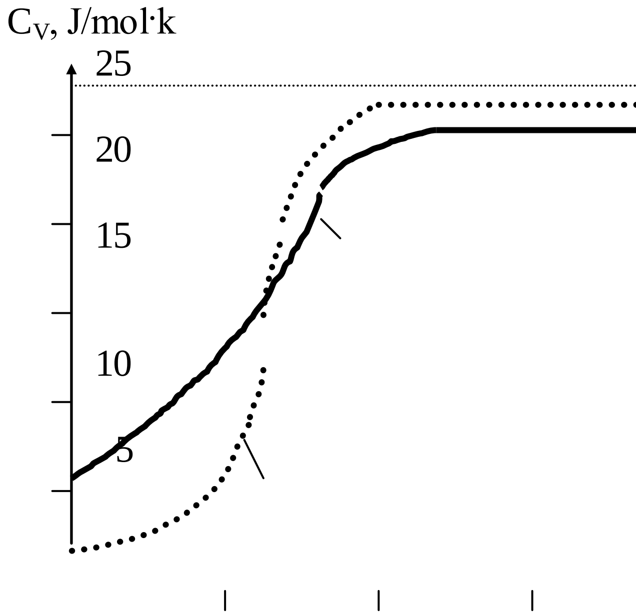
Eýnşteýniň ýylylyk sygymy üçin tapan aňlatmasy eksperiment bilen diňe $T \approx \theta\varepsilon$ temperaturalarda ylalyşykda bolýar, emma olardan pes temperaturalarda şonuň ýaly ylalyşyk bolmaýar (Sur. 6.2). Munuň sebäbi – Eýnşteýniniň modelinde her aýratynlykda alynan atom başda atomlardan

$$E = \frac{9NkT}{\left(\theta_D / T\right)^3} \int_0^{\theta_D} \frac{x^3 dx}{\ell^x - 1} = 3NkTD(\theta_D / T) \qquad \textbf{(6.12)}$$

(6.12) aňlatma Debaýyň formulasy diýip atlandyrylýar, aşakdaky aňlatma bolsa

$$D(\theta_D / T) = \frac{3}{(\theta_D / T)^3} \int_0^{\theta_D / T} \frac{x^3 dx}{\ell^x - 1}$$

(6.13)



tejribe

Eýnşteýnyň aňlatmasy

100 200
300 400 T, k

Sur. 6.2

bagly däl ýagdaýynda ω ýygylyk bilen yrgyldaýar. Emma hakykatdan gaty jisimlerdäki atomlar şol bir ýygylyk bilen yrgyldap bilmeýärler, çünki olar bir-birine baglydyrlar.

Eýnşteýniň esasy pikrini saklap, Debaý şony öz çaklamasy bilen üstüni ýetirdi. Onuň çaklamasyna görä garmoniki ossilýatorlar dürli ýygylyk bilen yrgyldyýarlar, olaryň energiýasy bolsa Plank boýunça kwantlanan.

Onda doly ýylylyk energiýa aşakdaky deňlemeden tapylýar:
Debaýyň funksiýasy diýip atlandyrylýar.

θ_0 – gaty jisimiň häsiýetlendiriji temperaturasy ýa-da Debaýyň temperaturasydyr.

k θε = $\hbar\omega_D$ – gözenegiň yrgyldamasyny oýatdyrmaga ukuply bolan energiýanyň maksimal kwanty – şonuň fiziki manysydyr. Gaty jisimleriň köpüsi üçin θ_D = 100 – 400K bolsa θ_D = 2230K.

1. Ýokary temperaturaly waka: $\hbar\omega \ll kT$.Bu ýagdaýda (6.12) aňlatmanyň integralyň aşagyndaky $\ell^x - 1$ aňlatmany bir hatara dargadyp bolýar:

$\ell^x - 1 \approx 1 + x - 1 = x$, onda (6.12) aşakdaka deň bolar:

$$E = 9Nk\theta_D\left(\frac{T}{\theta}\right)^4 \int_0^{\theta_D/T} x^3 dx = 3NkT = 3RT$$

(6.14)

Şonuň üçin ýylylyk sygymy $C_V = \left(\frac{\partial E}{\partial T}\right)_V = 3R$ - Dülong we Ptiniň kanunyna laýyklykda.

2. Pes temperaturaly waka: ħω>>kT, ýa-da x>>1.

Bu ýagdaýda (12.13) aňlatmanyň integrirlemäniň çäklerini 0-dan tä θ_D/T çenli, 0-dan tä ∞ çenli çalşyryp bolar:

$$\int_0^\infty \frac{x^3 dx}{\ell^x - 1} = \frac{\pi^4}{15} \qquad \textbf{(6.15)}$$

Onda akustik yrgyldymalaryň energiýasy

$$E = \frac{9Nk\theta_D\pi^4}{15}\left(\frac{T}{\theta_D}\right)^4 = \frac{3Nk\theta_D\pi^4}{5}\left(\frac{T}{\theta_D}\right)^4 \qquad \textbf{(6.16)}$$

(6.16) aňlatma pes temperaturalarda örän takykdyr, çünki energiýanyň T^4 kanunyna laýyklykdaky baglanyşygyny dogry beýan edýär.

Pes temperaturalarda (6.16) deňlemeden gelip çykýan ýylylyk sygymynyň aňlatmasy aşakdaka deňdir:

$$C_V = \left(\frac{\partial E}{\partial T}\right)_V = \frac{12\pi^4 Nk}{5\theta_D^3} T^3 = \gamma_D T^3 \qquad \textbf{(6.17)}$$

Bu ýerde $\gamma_D = \frac{12\pi^4 Nk}{5\theta_D^3}$; (6.17) aňlatma eksperiment bilen 0^0K nokadyň golaýyndaky örän kiçi temperatura aralygynda gowy ylalyşýar.

Kristallardaky atomlaryň kollektiwleýin hereketi ses tolkunlarydyr, şolara degişli oýatmalar – sesiň kwantlary ýa-da fononlardyr. Fononlaryň energiýasy

$$E = \hbar\omega \qquad \textbf{(6.18)}$$

impulsy bolsa

$$P = \hbar k \qquad \textbf{(6.19)}$$

Fononyň impulsy we energiýasy aşakdaky aňlatma bilen baglanyşyklydyrlar:

$$E = P\nu_s$$

Bu ýerde ν_s – sesiň tizligi.

Ýagdaýlaryň dykyzlygyny kesgitlemek üçin P giňişlikde P we P+dp radiusly sferalaryň arasyndaky gatlak alalyň.

Sferiki gatlagyň göwrümi

$$dV = \frac{4\pi}{3}(P + dp)^3 - \frac{4\pi}{3}P^3 \approx 4\pi P^2 dp \qquad \textbf{(6.20)}$$

Indi P – giňişligi göwrümi $(2\pi\hbar)^3/V$ bolan faza öýjüklere böleliň (V – öýjügiň göwrümi).

Onda sferiki gatlakda şonuň ýaly öýjükleriň sany

$$dz = G(E)dE = \frac{3 \cdot 4\pi P^2 dpV}{(2\pi\hbar)^3} \qquad \textbf{(6.21)}$$

Bu ýerde G(E) ýagdaýlaryň dykyzlygy.

(6.21) aňlatmada P-ni E energiýa bilen çalyşsak we (6.20) aňlatmany göz öňüne tutsak, alarys

$$G(E) = \frac{12\pi V}{(2\pi\hbar)^3}\frac{1}{\vartheta_S^2}E^2 \qquad \textbf{(6.22)}$$

Çäklenen gaty jisimdäki fononlaryň doly sany 3N-den köp bolmaly däl sebäbli (N – kristallardaky elementar öýjükleriň sany).

$$\int_0^{K_\theta \theta_D} G(E)dE = 3N \qquad \textbf{(6.23)}$$

(6.22) aňlatmany göz öňüne tutyp, alarys:

$$G(E) = \frac{9NE^2}{(K_\theta \theta_D)^3} \quad \textbf{(6.24)}$$

Onda Boze-Eýnşteýniň teoriýasy esasynda kristalardaky fotonlaryň doly energiýasy aşakdaka deň bolar:

$$< E >= \int_0^{K_\theta \theta_D} EG(E) < n(\bar{ks}) > dE = \frac{9NK_B T}{(\theta_D / T)^3} \int_0^{\theta / T} \frac{x^3 dx}{\ell^x - 1}$$

(6.25)

Bu ýerde $< n(\bar{ks}) >$ - bir öýjükdäki fononlaryň orta sany.

$$x = \frac{E}{K_B T} = \frac{\hbar\omega}{K_B T}; \qquad \theta_D = \frac{\hbar\omega}{K_B};$$

S =1, 2, 3 – polýarizasion san.

Häzirki zaman teoriýasy boýunça metal položitel zarýadlanan ionlarda we erkin walent elektronlardan düzülen sistemadan ybaratdyr. Ionlar kristallik gözenekde öz deňagramlyk ýagdaýynyň töwereginde yrgyldyýarlar, erkin elektronlar bolsa metalda özboluşly häsiýetli gaz emele getirýärler.

Metallardaky erkin elektronlar edil ideal gazyň molekulalary ýaly Makswell-Bolsmanyň statistikasyna boýun egýärler.

Şonuň ýaly elektron gazyň ýylylyk sygymy Dübong we Ptiniň kanunynyň berýän ýylylyk sygymynyň ulylygyndan 1,5 esse köpdür, sebäbi jisimi ýylytmak üçin ýetirýän energiýa bar erkin elektronlaryň arasynda paýlanylýar.

0^0k golaýdaky temperaturalda ýylylyk sygymy doly erkin elektronlar bilen kesgitlenýär. Şu fakty ilkinji gezek kwant fizikanyň esasynda Zommerfeld düşündirdi.

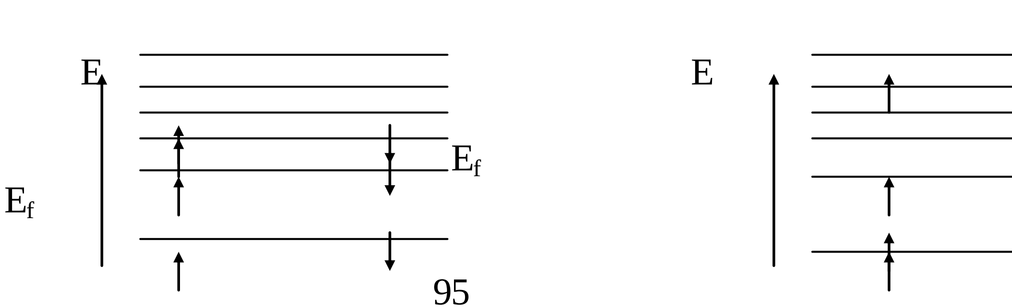
Metallardaky erkin elektronlar kwant häsiýetlere eýedirler. Olaryň energiýasy kwantlanan we olar Pauliň gadagan prinsipine boýun egýärler. Şol prinsipe laýyklykda bir meňzeş energiýaly ýagdaýda dürli tarapa gönükdirilen spinli iki elektrondan köp bolup bilmeýär. Başgaça aýdaňda, diňe 2 elektron bir meňzeş energiýa we hereketiň ugruna eýedirler.

Pauliň gadagan prinsipine esaslanyp gaty jisimdäki elektronlaryň energiýa boýunça paýlaşdyrylmasyny düşündirip bolar.

0 K temperaturada elektronlar iki-ikiden energetik basgançygynda ýerleşýärler (aşakydan tä iň ýokarka çenli) (Sur. 6.3a)

Eger gaty jisimde jemi N erkin elektron bolsa, onda doldurylan derejeleriň sany N/2 bolmalydyr. Şu ýagdaýda electron gaty doly “dörediş” ýagdaýdadyr diýilýär.

Doldurulan derejeleri doldurulmadyk derejelerinden bölýän derejä Ferminiň derejesi diýilýär (ýa-da Ferminiň energiýasy) we E_f harp bilen bellenýär.



T = 0^0K
T>0^0K

a) b)

Sur. 6.3

Temperaturanyň 0^0k ýokary artyrylmagy diňe Ferminiň derejesiniň golaýyndaky ýerleşen elektronlara täsir edýär. Olar oýanyp goňşy, ýokarda ýerleşen doldurulmadyk derejelere geçýärler. (Sur. 6.3b) Dörejilik ýuwaş-ýuwaşdan aýrylýar. Aşakdaky energetik derejelerinde ýerleşen elektronlar ýylylyk hereketine gatnaşyp bilmeýärler, çünki temperaturany ýokarlandyramyzda olar ýokarky energetik derejelerine geçmeli, emma şol derejeler boş däl.

Matematiki taýdan energiýa boýunça elektronlaryň paýlanylyş funksiýasynyň baglanyşygy 1926 ýylda Fermi tapanyndan we özbaşdak Dirak tarapyndan tapyldy.

Şu funksiýa Fermi-Dirakyň paýlanylyş funksiýasy diýip atlandyrylýar.

Onuň görnüşi:

$$f = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_f}{K_B T}\right) + 1} \qquad \textbf{(6.26)}$$

(6.25) aňlatmadan gorüşimiz ýaly temperatura bolanda f =1 eger $E \le E_f$ we f = 0 eger $E > E_f$.

Örän ýokary temperaturalda ($k_BT \geq E_f$) we uly energiýalarda ($\exp\left(\frac{E-E_f}{K_BT}\right) >> 1$) Fermi-Dirakyň paýlanylyşy

$$f = \ell^{\frac{E_f}{K_BT}} \ell^{-\frac{E}{K_BT}} = A\ell^{-\frac{E}{K_BT}} \qquad \textbf{(6.27)}$$

Şu ýagdaýda elektronlar özlerini adaty klassiki bölejik ýaly alyp barýarlar. Şeýlelikde $\exp\left(\frac{E-E_f}{K_BT}\right) >> 1$ şertde elektron gazyň dörejiligi doly aýrylýar. Dörejiligiň aýrylmasy $T_F = \frac{E_f}{K_B} = 5 \cdot 10^4 K$ temperaturada bolup geçýär. Sonuň ýaly temperaturalarda metallaryň hemmesi ereýär.

Eýleleikde elektron gazy dörejilik ýagdaýyny tä eremek temperatura çenli saklaýar we onuň paýlanylyşy 0^0k temperaturadaky Fermi-Dirakyň paýlanylyşyndan örän az tapawutlanýar.

Ýylylyk oýatmasyna Fermiň derejesiniň golaýynda ýerleşen elektronlaryň örän kiçi bölegi eýe bolýar. Otak temperaturasynda şu bölek gewçiriji elektronlaryň umumy sanynyna görä 1%-denem kiçidir. Şonuň üçinem elektron gazyň ýylylyk sygymy gözenegiň ýylylyk sygymyndan örän kiçidir. Termiki oýatmada her bir elektron kT deň bolan energiýany ýuwudýar. Onda hemme elektron gazyň ýywudýan energiýasy

$$\Delta E \approx kT\Delta N = NkT\frac{kT}{2E_f} \qquad \textbf{(6.28)}$$

Bu ýerde ΔT – termiki oýatma synag görýän elektronlaryň sany.

N – Awogadronyň sany.

Nk = R – uniwersal gaz hemişeligi.

Şonuň üçin:

$$\Delta E = RT\frac{kT}{2E_f} \qquad \textbf{(6.29)}$$

Hemişelik göwrümdäki elektron gazyň ýylylyk sygymy deňdir

$$C_V = \frac{d(\Delta E)}{dT} = R\frac{kT}{E_f} \qquad \textbf{(6.30)}$$

Döredirilmedik bir atomly elektron gaz üçin (klassiki statistika boýunça):

$$C_{Vklas.} = \frac{3}{2}R \qquad \textbf{(6.31)}$$

(6.30)-y (6.31)-e paýlap, alarys:

$$\frac{C_V}{C_{Vklas.}} = \frac{2}{3}\frac{kT}{E_f} \qquad \textbf{(6.32)}$$

Adaty temperaturalda $\frac{kT}{E_f} \approx 0{,}01$, şonuň üçin $C_v \approx 0{,}01\ C_{vklas}$.

Bu bolsa tejribe bilen ylalyşýar we gaty jisimleriň ýylylyk sygymynyň klassiki teoriýasynda bolan düşündirişiň kynçylygyny aýyrýar.

Goý, belli bir aralyklarda özara täsir edişýän bölejikleriň energiýa bagly bolan egrisine seredeliň.

Özara täsir edişýän bölejikler minimum U_0 energiýa (abc potensial çukuryň düýbünde) eýe bolýar, haçanda olar absolut nolda r_0 aralykda ýerleşýärler. Bu aralyklar jisimiň absolýut noldaky ululygyny kesgitleýär.

Temperaturanyň artmagy bilen bölejikler deňagramlyk ýagdaýyň golaýynda yrgyldap başlaýarlar. Ýönekeýlik üçin, goý 1 bölejik berkidilen bolsun, 2 bölejik bolsa “O” deňagramlyk ýagdaýyň golaýynda yrgyldaýan bolsun. Yrgyldaýan bölejik “O” deňagramlyk ýagdaýyny geçýän pursatda uly bahaly bolan W_k kinetik energiýa eýedir.

Birinji suratda W_k energiýa potensial çukurdan ýokarda goýulan. 2 bölejik deňagramlyk ýagdaýdan çepe hereket edende kinetik energiýa ony 1 bölejikleriň iteklemekligi üçin harçlanýar we bölejikleriň özara täsiriniň potensial energiýasyna öwrülýär. Bölejigiň çepe gyşarmaklygy, kinetik energiýanyň gutaryp potensial energiýa eýe bolýança dowam edýär. Potensial energiýa $\Delta U=W_k$ ýökarlanýar we $-(U_0-\Delta U)$ deň bolýar, 2 bölejik bolsa çepe Δr_1 aralyga gutarnykly süýşýär. Bölejik Δr aralyga deňagramlyk ýagdaýyndan saga hereket etmegi bilen kinetik energiýa 1 bölejige goýulan dartyş güýjini ýeňip geçmekligine harçlanýar. Şeýlelikde bölejikleriň özara täsirinde kinetik energiýa potensial energiýa geçýär. “B” nokatda, deňagramlyk ýagdaýdan Δr_2 aralykda ýerleşen bölejigiň kinetik energiýasy potensial energiýa geçýär. Netijede potensial energiýa $\Delta U=W_k$ ýökarlarynýar we $-(U_0-\Delta U)$ deň bolýar.

Eger-de, güýç gyşarma ululygyna proporsional we deňagramlyk ýagdaýyna ugrukdyrylan bolsa, onda:

$$F=-c\Delta r \qquad \textbf{(6.33)}$$

Bu ýerde c – proporsional koefisiýenti.

Bölejigiň ΔU potensial energiýanyň üýtgeýşini a`b`c` parabola görnüşinde beýan edilerdi, onuň deňlemesi şeýledir:

$$\Delta U = \frac{1}{2} c \Delta r^2 \qquad \textbf{(6.34)}$$

Bu parabola ordinatlar okuna parallel bolan we r_0 aralykda ýerleşen bd gönä simmetrikdir. Şol sebäpli Δr_1 we Δr_1 gyşarmalaryň ölçegleri deň bolar we olaryň bat alma A`B` merkezi “O” deňagramlyk ýagdaýy bilen gabat geler. Jisimiň gyzdyrylmagy bilen onuň giňelmegini ýüze çykarmaz, ýagny temperaturanyň artmagy bilen diňe yrgyldaýan bölejigiň amplitudasy ýokarlanýar, olaryň ortaky aralyklary bolsa üýtgemän galýar.

Hakykatda bolsa, birinji suratda görşumiz ýaly energiýanyň abc potensial egrisi bd gönä simmetrik däl, sebäbi onuň çep ba şahasy sag bc şahasyndan has dik galýar. Şonuň üçin hem bölejikleriň gaty jisimdäki yrgyldysy angarmoniki bolar.

Assimetriýanyň hasabyna, potensial egriniň (6.34) deňlemesine bu assimetriýany kesgitleýän goşmaça $-\frac{1}{3} g\Delta r^3$ agzasyny girizmek hökmanydyr. (g – proporsional koefisiýenti).

Onda (6.34) deňlemäni şeýle ýazyp bolar:

$$\Delta U = \frac{1}{2} c \Delta r^2 - \frac{1}{3} g \Delta r^3 \qquad \textbf{(6.35)}$$

2 bölejik saga gyşarmaklygynda ($\Delta r>0$) $\frac{1}{3}g\Delta r^3$ agzasy $\frac{1}{2}c\Delta r^2$ agzasyndan hasaplanylýar we bc şahasy bc` şaha görä gidýär, çepe gyşarmaklygy bolsa ($\Delta r<0$) $\frac{1}{3}g\Delta r^3$ agza $\frac{1}{2}c\Delta r^2$ agza goşulýar we ba şaha ba` şahadan dik gidýär. Potensial energiýanyň simmetrik däl häsiýeti şeýle ýagdaýa getirýär, ýagny 2 bölejigiň çepe we saga edýän gyşarmasy deň bolmaýar: saga bölejik güýçli gyşarýar, çepe bolsa onuň ýaly däl. Netijede bu bölejigiň ortaky ýagdaýy (O_1 nokatda) deňagramlyk O ýagdaýy bilen gabat gelmeýär, ýagny ondan saga $\Delta r = \dfrac{\Delta r_2 - \Delta r_1}{2}$ aralykda ýerleşer.

Bu bolsa bölejikleriň ortaky aralygynyň Δr ululyga artmaklygyna getirýär. Şeýlelikde jisimiň gyzdyrylmasy netijesinde bölejikleriň ortaky aralygy artyp başlamaly we jisim giňelmeli.

Hasaplamalarynyň görkezşine görä jisimiň T temperatura çenli gyzdyrylmagy bölejikleriň ortaky aralygy Δr ululyga artýandygyny görkezýär:

$$\Delta\bar{r} = \frac{g}{c^2}kT \qquad \textbf{(6.36)}$$

(k – Bolsmanyň hemişeligi)

Jisimiň otnositel çyzykly giňelmegi bölejikleriň $\Delta\bar{r}$ ortaça aralygyň r_0 normal aralyga bolan gatnaşygynyň üýtgeýşini görkezýär:

$$\frac{\Delta \bar{r}}{r} = \frac{g}{c^2 r_0} kT = \alpha T \qquad \textbf{(6.37)}$$

$\alpha = \dfrac{g^2}{c^2 r_0}$ bu proporsional koefisiýent jisimiň çyzykly giňelmeginiň koefisiýentini aňladýar, onuň tertibi $10^{-4} - 10^{-5}$. Bu san tejribe bilen ylalaşýar.

Gaty jisimleriniň ýylylyk geçirijiligi.

Ähli gaty jisimler şu ýa-da beýleki derejelerde, ýagny ýylylygy biri gowy, biri bolsa erbet geçirýär. Izotropiki gaty jisimde ýylylygyň ýaýraýşy Furýe (1822 ý.) kanunyna boýun egýär:

$$\bar{q} = -k\,gradT = -k\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_n \qquad \textbf{(6.38)}$$

Bu ýerde q – ýylylyk akymynyň üst dykyzlygy ol wektordyr, T – temperatura, $\frac{\partial T}{\partial n}$ - izotermiki üst üçin normal boýunça temperaturanyň gradiýenti, K – ýylylyk geçirijilik.

(6.38) deňlemäniň sag tarapyndaky (-) alamaty ýylylygyň gyzgyn ýaýladan sowuk ýaýla akýandygyny görkezýär. Anizotropiki gaty jisimler üçin umumy ýagdaýda $\bar{q}$ normalyň izotermiki üst boýunça ugrukdyrylmagy bilen gabat gelmeýär:

$$q_i = K_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \qquad \textbf{(6.39)}$$

Bu ýerde K_{ij} koefisiýentler iki rangly tenzor emele getirýärler:

$$K_{ij} = \begin{vmatrix} K_{11} K_{12} K_{13} \\ K_{21} K_{22} K_{23} \\ K_{31} K_{32} K_{33} \end{vmatrix}; \qquad K_{ij} = K_{ji} \qquad \textbf{(6.40)}$$

Eger (6.40) tenzory (x, y, z) baş oklara getirsek, onda ol şeýle görnüşi alar:

$$K_{ij} = \begin{vmatrix} K_1 O O \\ O K_2 O \\ O O K_3 \end{vmatrix} \qquad \textbf{(6.41)}$$

Onda (6.38) deňleme şeýle ýonekeý forma eýe bolar:

$$q_1 = -K_1 \frac{\partial T}{\partial x}; \quad q_2 = -K_2 \frac{\partial T}{\partial y}; \quad q_3 = -K_3 \frac{\partial T}{\partial z}$$

(6.42)

SJ sistemada ýylylyk geçirijilik Wt/M·K ölçege eýedir.

Umuman gaty jisimlerde ýylylytk geçirijiligiň iki mehanizmi bar: ýylylyk energiýany erkin elektronlaryň geçirmekligi we ýylylyk energiýany atom yrgyldylaryň geçirmekligi (fononlar).

Metallarda bir wagtyň özünde bu mehanizmleriň ikisi hem ýerine ýetýär:

$$K = K_{fon.} + K_{el.} \qquad \textbf{(6.43)}$$

Ýöne metallarda ýylylyuk geçirijiligiň esasy mehanizmi elektron ýylylyk geçirijiligidir.

Dielektriklerde (izolýatorlarda) erkin elektronlaryň ýoklygy sebäbli, ýylylyk geçirmeklik dine atom yrgyldylaryň mehanizmi esasynda amala aşyrylýar.

Otag temperaturada izolýatorda fononyň erkin ylgawynyň uzunlygy

$$<\lambda_f> = 3\cdot10^{-6}\text{sm},$$

sesiň tizligi $<\nu_{ses.}> = 10^5$sm/s, ýylylyk sygymy Cv = 3R, onda

$$K_{fon.} = \frac{1}{3} C_V < \vartheta_{ses} >< \lambda_f >= \frac{1}{3} 3R \cdot 10^5 \cdot 3 \cdot 10^{-6} = 0{,}3R$$

(6.44)

Metalda ýylylyk esasan elektronlaryň hasabyna geçirilýär diýsek, onda

$$K_{el.} = \frac{1}{3} C_V \vartheta_F < \lambda_{el.} > \qquad \textbf{(6.45)}$$

Bu ýerde $<\lambda_{el.}>$ - elektronlaryň ortaky erkin ylgaw uzunlygy 10^{-5}sm deň.

υ_F – ýylylyk hereketiň tizligi. Ol Fermi energiýasyna baglydyr we deňdir 10^8sm/s.

C_V – elektron gazyň ýylylyksygymy.

Onda

$$K_{el.} = \frac{1}{3} \cdot 0{,}1R \cdot 10^8 \cdot 10^{-5} = 0{,}3 \cdot 10^2 R$$

Izolýatoryň ýylylyk geçirijiligi bilen deňeştiremizde $K_{el}/K_{fon} = 10^2$, ýagny elektronlar bilen esaslanan ýylylyk geçirijilik fonon ýylylyk geçirijiliginde 100 esse ýokarydyr.

Gaty jisimlerdäki diffuziýa.

Gaty gisimlerdäki ýylylyk yrgyldylary kiçi amplitudaly yrgyldylaryň esasynda aňladylýar. Olar ortaky ýagdaýda goýulan deňagramlygyň golaýynda amala aşyrylýar. Ýöne atomyň kinetik energiýasy onuň goňşy atomlaryň täsiri netijesinde hemişelik galmaýar. Kristalda mydama birnäçe atomlaryň şeýle bir görnüşi duş gelýar, ýagny olaryň kinetik energiýasy ýeterlikçe uly bolýar, şeýle atomlar özleriniň deňagramlyk ýagdaýyndan gopmak we ony gurşap alýan atomlaryň emele getiren potensial barýeri geçmekligi, hem täze erkin deňagramlyk ýagdaýa geçmekligi, atomyň eýe bolan energiyasyny ýitirmekligine getirýär. Ol energiýa kristalik gözenekde ýerleşen atomlara berilýär. Bir näçe wagtdan soň atom ýene-de energiýa eýe bolýar we ony guruşap alýan täze töwereklige geçýär. Atomlaryň şunuň ýaly ýylylyk hereketiniň täsiri astynda orny üýtgemeklik gaty jisimlerdäki diffuziýa prosessiniň esasy bolup durýar.

Diffuziýa teoriýasy Frenkel tarapyndan işlenip düzüldi. Bu nazaryýetiň esasynda atomyň ýylylyk hereketi aşakdaky prosesler bilen düşündirilýär:

1. Tertipli ýagdaýda goýulan deňagramlygyň golaýynda atom yrgyldylary.
2. Ýeterlik energiýa eýe bolan atom (ýa-da ion) öz tertipli ýagdaýyndan düwünli gözenegiň düwün aralygyna geçip bilýär. Bu prosese frenkel baglanykly atomlaryň dissosiýasy diýen ady berdi.
3. Dissosirlenen atom potensial barýerden geçip başga erkin ýagdaýa geçmeklikden öň, ol wagtyň dowamynda öziniň täze ýagdaýynyň golaýynda yrgyldar.
4. Jonyň täze deňagramlyk ýagdaýdan ondan “δ” aralykda ýerleşen başga ýagdaýa geçmekligi mümkindir.
5. Dissosirlenen atom gözenegiň wakant düwümine (deşijige) geçip bilýär. Bu prosese Frenkel dissosirlenen atomlaryň assosiýasiýasy diýen ady berdi.

6. Wakant düwünleriň (deşijiklerin) gözenekde ýerleşmegi mümkin, sebäbi ýylylyk deňagramlykda birnäçe atomlar düwün aralyk giňişliginde ýerleşen. Kristalik gözenekde boş düwünler (deşijikler) emele gelýär.

Şeýlelikde ýylylyk hereketiniň islendik temperaturasynda gaty jisimde atomlaryň üznüksiz garyşmagy bolup geçýär.

Gözenegiň özünde wakant düwünleriň (deşijikleriň) garyşmagynyň tizligi P_m ähtimalygy bilen kesgitlenýär:

$$P_m \approx \nu_0 \exp[-E_m/K_B T] \qquad \textbf{(6.46)}$$

Bu ýerde Em – potensial barýeriň beýikligi.

$\nu_0 \sim 10^{13} s^{-1}$ – atomyň yrgyldymasynyň hususy ýygylygy.

Şeýlelikde, diffuziýa emele gelmek üçin atom onuň goňşy atomlaryň döreden beýikligi E_m bolan potensial barýerini ýeňip geçmeli.

7. Gaty jisimleriň elektrik häsiýetleri

Gaty jisimleriň elektrik geçirijiligi boýunça klassifikasiýasy.

Udel elektrik geçirijiligi boýunça gaty jisimler üç uly tonarlara bölünýärler: metallar, dielektrikler we ýarymgeçirijiler.

Metallar elektrik toguny örän gowy geçirýarler. Olaryň udel elektrik geçirijiligi otag temperaturasynda 10^4-den tä $10^6 om^{-1} \cdot sm^{-1}$ çenlidir. Dielektrikler, tersine, praktiki taýdan togy geçirmeýärler. Olary izolýator hökmünde ulanýarlar. Dielektrikleriň udel geçirijiligi 10^{-10} $om^{-1} \cdot sm^{-1}$-den kiçidir.

Metallardan we dielektriklerden başga, geçirijiligi metallar bilen dielektrikleriň arasyndaky aralyk ýagdaýy eýeleýän maddalar topary hem bar. Ol maddalara geçirijiler diýip at berer ýaly däl, çünki olar ýarymgeçirijiler diýen ady aldylar.

Arassa metallaryň arasynda elektrigi iň gowy kümüş geçirýär, ikinji ýerde mis, üçünji – altyn, dördünji – alümin. Arassa metallaryň udel garşylyklary birinji tablisada görkezilipdir.

Metallarda erkin zarädlary ekidijiler elektronlardyr. Olaryň konsensatriýasy ýokary – $10^{28}m^{-3}$ tertibindedir. Ol elektronlar tertipsiz ýyluylyk hereketine gatnaşýarlar. Elektrik meýdanynyň täsiri astynda olar 10^{-4}m/s tertipdäki orta tizlik bilen orunlaryny tertipli üýtgemäge başlaýarlar.

Tablisa 7.1

Metal	P, Om·m
Ag	$1,6\cdot10^{-8}$
Cu	$1,7\cdot10^{-8}$
Au	$2,4\cdot10^{-8}$
Al	$2,8\cdot10^{-8}$
Co	$5,7\cdot10^{-8}$
Ni	$7,2\cdot10^{-8}$
Fe	$9,8\cdot10^{-8}$
Pt	$10,5\cdot10^{-8}$

Metallaryň geçirijiliginiň erkin elektronlaryň hereketi bilen şertlendiginiň eksperimental subuty L. I. Mandelştam (1913 ý.) bilen R. Tolmeniň (1916 ý.) tejribelerinde berildi.

Ol tejribeleriň shemasy şeýledir. Tegede sim saraýarlar; onuň uçlaryny bir-birinden izolirlenen iki sany metal diske sepleýärler. Diskleriň uçlaryna tynýan kontakt arkaly galwanometr berkidýärler.

Tegegi çalt aýlandyrýarlar, soňra bolsa birden saklaýarlar. Tegek birden saklanylandan soňra zarädlanan erkin bölejikler käbir wagtlap geçirijä otnositellikde inersiýa boýunça hereket edýärler we şeýlelikde tegekde elektrik togy ýüze çykýar. Tok azajyk wagt bolýar, çünki geçirijiniň garşylygy zerarly zarädlanan bölejikler tormozlanýarlar we tok emele getirýän bölejikleriň tertipleşdirilen hereketi toglaýar.

Metallaryň, dielektrikleriň we ýarymgeçirijileriň tapawudyny olaryň udel elektrik geçirijileriniň temperatura görä baglanyşykly aňlatmalar bilip bolýar.

Ýarym geçirijiler we dielektrikler üçin şu baglanyşyklyk aşakdaky deňleme bilen beýan edilýar:

$$\sigma = \sigma_0 \exp[-\Delta E/kT] \qquad \textbf{(7.1)}$$

Ýagny σ temperaturanyň artmagy bilen eksponensial kanuna laýyk artýar.

Metallarda bolsa udel elektrik geçirijilik temperaturanyň artmagy bilen azalýar:

$$\sigma = \frac{T_o}{\sigma_{01}} \frac{1}{T} \qquad \textbf{(7.2)}$$

(7.1) we (7.2) aňlatmalarda σ_0, σ_{01} we T_0 – konstantalar.

Metallarda elektronlaryň hereketiniň kanagatlandyrylan mukdar teoriýasyny klassyk mehaniki kanunlary esasynda gurmak mümkin däl. Ony aşakdaky mysaldan has aýdyn görünýär.

Eger metalda elektronlaryň ýylylyk hereketiniň orta kinetik energiýasy otag temperaturada eksperimental kesgitlense we şol energiýa degişli temperatura

$\frac{m\nu_2}{2} = \frac{3}{2}kT$ formula tapylsa, onda 10^5-10^6 K tertipdäki temperatura alarys. Şunuň ýaly temperatura ýyldyzlaryň içinde bolýar.

Indi sorag ýüze çykýar.

Näme üçin şol bir maddalar elektrik togyny gowy geçirýärler, başgalary bolsa geçirmeýärler.

Şu soraga jogap bermek üçion elektronlaryň tolkun häsiýetlerini göz öňüne tutmaly.

Kristallik gözenekleri emele gelende atomlaryň özara täsirleri astynda atomlaryň energetik derejeleri giňelip energetik zonalara öwrülýärler.

Atomlarda elektronlaryň ömri oýatma ýagdaýynda τ ~ 10^{-8}s deňdir.

Näkesgitsizlik prinsipine laýyklykda şol ýagdaýda energetik derejeleriniň ini deňdir $\Delta E \approx \frac{\hbar}{\tau} \approx 10^{-7}$ ew. Şu san atomlaryň goýberýän spektr çyzyklarynyň tebigi inini kesgitleýär.

Gaty jisimleriň geçirijiliginiň zolak nazaryýeti

Pauliň prinsipine laýyklykda her bir energetik derejesinde gapma garşy gönükdirilen spinleri bolan diňe iki sany elektron bolup biler. Eger kristaldaky elektronlaryň sany çäklenen bolsa, onda diňe aşakdaky energetik zonalar dolýar. Galanlary boş bolup galýar.

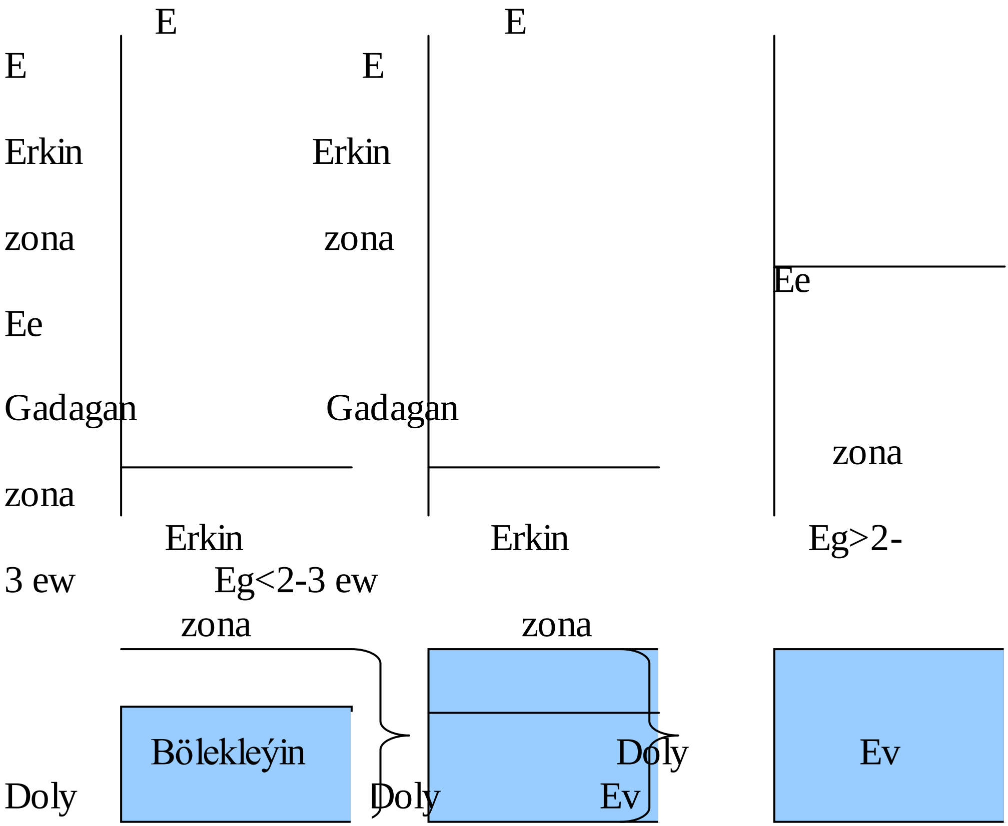
Zonalaryň elektronlar bilen doldurylmagynyň dürli wariantlaryna seredeliň.

1. Iň sonky zona elektronlar bilen bölekleýin dolan diýip çaklaliň. Şu zona walent elektronlary bilen dolýan

sebäbli, oňa walent zona diýilýär. Daşky elektrik meýdany astynda elektronlar tizlenip, şol zonanyň ýokarky boş derejelerine geçýärler. Kristalldan tok akyp başlar. Şeýlelikde, bölekleýin dolan walent zonasy bolun kristallar elektrik togyny gowy geçirýärler, ýagny metalldyrlar.

Natriýniň atomyny mysal getirip bilýäs. Natriýniň her bir atomy 11 elektrondan ybaratdyr. Energetik ýagdaýlara görä olaryň paýlanylyşy: $1s^2\ 2s^2\ 2p^2\ 3s^1$.

Atomlar kristalla birleşende olaryň energetik derejeleri zonalara öwrülýärler. Atomyň içki gatlaklaryndaky elektronlar 1s, 2s we 2p emele gelen zonalary doldurýarlar, sebäbi 2N, 2N we 6N ýagdaýlara degişli laýyklykda 2N,



dolan zona
zona zona
zona
Metal Metal Dielektrik
Ýarymgeçiriji

Sur. 7.1

Ev – walent zonanyň çägi
Ee – geçiriji zonanyň çägi
Eg – gadagan zonanyň ini.

2N we 6N elektronlar düşýär. Walent zona 3s ýagdaýlary bar. Olara N elektronlar düşýär (her atoma bir walent elektron). Şeýlelikde natriýniň walent zonasy diňe ýarpy dolan. Şuňa meňzeş ýaly zonalar başga aşgar metallarda-da dolýarlar.

2. Indi walent zonasy elektronlar bilen doly doldyrylan we indiki rugsat edilen boş zona bilen üsti örtülýär diýip çaklalyň. Eger şonuň ýaly kristala daşky elektrik meýdany göýulsa, onda elektronlar erkin zonalaryň derejelerine geçýärler we tok emele gelýär. Şonuň ýaly zona gurluşly kristall – magniý metaldyr. Magniýniň her bir atomynyň ($1s^2$ $2s^2$ $2p^6$ $3s^2$) walent gatlagynda iki elektron ýerleşýär. Kristalliki magniýde walent elektronlary 3s – zonany bütinleý doldurýarlar, ýöne şu zona indiki 3p – derejelerinde düzülen rugsat edilen zona bilen örtülýär.

3. Goý indi walent zonasy elektronlar bilen bütinleý doldurulan we indiki boş zonadan ini 2-3 ew bolan gadagan zonadan aýrylan. Şonuň ýaly zona gurluşly kristalda daşky elektrik meýdany elektrik togyny döredip bilmeýär, çünki doly zonadaky elektronlar öz energiýasyny üýtgedip bilmeýär. Mysal üçin, şonuň ýaly ýagdaý NaCl kristallynda bolýar. Natriýniň položitel zarýadlanan ionlarynyň

konfigurasiýasy Na^+ ($1s^2$ $2s^2$ $2p^6$), otrisatel zarýadlanan hloryň Cl^- ($1s^2$ $2s^2$ $2p^6$ $3s^2$ $3p^6$).

Iň soňky doly zona 3p Cl^-, boş zona 3s Na^+. Energetiki deşik deňdir 9 ew.

Eger gadagan zonanyň ini 2-3 ew az bolsa, onda kristala ýarymgeçiriji diýilýär. Ýarymgeçirijilerde ýylylyk energiýanyň kömegi bilen elektronlaryň görnüp duran sany erkin zona geçýärler. Şol zona **geçiriji zona** diýýärler. Örän pes temperaturalda islendik ýarymgeçiriji dielektrige öwrülýär.

Şeýlelikde, metallaryň we dielektrikleriň arasynda hil tapawudy bar, dielektrikleriň we ýarymgeçirijileriň bolsa diňe mukdar.

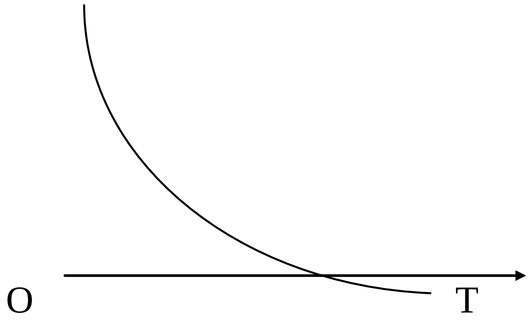
Zonalaryň doldurylyşy metallarda, dielektriklerde we ýarymgeçirijilerde Sur. 7.1 shemalaýyn görkezilen.

Ýarym geçirijileriň hususy geçirijiligi. Garyndy ýarym geçirijileriň geçirijiligi.

Himiki arassa ýarymgeçirijileriň geçirijiligine **hususy geçirijilik** diýilýär, ýarymgeçirijileriň özlerine bolsa **hususy ýarymgeçirijiler** diýilýär.

Bu ýarymgeçirijilere arassa germaniý, kremniý, selen we başg., himiki birleşmeleri PbS, JnSb, GaAs, CdS we başgalary degişlidirler.

Elektrik geçirijiliginiň temperatura bagly bolan häsiýeti boýunça ýarymgeçirijiler has aýdyň tapawutlanýarlar. Olaryň udel garşylygyň metallaryňky ýaly temperaturanyň ýokarlanmagy bilen artman, eýsem tersine, birden kemelýändigini ölçegler görkezýär (Sur. 7.2).



Sur. 7.2

Absolüt nula ýakyn temperaturalda ýarymgeçirijileriň udel garşylygynyň örän ýokarydygy şol suratda şekillendirilen grafikden görüp bolar.

Bu bolsa pes temperaturalarda ýarymgeçirijiniň özüni dielektrik ýaly alyp barýandygyny aňladýar. Temperatura ýokarlandygyça udel garşylyk çalt kemelýär.

Kremniý gyzdyrylanda walentli elektronlaryň kinetik energiýasy ýökarlanýar we aýry-aýry baglanyşyklar üzülip başlaýär. Käbir elektronlar özleriniň “köp ýörän ýollaryny” taşlaýarlar we metaldaky elektronlara meňzeşlikde erkin bolýarlar. Olar elektrik meýdanynda gözenegiň düwünleriniň arasynda orunlaryny çalşyryp, elektik toguny doredýärler.

Ýarymgeçirijilerde erkin elektronlaryň bar bolmasy bilen şertlenen olaryň geçirijiligine **elektron geçirijilik** diýýärler. Temperatura ýokarlanda üzülen baglanyşyklaryň sany, diýmek, erkin elektronlaryň sany hem köpelýär. 300-den 700 K çenli gyzdyrylanda zarýady erkin göçürijileriň sany 10^{17}-den 10^{24} l/m^3 çenli köpelýär. Bu bolsa garşylygyň kemlemegine getirýär.

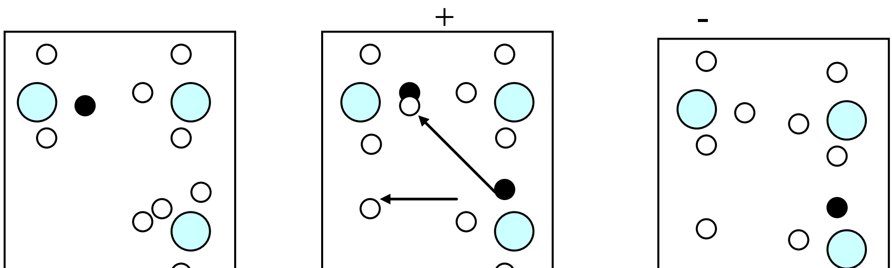
Baglanyşyk üzülende elektron ýetmeýän boş orun emele gelýär. Oňa **deşijek** diýýärler. Deşijekde beýleki kadaly baglanyşyklara garanda, artykmaç položitel zarýad bardyr.

Kristalda deşijigiň ýagdaýy üýtgeýändir. Aşakdaky proses üznüksiz suratda bolup geçýär. Elektronlaryň baglanyşygyny üpjün edýän elektronlaryň biri deşijegiň emele gelip ýerine böküp geçýär we şol ýerde jübüt elektron baglanyşygyny dikeldýär, ýaňky elektrionyň böküp gaýdan ýerinde bolsa täze deşijik emele gelýär. Şeýlelikde, deşijik tutuş kristal boýunça ornuny çalşyryp biler.

Eger misgadaky elektrik meýdanynyň güýjenmesi nula deň bolsa, onda položitel zarädlaryň orun çalşyrmasyna deň bahaly bolan deşijikleriň orun çalşyrmasy tertipsiz görnüşde bolup geçýär, şona görä-de elektrik toguny döretmeýär. Elektrik meýdanynyň bir wagtynda deşijekleriň tertipleşen orun çalşyrmasy emele gelýär we şeýlelikde, erkin elektronlaryň elektrik togunyň üstüne deşijikleriň orun çalşyrmasy bilen baglanyşykly bolan elektrik togy goşulýar. Deşijekleriň hereket edýän ugry elektronlaryň hereket edýän ugryna garşylyklydyr. Elektron we deşijikli geçirijiligiň mehanizmi Sur. 7.3 düşündirilýär.

Şeýlelikde, ýarymgeçirijilerde iki tipli zaräd äkidijiler: elektronlar we deşijikler bolýar.

Şona görä-de ýaryngeçirijileriň diňe elektron geçirijiligi däl-de, eýsem deşijikli geçirijiligi hem bardyr.



Sur. 7.3

Diýmek, arassa ýarymgeçirijileriň geçirijiligi (hususy geçirijilik) erkin elektronlaryň orun çalşyrmasy (elektron geçirijilik) we baglanyşykly elektronlaryň jübüt elekton baglanyşyklaryň boş orunlara geçýän orun çalşyrmasy (deşijekli geçirijilik) bilen amala aşyrylýar.

Geçiriji zonadaky elektronlara we walent zonadaky deşijiklere effektiw massasyny goşup ýazmak, onda olary erkin diýip alyp bolar we Drude-Lorentsiň erkin elektronlar üçin modeline laýyklykda aşakdaky aňlatmany ýazyp bolar:

$$j = neV_{orta} = \frac{ne^2\tau}{m^*}E \qquad \textbf{(7.3)}$$

Bu ýerde V_{orta} – elektronlaryň ugurdaş hereket etmegiň tizligi.

m* – elektronyň effektiw massasy.

τ – relaksasiýa wagty.

Onda udel elektrik geçiriji üçin alarys:

$$\sigma = ne^2\tau / m^* \qquad \textbf{(7.4)}$$

Köplenç we σ ululyklary başga görnüşde ýazýarlar. Birlik güýjenmeli elektrik meýdanynda elektronlaryň ugurdaş hereket etmegine deň bolan ululyk girizeli:

$$\mu_n = \frac{V_{orta}}{E}\left[\frac{sm^2}{W \cdot S}\right]$$

Bu ululyga **elektronlaryň süýşýänligi** diýilýär. (7.3) we (7.4) aňlatmalary göz öňüne tutsak, alarys:

$$j = ne\mu_n E \qquad \textbf{(7.5)}$$

$$\sigma = ne^2\mu_n \qquad \textbf{(7.6)}$$

Bu ýerde $$\mu_n = \frac{\ell\tau}{m^*}$$

(7.7)

Edil şonuň ýaly aňlatmalary deşijikli düzmeler üçin ýazyp bolar.

Netijede, hususy ýarymgeçirijileriň elektrik geçirijiligi elektron we deşijik komponentleriniň jemine deňdir:

$$\sigma = ne\mu_n + pe\mu_n \qquad \textbf{(7.8)}$$

Bu ýerde μ_p – deşijikleriň ugurdaş hereket etmegi.

n we p – zarýady göçürijileriň sany.

Garyndy ýarymgeçirijileriň geçirijiligi.

Ýarymgeçirijileriň hususy geçirijiligi adatça uly däldir, çünki erkin elektronlaryň sany azdyr: meselem, otag temperaturasynda germaniý elementiniň 1sm^3-däki atomlaryň sany 10^{23} çemesindedir. Şeýlelikde, erkin elektronlaryň sany atomlaryň umumy sanynyň takmynan on milliarddar bir bölegini düzýär.

Ýarymgeçirijileriň düýpli aýratynlygy olarda garyndy bolan wagtynda hususy geçirijilik bilen bir hatarda goşmaça – **garyndyly geçirijilik** döreýändiginden ybaratdyr. Garyndynyň konsentrasiýasyny üýtgedip, ol ýa-da beýleki alamatly zaräd ekidijileriň sanyny ep-esli üýtgetmek bolar.

Şu sebäbli hem ýa-ha otrisatel, ýa-da polozitel zarýadlanan zarýad ekidijileri agdyklyk edýän konsentrasiýaly ýarymgeçirijileri döretmek boalr. Ýarymgeçirijileriň bu aýratynlygy olaryň praktikada ulanylyşyna giň mümkinçilik açýär.

Garyndylaryň bar wagtynda meselem, myşýagyň atomlary, hatda olaryň örän az könsentrasiýasynda hem erkin elektronlaryň sany köp esse artýan eken. Ol aşakdaky sebäbe görä bolýar. Myssýagyň atomlarynyň bäş sany walentli atomlar bilen, meselem kremniniň atomlary bilen kawalent baglanyşygy döretmäge gatnaşýar. Bäşinji walentli elektron atom bilen gowşak baglanyşykda bolýar. Ol myşýagyň atomlaryny aňsatlyk bilen taşlaýar we erkin bolýar. Myşýak atomlarynyň on milliondan bir ülşi goşulanda erkin elektronlaryň konsentrasiýasy $10^{16}sm^{-3}$ deň bolýar. Bu bolsa arassa ýarymgeçirijileriň erkin elektronlarynyň konsentrasiýasyndan müň esse köpdür.

Elektronlaryny ansatlyk bilen berýän, diýmek, erkin elektronlaryň sanyny köpeldýän garyndylara **donor** (beriji) **garyndylar** diýilýär.

Donor garyndyly ýarymgeçirijileriň elektronlarynyň sanynyň (deşijikleriň sany bilen deňeştirilende) köpdügine görä, olara **n – tipli** (negativ – otrisatel diýen sözden) **ýarymgeçirijiler** diýýärler.

Eger garyndy hökmünde atomy üç walentli bolan indiý peýdalanylsa, onda ýarymgeçirijiniň geçirijilik häsiýeti üýtgeýär. Indi goňşulary bilen kadaly jübüt elektron baglanşyklaryny emele getirmek üçin indiýniň atomyna bir elektron ýetmeýär.

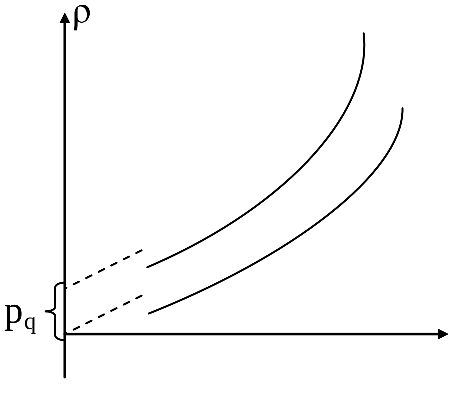
Netijede deşijek emele gelýär. Kristaldaky deşijekleriň sany garyndynyň atomlarynyň sanyna deňdir. Şonuň ýaly garyndylara **akseptor** (kabul ediji) **garyndylar** diýýärler.

Elektrik meýdany bolsa deşijekler meýdan boýunça orunlaryny çalşyrýarlar we deşijekli geçirijilik döreýär. Deşijekleri geçirijiligi elektronly geçirijilikden agdyklyk edýän ýarymgeçirijilere **p – tipli** (positiv – položitel diýen sözden) **ýarymgeçirijiler** diýýärler.

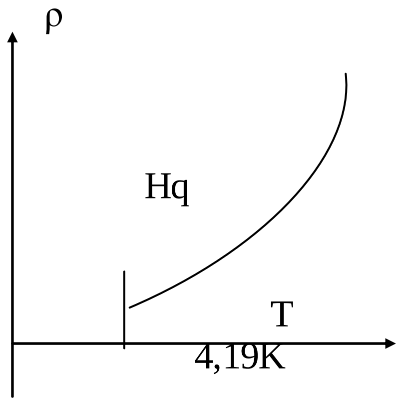
P – tipli ýarymgeçirijide zarädy esasy ekidijiler deşijekdirler esasy däl ekidijiler bolsa elektronlardyr.

Metallaryň elektrik geçirijiliginiň temperatura baglylygy. Aşageçirijilik.

Geçirijileriň garşylygy temperatura baglydyr. Metallaryň garşylygy temperaturanyň peselmegi bilen azalýar (Sur. 3).



Sur. 7.4



Sur. 7.5

1911-nji ýylda golland fizigi Kamerling-Onnes ajaýyp hadysany – **aşageçirijiligi** açdy. Ol simap sowadylanda onuň garşylygynyň başda kem-kemden üýtgeýändigini, soňra 4,19 K temperaturada bolsa birden nula çenli peselýändigini ýüze çykardy (Sur. 7.5). Ol hadysa aşageçirijilik diýip at berlipdir. Soňra ýene-de köp aşageçirijiler açylypdyr.

Aşageçirijilik jisimleriň köpüsinde örän pes temperaturalda bolup geçirijide tok döredilse, soňra bolsaelektrik togynyň çeşmesi aýrylsa, onda şol togyň güýji islendikçe uzak wagtlap üýtgemeýär. Adatdaky aşageçiriji däl geçirijide elektrik togy bu halatda kesilýär.

Aşageçirijiler praktikada giňden ulanylýar. Meselem, aşageçirijili sargyly kuwwatly elektromagnitleriguryarlar, olar energiýa sarp etmezden uzak wagt dowamynda magnit meýdanyny döredýärler. Aşageçirijili sargyda ýylylyk çykmaýar ahyryn.

Emma aşageçiriji magnitiň kömegibilen islendigiňçe güýçli magnit meýdany alyp bolmaýar. Örän güýçli magnit meýdany aşageçirijilik halyny bozýar. Şona görä-de aşageçiriji halyndaky her bir geçiriji üçin tok güýjiniň kritiki bahasy bar.

Aşageçiriji magnitler magnit meýdanynda hereket edýän çüwdürimleriniň mehaniki energiýasyny elektrik energiýa öwurýän magnitogidrodinamiki generatorlarda peýdalanýarlar.

Eger aşageçiriji materiallary otag temperaturasyna ýakyn temperaturalarda döretmek başartmady, onda möhüm tehniki problema – sim boýunça energiýany ýitgisiz geçirmek problemasy çözülerdi.

Aşageçirijiligi düşündirmek diňe kwant teoriýasynyň esasynda mümkin. Ol diňe 1957-nji ýylda amerikan abymlary J. Bardin, L. Kuper, J. Şriffer we sowet fizigi akademik N. N. Bogolübow tarapyndan berildi. (BKŞ - nazaryýeti).

1986-njy ýylda ýokary temperaturaly aşageçirijilik açyldy. Aşageçirijilik halyna 100 K töweregindäki temperaturada geçýän lantanyň, bariniň we beýleki elementleriň (keramikanyň) çylşyrymly oksid birleşmeleri alyndy. Bu bolsa atmosfera basyşynda suwuk azotyň gaýnamak temperaturasyndan ýokarydyr.

8. Gaty jisimleriň magnit häsiýetleri

Eger güýjemesi H we induksiýasy $B = \mu_0 H$ bir jynsly magnit meýdanyna göwrümi V bolan izotrop jisimi ýerleşdirsek, onda meýdanyň täsiri astynda jisim “M” magnit momentine eýe bolýar ýa-da magnitlenýär.

Magnit momentiň jisimiň göwrümine bolan gatnaşygyna **magnitlenme** diýýärler:

$$I = \frac{M}{V} \qquad \textbf{(8.1)}$$

Jisimi deňölçegli däl magnitlendiremizde

$$I = \frac{dM}{dV} \qquad \textbf{(8.2)}$$

Magnitlenme wektor ululygydyr. Bir jynsly magnitiklerde magnit meýdanyň $\vec{I}$ güýjenmesine ($\vec{H}$) ýa-da paralleldir, ýa-da antiparalleldir. SI ulgamynda M-iň ölçeg birligi ω·s·m = wb·m, göwrümiň m3, magnitlenmäniň $\frac{\omega \cdot S}{m^2} = \frac{\omega b}{m^2}$;

I-niň B magnit induksiýasyna bolan gatnaşyga magnit kabul edijiligi diýýärler:

$$\partial\ell = \frac{I}{B} = \frac{I}{\mu_0 H} \qquad \textbf{(8.3)}$$

Bu ýerden

$$I=\partial\ell B=\partial\ell\mu_0 H \qquad \textbf{(8.4)}$$

$\partial\ell$-nyň san bahasyna we ululygyna görä hemme maddalary üç uly toparlara bölüp bolýar: **diamagnetiklere**, **paramagnetiklere** we **ferromagnetiklere**.

Diamagnetik jisimlerde $\partial\ell$ uly däl onuň alamaty otrisatel we daşky magnit meýdanyna we temperatura bagly däl. Diamagnetikler daşky meýdanyň ugryna garşymagnitlenýärler, şonuň üçin olar güýjenmesi uly bolan oblastlaryndan özlerini itip çykarýarlar.

Paramagnetik jisimleriň hem magnit kabul edijiligi uly däl, emma diamagnetiklere görä ol položiteldir. Şonuň ýaly jisimler meýdanyň ugry boýunça magnitlenýärler we güýjenmäniň maksimal bolan oblastyň içine dartyrýärlar.

Tablisa 8.1

Diamagnetikler	$\partial\ell$	Paramagnetikler	$\partial\ell$	Ferromagnetikler	$\partial\ell$
Cu	$-0{,}9\cdot10^{-5}$	Pt	$26\cdot10^{-5}$	Fe	1000
Bi	$-18\cdot10^{-5}$	O_2	$360\cdot10^{-5}$	Ni	240

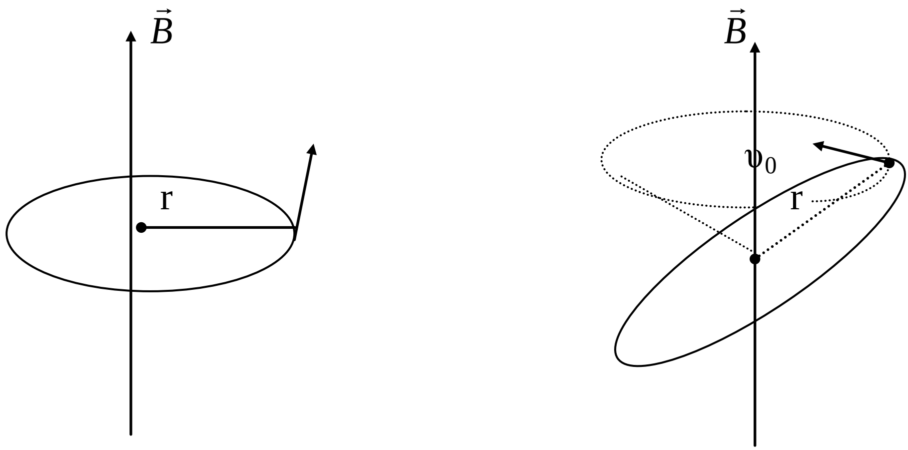
Almaz (C)	$-2\cdot10^{-5}$	Fl_2O_3	$140\cdot10^{-5}$	Co	150
Ge	$-0,8\cdot10^{-5}$	$FeCl_2$	$360\cdot10^{-5}$	Permaloý (78% Ni, 21% Fe)	8000
Si	$-0,3\cdot10^{-5}$	CoO	$580\cdot10^{-5}$		
Se	$-1,7\cdot10^{-5}$	$NiSO_4$	$120\cdot10^{-5}$	Supermaloý (79% Ni, 15%Fe, 5% Cr)	72000
He	$-1,9\cdot10^{-6}$	Li	$25\cdot10^{-6}$		

Ferromagnetik jisimleriň magnit kabul edijiligi položiteldir, ýöne paramagnetiklere görä olaryň san bahasy örän ýokarydyr. Şondan başga-da $\partial\ell$ daşky magnit meýdanynyň güýjenmesine baglydyr. Şonuň ýaly jisimlerde magnitlenme daşky magnit meýdanyny aýyranymyzda nola deň bolanak.

Birinji tablisada käbir diamagnetik, paramagnetik we ferromagnetik jisimleri we olaryň magnit kabul edijiligi getirilipdir.

Gaty jisimleriň diamagnit we paramagnit häsiýetleri.

$$E = \left|\frac{\Delta \Phi}{\Delta T}\right|$$



a) b)

Sur. 8.1

Diamagnetizmiň fiziki tebigatyny atomyň klassiki modeliniň esasynda düşündirip bolýär. Şol model laýýklykda elektronlar ýadronyň töwereginde ýapyk orbitalar boýunça hereket edýärler.

Her birelektron orbitasy bir burumly toga meňzeşdir. Magnit meýdanynda şonuň ýaly burumyň tertibi elektromagnetizmiň kanunlary bilen kesgitlenýär.

Lensiň kanunyna laýýklykda ýapyk konturda induksiýanyň EHG moduly boýunça kontur bilen çäklenen üsti kesip geçýän magnit akymynyň üýtgeýiş tizligine deňdir:

Şoňa görä-de induksion togyň güýji kontur bilen çäklenen üsti kesip geçýän magnit akymynyň üýtgemek tizligine proporsionaldyr:

$$J \sim \frac{\Delta \Phi}{\Delta T}$$

Bu bolsa goşmaça magnit momentiniň döremegine getirýär. Şol momentiň ugry bolsa daşky magnit meýdanynyň ugryna garşydyr. Konturdaky tok bilen baglanyşykly magnit momentine **diamagnit momenti** diýilýär.

Diamagnit kabul edijiligini hasaplamak üçin radiusy “r” bolan tegelek elektron orbitasyna seredeliň (Sur. 8.1a).

ω_0 bilen elektronyň hereketiniň burç tizligini belgiläriň. Orbital magnit momenti (“i” burumly toga meňzeş) deňdir:

$$M = iS = -\frac{\ell\omega_0}{2\pi}S \qquad \textbf{(8.5)}$$

Bu ýerde i – konturdaky tok.

S – orbitanyň meýdany.

Magnit meýdanynda burç tizligi $\Delta\omega$ çenli üýtgeýär we diamagnit momenti ýüze çykýär: $\Delta M = -\frac{\ell S}{2\pi}\Delta\omega$ **(8.6)**

Eger biz $\Delta\omega$ tapyp bilsek, onda indusirlenen magnit momentini hem tapyp bileris.

Magnit meýdany bolmadyk ýagdaýynda elektrona radius boýunça gönükdirilen $F_0 = m\omega_0^2 r$ güýç täsir edýär (m – elektronyň massasy).

Indi elektron orbitasyny magnit meýdanyna girizeliň. Wektor $\vec{B}$ orbitanyň tekizligine perpendikulýar bolmalydyr.

Onda elektrona r_0 radius boýunça gönükdirilen $F_\ell = \ell\vartheta_0 B$ goşmaça Lorensiň güýji täsir edip başlaýar (bu ýerde υ_0 – elektronyň hereketiniň çyzykly tizligi). Netijeli merkeze ymtylýan güýç F_0+F_ℓ jemine deň bolmaly:

$$F = m\omega_1^2 r = F_0 + F_\ell = m\omega_0^2 r + \ell\vartheta_0 B \qquad \textbf{(8.7)}$$

ýa-da

$$m(\omega_1^2 - \omega_0^2)r = mr(\omega_1 - \omega_0)(\omega_1 + \omega_0) = \ell\vartheta_0 B$$

Bu deňlemeden görüşimiz ýaly ω_1 burç tizligi ω_0-dan kän tapawutlanmaly däl.

Şeýlelikde

$$mr(\omega_1-\omega_0)(\omega_1+\omega_0) \approx mr\cdot\Delta\omega\cdot 2\omega_0 = \ell\upsilon_0 B = \ell\omega_0 rB$$

Bu ýerden

$$\Delta\omega = \frac{\ell B}{2m} \qquad \textbf{(8.8)}$$

$\Delta\omega$ ululyk Larmoryň ýygylygy, ýa-da presessiýanyň larmor ýygylygy diýip atlandyrylýar.

(8.6) we (8.8) aňlatmalardan gelip çykýär:

$$\Delta M = -\frac{\ell^2 S}{4\pi m} B \qquad \textbf{(8.9)}$$

Eger maddanyň birlik göwrüminde N atom bolsa, onda magnitlenme

$$I = N\Delta M_a = -\frac{Nz\ell^2 < r^2 > B}{6m} \qquad \textbf{(8.10)}$$

Bu ýerde ΔM_a – köpelektronly atomyň magnit momenti.

$$\Delta M_a = \frac{\mu_0 I}{B} = -\frac{z\ell^2 < a^2 >}{4m} B \qquad \textbf{(8.11)}$$

(8.10) deňlemeden birlik göwrüm üçin diamagnit kabul edijiligiň aňlatmasyny alýas:

$$\partial\ell_d = \frac{\mu_0 I}{B} = -\frac{N\mu_0 z^2 \ell^2 < r^2 >}{6m} \qquad \textbf{(8.12)}$$

(8.12) aňlatmadan gelip çykýän netije: diamagnit kabul edijiligi temperatura bagly däl we elementiň Z tertip nomerine porporsionaldyr.

Paramagnetiklerde magnitlenme meýdanyň ugry boýunça gönükdirilen, ýagny $\partial\ell>0$ we temperatura baglydyr:

$$\partial\ell = \frac{C}{T} \qquad \textbf{(8.13)}$$

Bu baglanyşykly ilkinji P. Küri tarapyndan açyldy we küriniň kanuny diýip atlandyrylýär.

Paramagnetizme aşakdakylar eýe bolýarlar:

1) jübüt däl sanly atomlar we molekulalar (mysal üçin, aşgar metallaryň erkin atomlary, NO birleşmäniň molekulasy). Şu atomlaryň we

molekulalaryň kompensirlenmedik spin magnit momenti bardyr.

2) Doly gurulmadyk içki gatlaklara eýe bolan erkin atomlar we ionlar (meselem, geçiş elementler, selçen ýer ýüzindäki elementler) .
3) Elektronlaryň sany jübüt bolan käbir molekulalar (meselem O_2 we S_2).
4) Metallaryň hemmesi.

Paramagnerizmiň teoriýasy ilkinji P. Lanžewen tarapyndan dörediIdi. Birlik göwrüminde N sany atomlar bolan sreda seredeliň. Goý her bir atomyň magnit momenti $\vec{M}$ deňdir, atomlaryň arasyndaky özara täsir ýok. Magnit meýdany bolmadyk ýagdaýynda şol momentler dürli taraplara gönüktirilen. Şonuň üçin jemleýji magnitlenme nola deňdir. Magnit meýdanynda magnit momentleri meýdanyň ugry boýunça gönüktirilýärler. Şonda meýdanyň ugry boýunça gönükdirilen magnitlenme döreýär.

Lanžeweniň teoriýasyna laýyklykda paramagnit kabul edijiligi üçin aşakdaky aňlatma alynýar:

$$\partial\ell_p = \frac{\mu_0 I}{B} = \frac{N\mu_0 M^2}{3K_B T} \qquad \textbf{(8.14)}$$

(8.14) gelip çykýan netije: $\partial\ell$ temperatura ters proporsionaldyr, bu bolsa tejribe bilen doly ylalyşýar (Küriniň kanuny).

Küriniň hemişeligi:

$$C = \frac{N\mu_0 M^2}{3K_B}$$

Paramagnetizme eýe bolan gaty jisimleriň köpüsinde magnit kabul edijiligiň temperatura baglanyşyklygy

Küriniň kanuny bilen däl-de, Küri-Weýssiň kanuny bilen beýan edilýär:

$$\partial\ell = \frac{C}{T-\theta} \qquad \textbf{(8.15)}$$

Bu ýerde θ – položitel ýa-da otrisatel temperatura (paramagnit Küri nokady).

Ferromagnetikler diýilýän (Fe, Co, Ni, selçenýar elementleri we köp erginler) uly magnit syzyjylykly ($\mu >> 1$) jisimlerde magnit meýdany elektronlaryň diňe ýadronyň töwereginde aýlanma netijesinde döremän, eýsem **hususy aýlanmasy** netijesinde döreýär. Elektronlar hemişe öz oklarynyň töwereginde aýlanan ýaly bolup we zarýad alyp, olaryň ýadronyň daşynda orbital hereketiniň hasabyna ýüze çykýan meýdan bilen bir hatarda magnit meýdanyny döredýärler. **Aýlanan** sozüniň ýanyna ýaly sözüniň goşulmagy elektronyň öz häsiýetleri örän kiçijik şarjagaza meňzeş däldigi üçindir. Onuň hereketi Nýutonyň klassyk mehanikanyň kanunyna däl-de, kwant mehanikanyň kanunyna boýun egýär. Elektronyň hususy aýlanma momentine **spin** diýilýär.

Ähli ferromagnit jisimleriň aýratynlygy olaryň atomlarynyň d we f gatlardaky kompensirlenmedik spin magnit momentlerinden ybaratdyr. Emma ferromagnetizm döremeginde kompensirlenmedik spin magnit momentleriň bolmagy zerurdyr, ýöne ýeterlik däl.

1928-nji ýylda Frenkel, soňra Geýzenberg ferromagnetizm – bu özara täsir edýän elektronlaryň aýratyn häsiýetidir diýip çakladylar. Iki elektronyň elektrik özara täsir etmekligiň jikme-jik kwant-mehaniki hasaby aşakdaky netijä getirýär:

Özara täsir etmekligiň netijeli energiýasy klassiki kulon çleninden başga ýene-de spinleriň özara oriýentasiýasyna bagly bolan ýene-de goşmaça kwant çleninden ybaratdyr. Bu goşmaça energiýa **çalyş** energiýa diýip atlandyrylýar.

Ýonekeý ýagdaýda iki elektronlaryň özara täsirini aşakdaky görnüşde görkezip bolar:

$$E_{calys} = -A(\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{\sigma}_2) \qquad \textbf{(8.16)}$$

Bu ýerde A – energiýanyň ölçeg birligini alyp barýan parametr. Şol parametre **çalyş integraly** diýilýär.

$\bar{\sigma}_1$ we $\bar{\sigma}_2$ - spinleriň birlik wektorlary.

Eger A > 0 bolsa, onda minimum energiýa degişli spinleriň parallel ugruktyrylmagy laýyklydyr, ýagny ($\bar{\sigma}_1 \cdot \bar{\sigma}_2$) = 1.

Eger A < 0 bolsa, onda minimum energiýasyna spinleriň antiparallel ugruktyrylmagy laýyklydyr: ($\bar{\sigma}_1 \cdot \bar{\sigma}_2$) = -1.

Köp sanly elektron bolan ýagdaýynda çalyş energiýasyny (8.16) meňzeş bolan aňlatma bilen ýazyp bolar:

$$E_{calys} = -\sum_{i,j} A_{ij}(\bar{S}_i \cdot \bar{S}_j) \qquad \textbf{(8.17)}$$

Bu ýerde S_i we S_j – özara täsir edýän elektronlaryň netijeli spinleri.

Kwant teoriýasynda ferromagnetizm hadysasyny düşündirmek üçin iki esasy model ulanylýar:

1. Fermi-Dirakyň statistikasyna boýun egýän elektronlaryň umumylaşdyrylan modeli.

Bu model Frenkel tarapyndan hödürlendi we çalyş özara täsirini göz öňüne tutýar. Frenkeliň teoriýasynda elektron gazyň käbir dykyzlygynda elektronlaryň kinetik energiýasynyň artmagynda garamazdan öz-özünden döreýän magnitlenme ýagdaýy emele gelmek mümkindir. Elektronlaryň kinetik energiýasynyň artmagy Pauliniň prinsipi bilen düşündirilýär. Parallel prinsipi bilen düşündirilýär. Parallel ugrukdyrylan spinler bir energetiki derejäni tutyp bilmeýärler. Şonuň üçin spin öwrülinde elektron uly energiýaly ýagdaý tutmaly bolýar.

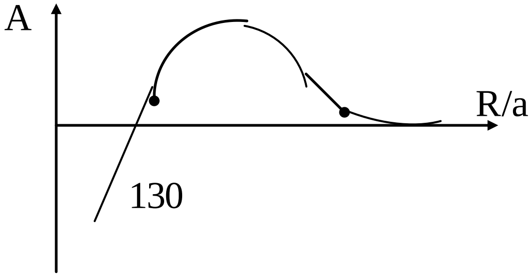
2. Geýzenbergiň modeli.

Bu modelde tertipleşen ferromagnit gurluşyny düzýän magnit momentleri kristallik gözenegiň düwünleriniň töwereginde toplanýarlar diýip çaklanyldy. Geýzenbergiň modeline laýyklykda ferromagnetizm d- ýa-da f- gatlakly goňşy ionlaryň magnit momentleriniň tertipleşmegi bilen baglaşyklydyr. Goňşy ionlaryň elektronlarynyňözara täsiri **göni çalyş** diýip atlandyrylýar.

S. P. Şubin we S. W. Wonsowskiý öz ylmy işlerinde göni çalyşmadan başga ferromagnetizmiň ýüze çykmagyna geçiriji elektronlaryň üsti bilen toparlanan elektronlaryň gytak çalyşy hem getirip biler. Gytak çalyş köplenç selçenýer elementlerde bolýar.

Çalşyk energiýanyň san bahasy we alamaty atomlaryň aralygyna bagly.

Birinji suratda çalyş energiýanyň atomlaryň özara R arasynyň dolmadyk elektron gatlagynyň “a” radiusyna bolan gatnaşygyndan bolan baglanyşylygy görkezilipdir.



Sur. 8.2

Bu suratdan görüşimiz ýaly demir toparyndaky geçiş metallaryndan ferromagnetizm diňe demirde (α - Fe), kobaltda we nikelde bolup biler.

Şu toparyň Mn, γ – Fe we başga elementleri ferromagnetizm eýe bolmaly däldirler. Bu tejribe bilen subut edilýär. Emma käbir marganes elementini düzümlerinde saklaýan erginlerde, meselem MnSb, MnBi we başgalarynda ferromagnit häsiýeti ýüze çykýar. Bu maddalarda marganes elementiň atomlary bir birinden uzak aralykda ýerleşýärler, şonuň üçinem olar üçin çalyş integralyň alamaty položiteldir.

Çalyş energiýanyň orta bahasy aşakdaky formuladan kesgitläp bolar:

$$E_{çalyş} \approx - NzAy^2 \qquad \textbf{(8.18)}$$

Bu ýerde z – koordinasion san.

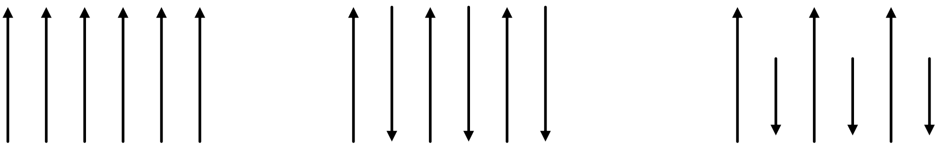
$$y = \frac{I}{N\mu_B}$$ - otnositel magnitlenme.

Magnitlenmäniň doýgun ýagdaýynda y = ±1, onda çalyş energiýanyň san bahasy iň kiçidir.

Ferromagnetiklerden başga ýene-de magnit tertipleşen maddalaryň uly topary bar. Şol maddalarda atomlaryň spin magnit momentleri antiparallel ugrukdyrylan. Spin magnit momentleriň antiparallel ugrukdyrylmagy size mälim boluşy ýaly otnositel çalyş özaratäsirinde (A < 0) ýüze çykýar. Edil ferromagnetiklerdäki ýaly bu ýerde magnit tertipleşme O^0K tä θ_N kritiki nokada çenli temperatura interwalynda bolýar. θ_N – Neeliň temperaturasy diýip atlandyrylýar. Magnit momentleriň antiparallel ugrukdyrylan ýagdaýynda netijeli magnitlenme nola çykýar. Eger-de bu ýagdaýda magnit momentiň doly kompensasiýasy bolmasa, onda **ferrimagnetizm** ýüze çykýar.

Ferrimagnetiklere ferritler degişlidirler. Ferritleriň himiki formulasy $MO \cdot Fe_2O_3$. Bu ýerde M – iki walentli metall (Mg^{2+}, Zn^{2+}, Cu^{2+}, Fe^{2+}, Mn^{2+}, Ni^{2+}).

Magnit tertipleşmäniň dürli görnüşleri ikinji suratda görkezilipdir.

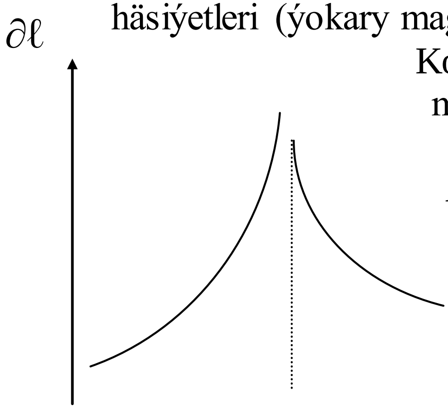


a b ç

Sur.8.3 Spin magnit momentiniň tertipleşmesi:

a – ferromagnit; b – antiferromagnit; ç – ferrimagnit

ferrimagnetikleriň köpüsi ion kristallara degişlidirler, şonuň üçin olaryň elektrik geçirijiligi pesdir. Göwnejaý magnit häsiýetleri (ýokary magnit syzyjylygy, uly



Kompensirlenen ferrimagnetizm bolan maddalary antifferomagnetikler diýip atlandyrylýarlar.

Antifferomagnetikleriň magnit kabul edijiliginiň temperatura görä baglanyşygy üçünji suratda görkezilipdir.

T > θN bolan ýagdaýda magnit kabul edijilik Küri-Weýssiň kanuny bilen beýan edilýär:

θ_N T

Sur. 8.4

doýgun magnitlenme we başgalar) bilen bilelikde adaty ferromagnetiklere görä bu olaryň artykmaçlygyny ýokary ýygylykly tehnikada peýdalanýarlar.

$$\partial\ell = \frac{C}{T + \theta_N} \qquad \textbf{(8.19)}$$

Şeýlelikde ferromagnetizm çalyş integraly položitel bolan maddalarda ýüze çykýar. Eger-de çalyş integralyň alamaty otrisatel bolsa, onda spinleriň antiparallel ugrukdyrylmaklary amatlydyr. Bu ýagdaýda antifferomagnetizm ýüze çykýar.

Edebiýat

1. Gurbanguly Berdimuhamedow. “Türkmenistanda saglygy goraýşy ösdürmegiň ylmy esaslary” - Aşgabat, 2007.
2. Türkmenistanyň Prezidenti Gurbanguly Mälikgulyýewiç Berdimuhamedow. - Gysgaça terjimehal. - Aşgabat, 2007.
3. “Halkyň ynam bildireni”. - Aşgabat, 2007.
4. Gurbanguly Berdimuhammedow. “Garaşsyzlyga guwanmak, Watany, halky söýmek bagtdyr”. - Aşgabat, 2007.
5. “Türkmenistanyň Prezidenti Gurbanguly Berdimuhamedowyň daşary syýasaty. Wakalaryň hronikasy”. - Aşgabat, 2007.
6. Gurbanguly Berdimuhamedow. “Türkmenistan – sagdynlygyň we ruhybelentligiň ýurdy” - Aşgabat, 2007.
7. Gurbanguly Berdimuhamedow. Eserler ýygyndysy. - Aşgabat, 2007.

8. Türkmenistanyň Prezidenti Gurbanguly Berdimuhamedowyň ýurdy täzeden galdyrmak baradaky syýasaty. - Aşgabat, 2007.
9. “Parahatçylyk, döredijilik, progress syýasatyny dabaralanmagy”. - Aşgabat, 2007.
10. Türkmenistanyň Prezidenti Gurbanguly Berdimuhamedowyň Umumymilli “Galkynyş” Hereketiniň we Türkmenistanyň Demokratik partiýasynyň nobatdan daşary gurultaýlarynyň bilelikdäki mejlislerinde sözlän sözi.
11. “Täze Galkynyş eýýamy. Wakalaryň senenamasy-2007 ýyl”. - Aşgabat, 2008.
12. Gurbanguly Berdimuhamedow. Ösüşiň täze belentliklerine tarap. Saýlanan eserler. I tom. - Aşgabat, 2008.
13. Akbibi Ỳusubowa “Beýik Galkynyşyň waspy”. - Aşgabat, 2008.
14. П.В.Павлов и А.С.Хохлов. “Физика твёрдого тела” - М., Высшая школа, 2000
15. Жданов Г.С. Хунджуа А.Г. Лекции по физике твёрдого тела. - М., МГУ, 1988
16. Ашкрофт Н.,Мермин Н. “Физика твёрдого тела”. - Т1,2 М., Мир, 1979
17. Абрикосов А.А Основы теории металлов. - М., Наука, 1987
18. Бонч-Бруевич.В.Л.,Калашников С.Г. Физика полупроводников. - М., Наука, 1979
19. Кчинчик Г.С. Физика магнитных явлений. - М., МГУ, 1985
20. Киттель Ч. Введение в физику твёрдого тела. - М., Наука, 1978

21. Шмидт В.В. Введение в физике сверхпроводимости. - МЧ НМО., М., 2000
22. Займан Дж. Принципы теории твёрдого тела. - М., Мир., 1974
23. Уэрт Ч.,Томсон Р. Физика твёрдого тела. - М., Мир 1974
24. Вонсовский С.В.Магнетизм. - М., Наука., 1971

Mazmuny