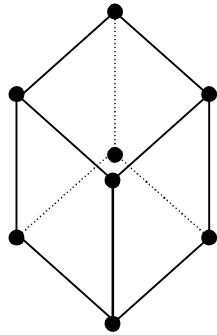


Trigonal sistemanyň elementar öýjügi romboedrdan bolup durýar, şonuň üçin bu sistema romboedrik sistemasy diýip atlandyrylýar. (5 - nji çyzgy).

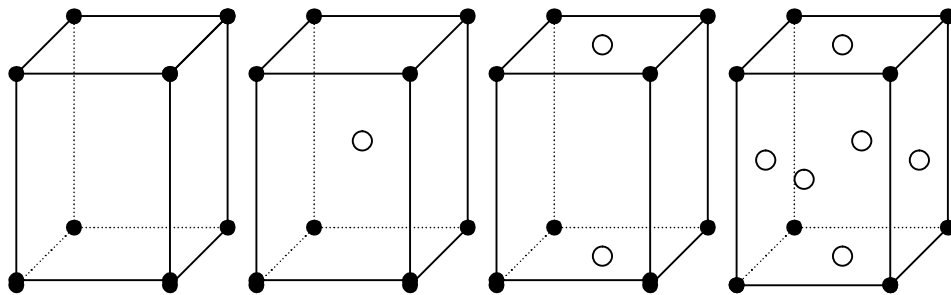


### 5 - nji çyzgy. Trigonal sistemasy

$$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ < 120^\circ$$

$$a = b = c$$

Rombik sistemanyň elementar öýjügi gapyrgalaryň uzynlygy dürli bolan göni burçly parallelepipedden bolup durýar. Onuň 4 sany giňişlikdäki gözenegi bar: ýönekeý, göwrümmerkezleşen, bazamerkezleşen, granymerkezleşen. (6 - nji çyzgy).



ýönekeý

göwrüm-  
merkezleşen

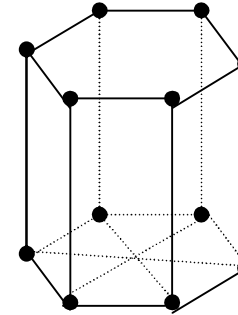
baza-  
merkezleşen

grany  
merkezleşen

6-njy çyzgy. Rombik sistemasy we onuň gözenekleri

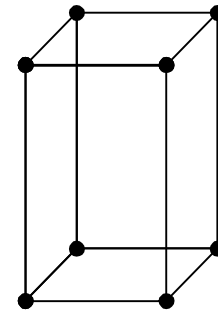


**TÜRKMENISTANYŇ PREZIDENTI  
GURBANGULY BERDIMUHAMEDOW**

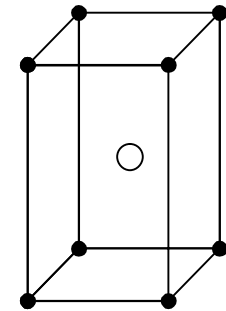


**3 - nji çyzgy. Geksagonal sistemasy**  
 $\alpha = \beta \quad \gamma = 120^0$   $a = b \neq c$

Tetragonal sistemanyň ýonekeý öýjügi göni burçly  
 parallelepipedden bolup durýar.  
 Onuň esasynda kwadrat ýatyr (4 - nji çyzgy).



ýonekeý

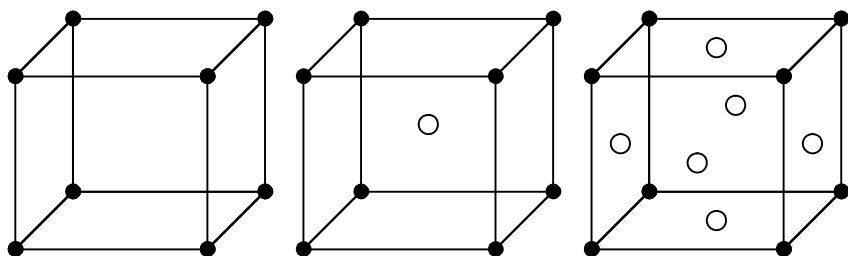


göwrümmerkezleşen

**4 - nji çyzgy. Tetragonal sistemasy we onuň  
 gözenekleri**  
 $\alpha = \beta = \gamma = 90^0$   $a = b \neq c$

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

- 1) kub ýa-da dogry (2 - nji çyzgy) 5)
- rombik (6 - nji çyzgy)
- 2) geksagonal (3 - nji çyzgy) 6)
- monoklin (7 - nji çyzgy)
- 3) tetragonal (4 - nji çyzgy) 7)
- triklin (8 - nji çyzgy)
- 4) romboedrik ýa-da trigonal (5 - nji çyzgy)



ýonekeý göwrümmerkezleşen granymerkezleşen

**2 - nji çyzgy**

Kub sistemasy we onuň gözenekleri  
 $\alpha = \beta = \gamma = 90^0$        $a = b = c$

Geksagonal sistemanyň elementar öýjügi göni prizmadan bolup durýar. Onuň esasynda 60 we 120 gradusly romb ýatyr. Öýjügiň oklarynyň arasyndaky iki sany burç göni, biri bolsa  $120^0$  -a deňdir (3 - nji çyzgy).



**TÜRKMENISTANYŇ DÖWLET TUGRASY**



**TÜRKMENISTANYŇ DÖWLET TUGRASY**

## TÜRKMENISTANYŇ DÖWLET SENASY

Janym gurban saňa, erkana ýurdum,  
Mert pederleň ruhy bardyr köňülde.  
Bitarap, garaşsyz topragyň nurdur,  
Baýdagyň belentdir dünýäň önünde.

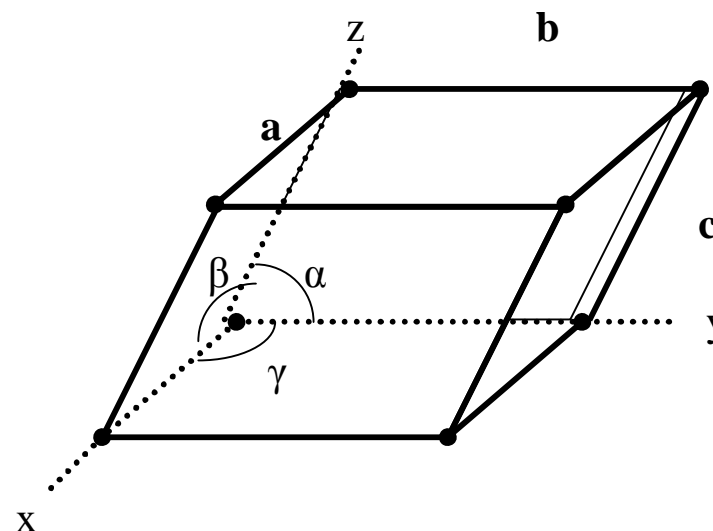
**Gaýtalama:**

Halkyň guran Baky beýik binasy,  
Berkarar döwletim, jigerim-janym.  
Başlaryň täji sen, diller senasy,  
Dünýä dursun, sen dur, Türkmenistanym!

Gardaşdyr tireler, amandyr iller,  
Owal-ahyr birdir biziň ganymyz.  
Harasatlar almaz, syndyrmaz siller,  
Nesiller döş gerip gorar şanymyz.

**Gaýtalama:**

Halkyň guran Baky beýik binasy,  
Berkarar döwletim, jigerim-janym.  
Başlaryň täji sen, diller senasy,  
Dünýä dursun, sen dur, Türkmenistanym!



1 - nji çyzgy

1848-nji ýylda fransiýaly kristallograf O. Brawe elementar öýjügiň gapyrgalarynyň ululygynyň gatnaşygyna we özara gönükdirilmegine görä kristallik gözenek 14 sany görnüşli bolup biler diýip görkezýär (Braweniň 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. Fýodorow 32 klassyn içinde 230 dürli giňişlik toparlary bolup biler diýip görkezipdir.

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

Polikristallardaky kristallitleriň ululygy  $0,1 \div 1000$  mkm aralykda bolýar

Eger-de kristallyň içindäki islendik nokat üçin onuň häsiýetine görä meňzeş we kesgitli aralykda başga bir nokat tapylsa, onda kristall birhilli diýip atlandyrylýar.

Meňzeş nokatlar (düzünler) üç ölçegli periodik gözenek emele getirýärler. Olara giňişlikdäki **kristallik gözenek** diýilýär.

Gözenegi giňişlikde periodikly gaýtalanýan elementar parallelepipediniň kömegi bilen beýän edip bolýar (elementar öýjük) ýa-da erkin saýlanan  $a, b, c$  birlik transläsiýalar bilen (1 - nji çyzygy).

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

$$\vec{R} = m\vec{a} + n\vec{b} + p\vec{c} \quad (1,1)$$

Bu ýerde  $m, n, p$  – berlen düzüniň indeksleri.

Umumy ýagdaýda elementar öýjigi gapyrgalary  $a, b, c$  we burçlary  $\alpha, \beta, \gamma$  bolan gyşyk burçly parallelepiped görnüşinde görkezilýär. Görkezilen 6 ululyklar gözenegiň **parametrleri** diýip atlandyrylýar,  $a, b, c$  ululyklar bolsa köplenç gözenegiň **hemişelikleri** diýip atlandyrylýar. In gysga transläsiýalarda gurulan elementar parallelepiped **ýönekeý elementar öýjügi** diýilýär.

# TÜRKMENISTANYŇ BILIM MINISTRIGI MAGTYMGULY ADYNDAKY TÜRKMEN DÖWLET UNIWERSITETI

T. M. ÝUSUPOW  
G. ORAZOW

## K o n d e n s i r l e n e n   h a l y   ñ f i z i k a s y

Ýokary okuw mekdepleriniň  
talyplary üçin okuw gollanmasy

Türkmenistanyň Bilim ministrligi  
tarapyndan hödürlenildi

Aşgabat  
2010

## I BAP

### KONDENSIRLENEN HALLARYŇ GURLUŞY

#### §1. Kristallik gözenek barada düşünje. Kristallik simmetriýasy.

Islendik suwuk madda sowadylanda öz akyjylygyny ýitirýär we gaty hala geçýär. Şol bir madda hem kristalliki hem - de amorf formada (görnüşde) gatap biler. Meselem, eger eredilen kükürt haýal sowadylsa, onda ol kristalliki formada gataýar. Eger - de kükürdi  $350^{\circ}\text{C}$  temperature çenli gyzdyryp, sowuk suwda sowatsak, onda ol amorf süýgeşikli formada gataýar. Amorf jisimler gurluşlaryna görä suwuklyklara golaýdyrlar: olara ýokary şepbeşiklige eýe bolan aşasowadylan suwuklyklar ýaly seretmek mümkindir.

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

Gaty jisimleriň gurluşy köplenç kristallikdyr.

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

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

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, ýarymgeçiriji, aşageçiriji we ş.m.) ýerine ýetirip, özbaşdak rol oýnaýarlar.

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

Kristallar roentgen 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 we suwuklyklaryň öwrenilişi täze materiallary döretmekde uly ähmiýeti bar. Muňa ýokary temperaturalara çydamly, ýa - da tersine ýeňil eremeyän erginler, aş 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.

## S Ö Z B A Ş Y

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 ylmlarynyň we tilsimatlarynyň gazananlaryny ykdysadyýetiň dürli pudaklaryna ornaşdyrmagy başaryan hünärmenleri taýarlamak üçin ýokary okuw mekdepleriniň talyplaryny döwrebap okuw kitaplary we okuw - usuly gollanmalar bilen üpjün etmek esasy meseleleriň biri bolup durýar.

Kondensirlenen halyň fizikasy umumy nazary dersi hökmünde Magtymguly adyndaky Türkmen döwlet uniwersitetiniň fiziki fakultetinde fizika hünäri boýunça okaýan talyplara diňe soňky döwürde geçilip başlady.

Bu şu dersiň häzirki ylmyň we tehnikanyň ösmeginde uly ähmiýete eýe bolandygyny görkezýär.

Elektrodinamikada, elektronikada we täze konstruksion materiallaryň ýaýlasynnda gazanan ägirt uly progress kondensirlenen halyň fizikasy bilen baglylykdadyr.

Häzirki wagta çenli türkmen dilinde umumy fizikasy dersi boýunça taýarlanan okuw gollanmalarda gaty we suwuk hallardaky maddalaryň häsiýetleri bilen bagly bolan soraglar ýeterlik möçberde ýazyp beýan



edilmändir. Şonuñ üçin bu gollanmada kondensirlenen hallaryñ fizikasy boýunça ylmy edebiýatlarda ýygnalan materiallary tertibe almak we olary ýokary okuw mekdebiñ talyplaryna aýdyñ we düşnükli görnüşde beýan etmeklik maksat edilýär.

Okuw gollanmada kondensirlenen halyñ fizikasy bilen bagly bolan soraglaryñ hemmesini ýazyp beýan etmek goýulmandyr. Gollanmanyñ esasy maksady geljekki hünärmenleri gaty jisimleriñ we suwuklyklaryñ esasy häsiýetleri we olaryñ dürli şertlerde bolup geçýän prosessleriñ mehanizmleri bilen tanyşdyrmakdan durýar.

## G I R I Ş

Kondensirlenen halyñ fizikasy häzirki wagtda örän giň praktiki ulanylyşa eýe bolan ylmyñ iň wajyp bölümleriniñ biridir. Ol materialöwrenişin, ýarymgeçirijileriñ, pýezoelektrikleriñ, segnetoelektrikleriñ, magnit materiallaryñ, şol sanda spin aýnalaryñ, emeli gymmat daşlaryñ (almazlaryñ, rubinleriñ we ş.m.), suwuk kristallaryñ, metalliki aýnalaryñ, optiki kristallaryñ we başga-da özboluşly fiziki häsiýetlere eýe bolan materiallaryñ öndürilişiniñ esasynda ýatyr.

Kondensirlenen halyñ fizikasynyñ wezipesi gaty we suwuk jisimleriñ düzümini, olaryñ atom - electron gurluşyny öwrenmekden durýar, şeýle hem jisimleriñ gurluşynyñ we düzüminiñ dürli fiziki häsiýetleriniñ, birinji nobatda kristallik materiallaryñ arasyndaky baglanyşygyny açmakdan ybaratdyr.

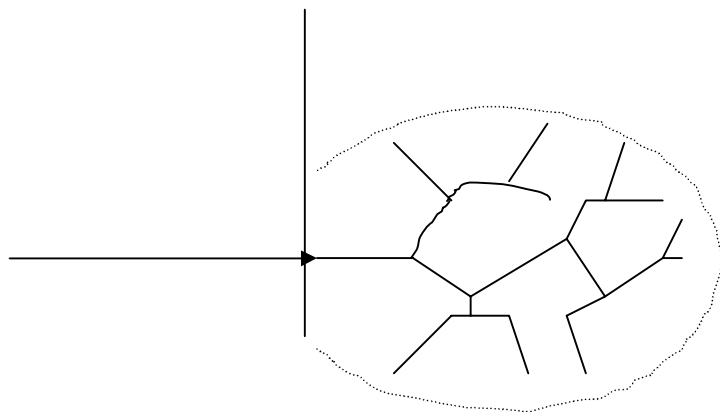
Kondensirlenen halyñ fizikasynyñ meselelerine ýene - de kristallaryñ emele gelmeginiñ we ösüşiniñ (kristallaşma) soraglary öwrenmegi hem girýär.

Bu gollanmada kondensirlenen halyñ fizikasyna girýän soraglardan kristallik gözenekleriñ görnüşleri boýunça kristallaryñ klassifikasiýasy, gaty jisimleriñ elektrik, ýylylyk we mehaniki häsiýetleri, gaty jisimleriñ zolak nazaryýetiniñ elementleri, gaty jisimleriñ magnit häsiýetleri, kondensirlenen hallaryñ alnyşy we gaty jisimlerdäki faza öwrülmeleri ýaly soraglar ýazyp beýan edilen.

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

Suwuklyklardan tapawutlylykda gaty jisimler görnüşiniñ maýyşgaklygyna eýedirler.





**15 - nji çyzgy.**

Mundan başga-da aşakdaky şertler ýerine ýetirilýär:

- 1) kristallyň göwrümi temperatura bagly däl.
- 2) defektler biri-birine bagly däl.
- 3) gözenekdäki atomlaryň yrgyldylarynyň ýygylgy boşluklaryň (wakansiýalaryň) we düwün arasyndaky atomlaryň bolandygyna bagly däl.

Goý  $E_F$  -Frenkele görä defektleriniň (jübütleriniň) emele gelmeginiň 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:

$$S = K_B \ln W \quad (3.1)$$

Bu ýerde  $K_B$  – Bolsmanyn hemişeligi.

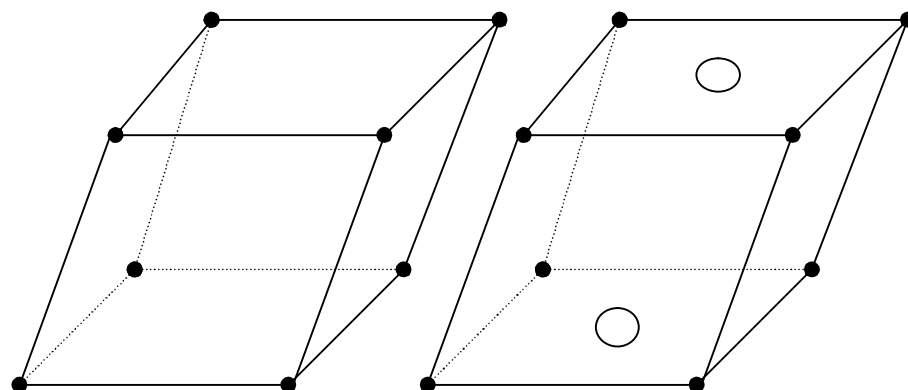
$W$  – termodinamika ähtimallygy (berlen sistema ýagdaýynyň amala aşyrylmagynyň ukyplarynyň usullar sany).

$d_{hkl}$  uzaklyga deň bolmaly.

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

$$a \neq b \neq c$$

Monoklin sistemanyň elementar öýjügi ýapgyt parallelepipeddir. Onuň iki jübüt granlary göniburçlukdyr, bir jübüti bolsa –parallelogram (7 - nji çyzgy).



ýonekeý

merkezleşen bazisly

**7 - nji çyzgy.** Monoklin sistemasy we onuň gözenekleri

$$\gamma = \beta = 90^\circ$$

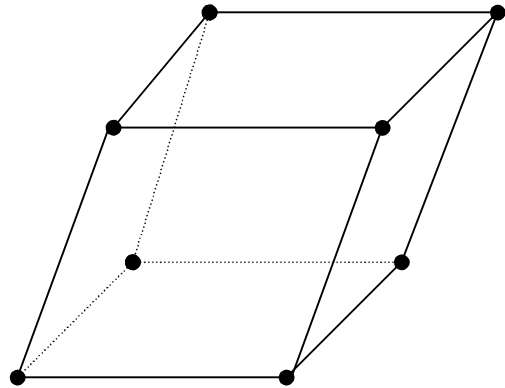
$$\alpha \neq 90^\circ$$

$$a \neq b \neq c$$

Triklin sistemanyň giňişlik gözenegi parallelepiped görnüşli elementar öýjükdendir bolup durýar. Onuň hemme gapyrgalary dürlidir, burçlary bolsa öz aralarynda deň däl (8 - nji çyzgy)

Tebigatda köplenç köp-granlyklar görnüşde dogry daşky formaly kristallar duşuşýarlar. Olaryň granlary we gapyrgalary periodikly gaýtalanýar. Bu ýagdaýda kristall

**simmetriýa** eýedir diýilýär. Geometrik figuralara göre simmetriýa olaryň öz-özünde deň we birmeňzeş ýerleşen bölekleriň



**8 - nji çyzgy.** Triklin sistemasy

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

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 **simmetriýanyň 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, üçünji, dördünji we altynjy.

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.

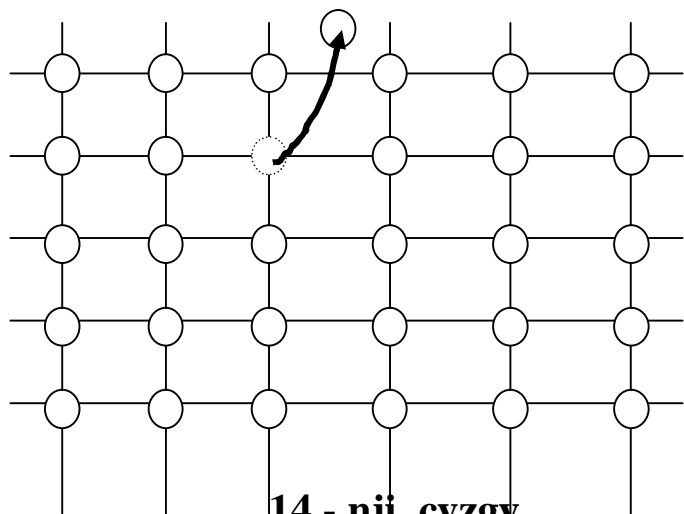
Onda bir wagtda wakansiýa we düwün arasyndaky atom ýüze çykýar. Kristallyň göwrümünde süýşen atomlaryň kaskady emele gelýär (15 - nji çyzgy).

Umumy ýagdaýda kristallda hem Frenkel göre defektler, hem-de Şottka göre defektler bardyr.

Goý kristallda ýeke-täk defekt – Frenkele göre defekt bar diýip çaklalyň.

taýdan düwünler arasyndaky atomlaryň emele gelmegi mümkin däl.

Şottka görä defektler dörände, käbir üst golaýynda ýerleşen atomlar kristallyň üstüne çykyp bilýärler (14 - nji çyzgy). Emele gelen boşluklar kristallyň göwrümine göçýärler. Şottkä görä defektler kristallyň dykzlygyny azaldýar, sebäbi onuň göwrümini ( $m = \text{const}$ ) ulaldýar.



Frenkel görä defektler emele gelende kristallyň dykzlygy üýtgänok, sebäbi kristallyň göwrümi üýtgemeyär.

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 prosessler emele gelýär.

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

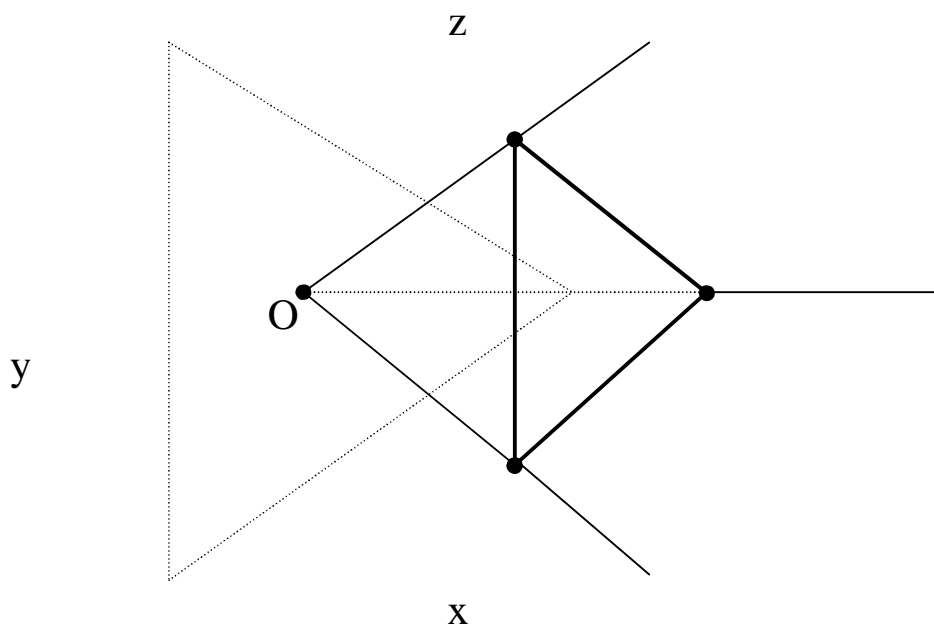
Obýektiň simmetriýasyny häsiýetlendiren simmetriýa elementleriň doly jemine **simmetriýa klassy** diýilýär.

## §2. Düwün tekizlikleriň we göni çyzyklaryň kristallografiki simwollary. Ters gözenek.

Kristallografiýada göni çyzyklary we tekizlikleri giňişlik gözenekleriň düwünlerinden geçirýärler. Olar düwün çyzyklary we düwün tekizlikleri diýip atlandyrylar.

Dekart koordinat sistemasy hökmünde ýonekeý öýjügiň gapyrgalaryny saýlalyň. Giňişlik gözenekde düwünlerden geçýän tekizlik geçireliň (9 - nji çyzgy). Saýlanan koordinat sistemada munuň ýaly tekizlik birinji derejeli deňleme bilen aňladylýar:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (2.1)$$



### 9 - nji çyzgy.

Koordinat sistemanyň başlangyç nokadyndan (O nokady) geçýän tekizligiň deňlemesi:

$$Ax + By + Cz = 0 \quad (2.2)$$

Şu tekizlikde iki sany düwün alsak, onda olaryň koordinatalary

$$x_1 = m_1 a; \quad y_1 = n_1 b; \quad z_1 = p_1 c$$

$$x_2 = m_2 a; \quad y_2 = n_2 b; \quad z_2 = p_2 c$$

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:

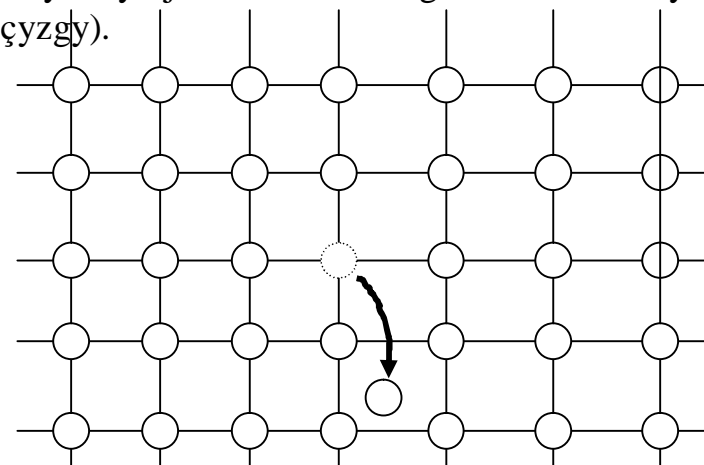
$$Aam_1 + Bbn_1 + Ccp_1 = 0$$

$$Aam_2 + Bbn_2 + Ccp_2 = 0$$

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

Kristallyň üst gatlagynda ýerleşen atomlar kristally gyzdyranymyzda 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 düwünleriň arasynda ýerleşýär.

Gözenegiň galan boş düwüni **wakansiýa** diýip atlanýar. Düwünleriň arasyndaky atomlara we wakansiýalaryň jemine Frenkele göre defektler diýilýar (13 - nji çyzgy).



### 13 - nji çyzgy.

Şottka göre defektler atomlaryň ykjamlygy ýokary bolan krisrallarda bolup bilýär. Şol kristallarda energetiki

### §3. Gaty jisimlerdeki defektler. Defektlerniň klassifikasiýasy. Nokatlanç defektler (Frenkele görä defektler) Şottka görä defektler. Radiasion defektler.

Kristallyň periodik gurluşynyň üýtgemesine defekt diýilýar. Gurluş defektlerniň gaty jisimleriniň häsiýetlerine bolan täsiri örän güýçlidir.

Defektler 4 sany klasa bölünýärler:

#### a) Nokatlanç defektler.

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

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

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

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 däl.

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

#### d) Göwrüm (üç ölçegli) defektler.

Bu defektlere – mikroboşluklar we başga fazanyň garyndylary degişlidirler.

Çyzykly deňlemeleriň teoriýasyna laýyklykda:

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

(2.3)

Eger (2.2) deňlemäniň A, B we C koeffisiýentleriniň ýerine (2.3) deňlemeden tapylan olaryň bahalaryny ýerine göýsäk, onda koordinat sistemanyň başlangyç nokadyndan geçýän tekizligiň deňlemesi:

$$hx + ky + lz = 0 \quad (2.4)$$

Bu ýerden  $x = X/a$ ;  $y = Y/b$ ;  $z = Z/c$ , başgaça aýdylanda, her okuň boýundaky birlikler dürlüdür we transläsiyalara – elementar öýjügiň gapyrgalaryna deňdir.

Başlangyç nokatdan geçýän tekizlige parallel islendik tekizligiň deňlemesi:

$$hx + ky + lz = t \quad (2.5)$$

Bu ýerde t – bitin san.

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

$t = 1$  ýagdaý üçin (2.5) deňleme aşakdaky deňleme bilen beýan edilýär:

$$\frac{x}{(a/h)} + \frac{y}{(b/k)} + \frac{z}{(c/\ell)} = 1 \quad (2.6)$$

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

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

Göni çyzyklaryň indeksalary kwadrat skobka alynýar: [hkl].

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

Dördünji kömekçi okyny ç okyna perpendikulýar tekizliginde girizýärler (10 - ný çyzgy).

AB göniçyzyk (hkl) tekizliginiň yzy.

OD = P - a<sub>3</sub> okyndan (hkl) tekizligiň kesýän kesigi.

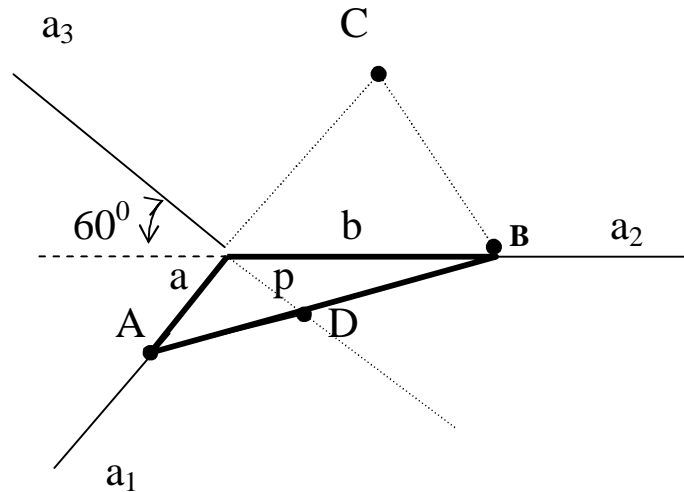
$$OC = BC = b$$

ABC we ADO üçburçlyklaryň meňzeşliklerinden gelip çykýan aňlatmalar:

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

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

$$h + k + i = 0 \quad (2.7)$$



10 - ný çyzgy.

(2.13) 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:

$$\bar{a} = [\bar{b} * \bar{c}^*] / V^*; \quad \bar{b} = [\bar{c} * \bar{a}^*] / V^*; \quad \bar{c} = [\bar{a} * \bar{b}^*] / V^* \quad (2.14)$$

Bu ýerde  $V^*$  - ters gözenegiň elementar öýjiginiň göwrümi.

(2.12) aňlatmany skalärly  $\bar{a}$  wektora köpelden soň, we (2.13), (2.140 aňlatmalary göz önüne tutyp, alarys:

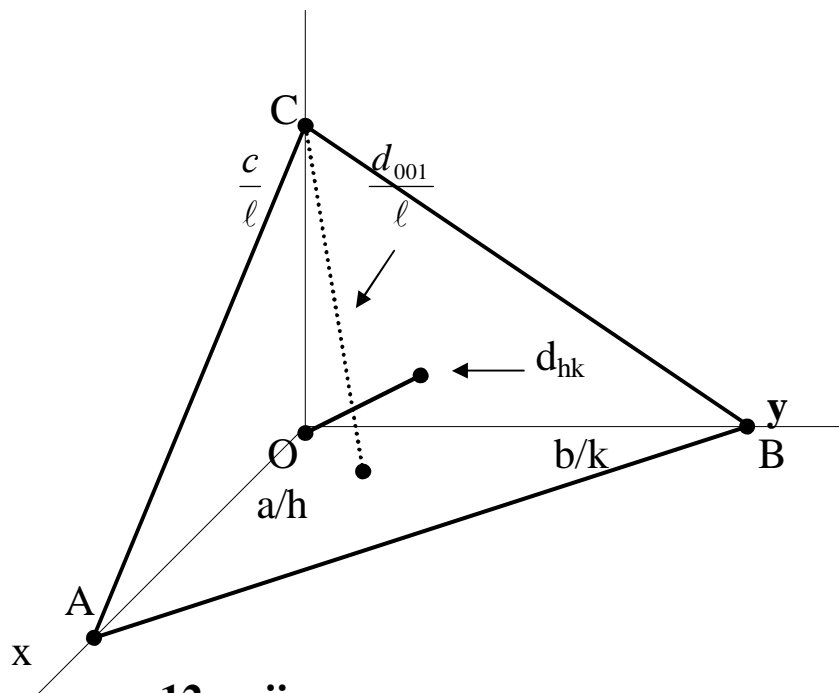
$$(\bar{a} \bar{a}^*) = \frac{[\bar{b} * \bar{c}^*]}{V^*} \cdot \frac{[\bar{b} \bar{c}]}{V_{oyj}} = 1$$

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

$$V^* = \frac{1}{V_{oyj}} \quad (2.15)$$

Şeýlelik bilen, göni we ters gözenekler özara birbirine baglydyrlar. Ýönekeý kub öýjiginiň ters gözenegi  $\frac{1}{a}$  taraply kub elementar öýjik bilen beýan edip bolýar.

Bu ýerde a – göni öýjiginiň parametri.



12 - nji çyzgy.

(2.10) we (2.11) aňlatmalary deňeşdiren soň, getirip çykarýas:  $a^* = \frac{1}{d_{100}} = \frac{[\bar{b}\bar{c}]}{V_{oyj}}$ ;

$$b^* = \frac{1}{d_{010}} = \frac{[\bar{c}\bar{a}]}{V_{oyj}}; \quad c^* = \frac{[\bar{a}\bar{b}]}{V_{oyj}} \quad (2.12)$$

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

ýazmak bolar:

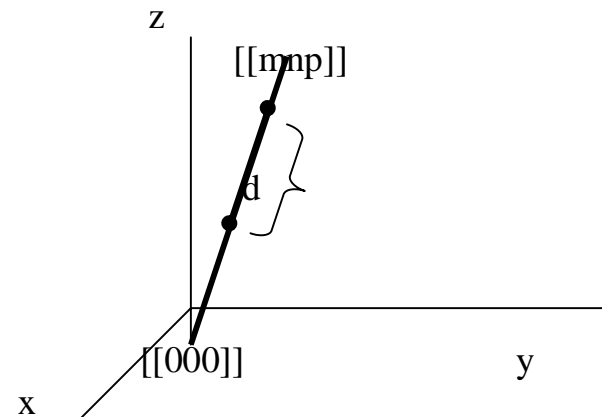
$$(\bar{a}\bar{a}^*) = (\bar{b}\bar{b}^*) = (\bar{c}\bar{c}^*) = 1$$

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

(2.13)

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

Indi giňişlik gözeneginde kristallografik koordinat sistemasyny guralyň we koordinatalaryň başlangyç nokadyndan düwün göniçyzyk geçireliň (11 - nji çyzgy).



11 - nji çyzgy.

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

$[[mnp]]$  düwün  $[[000]]$  dUwUn bilen bilelikde koordinatanyň baslangyç nokadyndan geçýan göniçyzygyň ugryny kesgitleýär. Düwüniň simwoly 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 häsiýetlendirýär, sebäbi kristallarda şonyň ýaly ugurlar meňzeşdirler. Bir näçe düwün göniçyzyklaryň jemleriniň



meñzeşligini görkezmek üçin  $\langle mnp \rangle$  simwol görnüşinde bellik girizýärler. Meselem, kub kristallarda koordinata ugurlaryň indeksleri [100], [010],  $[\bar{1}00]$ , [001],  $[0\bar{1}0]$ ,  $[00\bar{1}]$  simmetriýa laýyklykda meñzeşdirler, şonuň üçin olaryň hemmesini  $\langle 100 \rangle$  simwol bilen belligileýärler.

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

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 (12 - nji çyzgy). (hkl) tekizlik üç sany koordinata tekizlikler ((100), (010), (001)) bilen bilelikde AOBC tetraedr emele getirýär. Eger tetraedriň granlarynyň meýdanlaryny  $\vec{S}$  wektor bilen bellesek, onda wektor hasaplamasyna görä:

$$\vec{S}_{\Delta(hkl)} = \vec{S}_{\Delta(100)} + \vec{S}_{\Delta(010)} + \vec{S}_{\Delta(001)} \quad (2.8)$$

Tetraedriň göwrüminiň formulasyna laýyklykda:

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

$$\text{Bu ýerden} \quad S = 3V/H \quad (2.9)$$

(H – tetraedriň beýikligi)

O nokatdan (hkl) tekizligine perpendikulär geçirsek, onda ol tekizlikleriň arasyndaky

“B” depeden (010) koordinata tekizligine geçirilen beýiklik –  $d_{010}/k$ , “C” depeden (001) koordinata tekizligine geçirilen beýiklik –  $d_{001}/l$ . Onda (2.8) we (2.9) aňlatmalardan gelip çykýar:

$$H = \frac{1}{d_{hkl}} = h \frac{1}{d_{100}} + k \frac{1}{d_{010}} + l \frac{1}{d_{001}} = ha^* + kb^* + lc^* \quad (2.10)$$

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

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

$$\frac{3V}{d_{hkl}} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\vec{b} \cdot \vec{c}}{k} \right] + \frac{1}{2} \left[ \frac{\vec{c} \cdot \vec{a}}{h} \right] + \frac{1}{2} \left[ \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{l} \right] \quad \text{ýa-da}$$

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

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

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

$$\frac{1}{d_{hkl}} = h \frac{[\vec{b} \cdot \vec{c}]}{V_{\text{öýj.}}} + k \frac{[\vec{c} \cdot \vec{a}]}{V_{\text{öýj.}}} + l \frac{[\vec{a} \cdot \vec{b}]}{V_{\text{öýj.}}} \quad (2.11)$$

$$u = -u_2 \quad (5.5)$$

Şeýlelekedde kristallardaky baglanyşyk energiýa “r” atom aralygyndaky uzaklyga baglydyr we iki esasy agzalara baglydyr: 1) atomlaryň arasyndaky dartýş 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:

$$U = -\frac{a}{r^m} + \frac{b}{r^n} \quad (5.6)$$

Bu ýerde r – atomlaryň merkezleriniň arasyndaky uzaklyk.

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

$$(5.6) \text{ formulada } U_{\text{dart.}} = -\frac{a}{r^m} \text{ dartýş}$$

potensialyny aňladýar

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

potensialyny aňladýar.

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

$$U_i = \sum_{i+j} U(r_{ij}) \quad (5.7)$$

$$W = \frac{N!}{(N-n)!n!} \quad (3.2)$$

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

$$W^1 = \frac{N^1!}{(N^1-n)!n!} \quad (3.3)$$

Onda

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

(3,4)

Stirlingiň formulasyna esaslanyp, ýazyp bolýar:

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

Onda (3.4) aňlatmadan alýas:

$$S = K_B [NN - (N-n)\ell_n(N-n) - n\ell_n n] + K_B [N^1\ell_n N^1 - (N^1-n)\ell_n(N^1-n) - n\ell_n n] \quad (3,5)$$

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

$$E = nE_F \quad (3.6)$$

Erkin energiýanyň aňlatmasy:

$$F = nE_F - K_B T \left\{ \begin{aligned} &[N\ell_n N - (N-n)\ell_n(N-n) - n\ell_n n] + \\ &+ [N^1\ell_n N^1 - (N^1-n)\ell_n(N^1-n) - n\ell_n n] \end{aligned} \right\} \quad (3,7)$$

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

$$\left(\frac{\partial F}{\partial n}\right)_T = 0 \quad (3,8)$$

Layykly özgerlmelerden soň alarys:

$$E_F = K_B T \ell_n \frac{(N-n)(N^1-n)}{n^2} \quad (3,9)$$

ýa-da

$$\frac{n^2}{(N-n)(N^1-n)} = \exp\left(-\frac{E_F}{K_B T}\right) \quad (3,10)$$

Bu ýerden Frenkel jübütleriniň sanyny tapýas:

$$n = \sqrt{(N-n)(N^1-n)} \exp\left[-\frac{E_F}{2K_B T}\right] \quad (3,11)$$

Eger  $n \ll N$  we  $n \ll N^1$  bolsa, onda

$$n = \sqrt{NN^1} \exp\left[-\frac{E_F}{2K_B T}\right] \quad (3,12)$$

(3.12) gelip çykýan netije: Frenkel jübütleriniň konsentrasiýasy  $T = 0^\circ\text{K}$  deň bolanda nola deň bolýar we temperaturanyň artmagy bilen artýar.

Meňzeslikde Şottki görä defektleriň konsentrasiýasy

$$n = N \left(\frac{\mathfrak{g}}{\mathfrak{g}^1}\right) \exp\left(-\frac{E_F}{K_B T}\right) \quad (3,13)$$

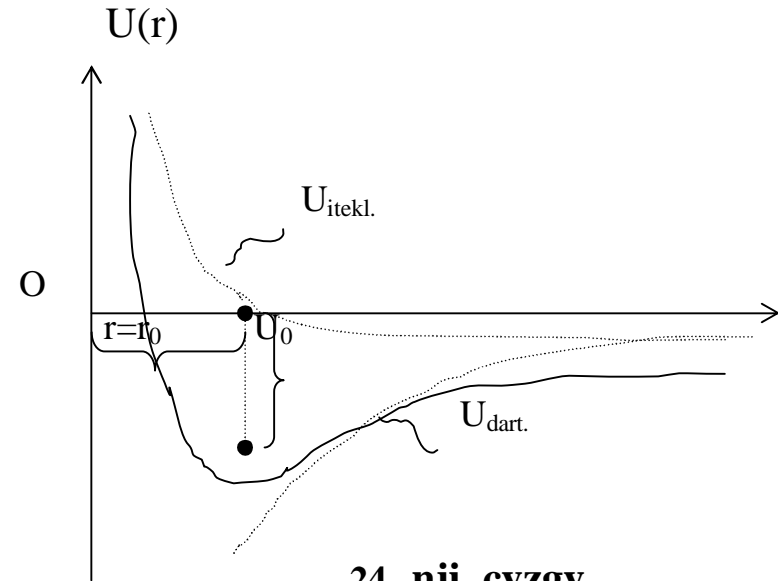
Bu ýerde:  $\mathfrak{g}$  -  $3nz$  ossilätorlaryň ýygylgy.

$\mathfrak{g}^1$  -  $3N - 3nz$  ossilätorlaryň ýygylgy.

Frenkel görä defektleriň konsentrasiýasyny (3.13) aňlatma meňzeş formula bilen beýan edip bolýar:

$$n = \sqrt{NN^1} \left(\frac{\mathfrak{g}}{\mathfrak{g}^1}\right)^{3z} \exp\left(-\frac{E_F}{2K_B T}\right) \quad (3,14)$$

24 - nji çyzgyda shema görnüşünde şol potentsiallaryň we olaryň jemleýji energiýalarynyň egrileri görkezilipdir.



**24 - nji çyzgy**

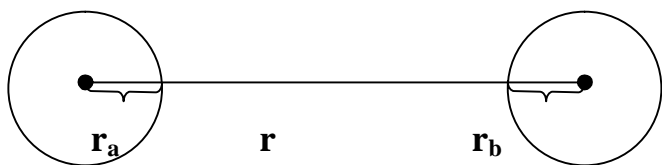
$r = r_0$  deň bolan ýagdaýda sistemanyň energiýasy minimal bolup durýar. Bu ýagdaýda dartýş we itekleme güýçler biri-birine deň bolýarlar.

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

Minimumyň çuňlugy molekulardaky atomlaryň baglanyşyk energiýasyna deňdir. Baglanyşyk ýa-da seplesiklik energiýa sistemanyň başlangyç we gutarnykly ýagdaýlaryndaky energiýalarynyň tapawudyna deňdir:

$$u = u_1 - u_2 \quad (5,4)$$

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



### 23 - nji çyzgy

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

Atomlaryň aralygy olaryň radiuslaryndan ep-esli uly bolsa, onda olar biri-biri bilen özara täsirleşmeýärler. Eger-de atomlaryň aralygy azalýan mahalda ulgamyň energiýasy izolirlenen atomlaryň jemleýji energiýasyna görä peselýän bolsa, onda atomlaryň arasynda dartýş güýji emele gelýär. Oňa sistemanyň potensial energiýasynyň  $U(r)$  azalmagy laýyklydyr.  $r = r_0$  deň bolanda  $U(r)$  energiýa minimal baha ýetýär, bu bolsa  $F$  güýjine laýyklydyr:

$$F = -\left(\frac{dU}{dr}\right)_{r=r_0} = 0 \quad (5.2)$$

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 dartýş we itekleme güýçleriň energiýalarynyň jemine deňdir:

$$U(r) = U_{\text{dart.}}(r) + U_{\text{itekl.}}(r) \quad (5.3)$$

Mott tarapyndan kesgitlenen  $\left(\frac{9}{9^1}\right)$

koeffisiýentiň bahasy NaCl üçin takmynan 64 deňdir.

### §4. Dislokasiýalar. Bürgersiň wektory.

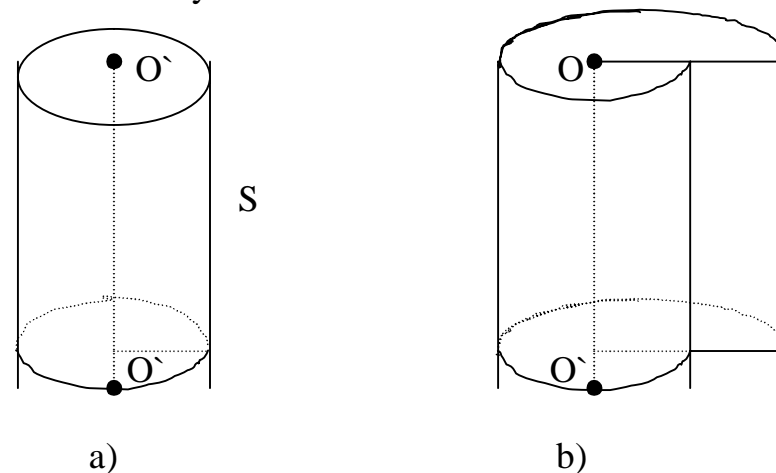
#### Kristallarda

dislokasiýa emele gelmek üçin zerur bolan naprýaženiýeler.

#### a) Dislokasiýalar.

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

Mysal hökmünde rezin silindra seredeliň. Bu silindri  $S$  tekizlik boýunça keseliň, (16 - nji çyzgy) ondan soň kesilen ýeriň gyrasyny 1b suratda görkezilen ýaly süýştireliň we kleýläliň.



### 16 - nji çyzgy.

Süýşme oblastyny süýşmedik oblastyndan bölýän  $OO'$  çyzyga **gislokasiýa** diýilýär.

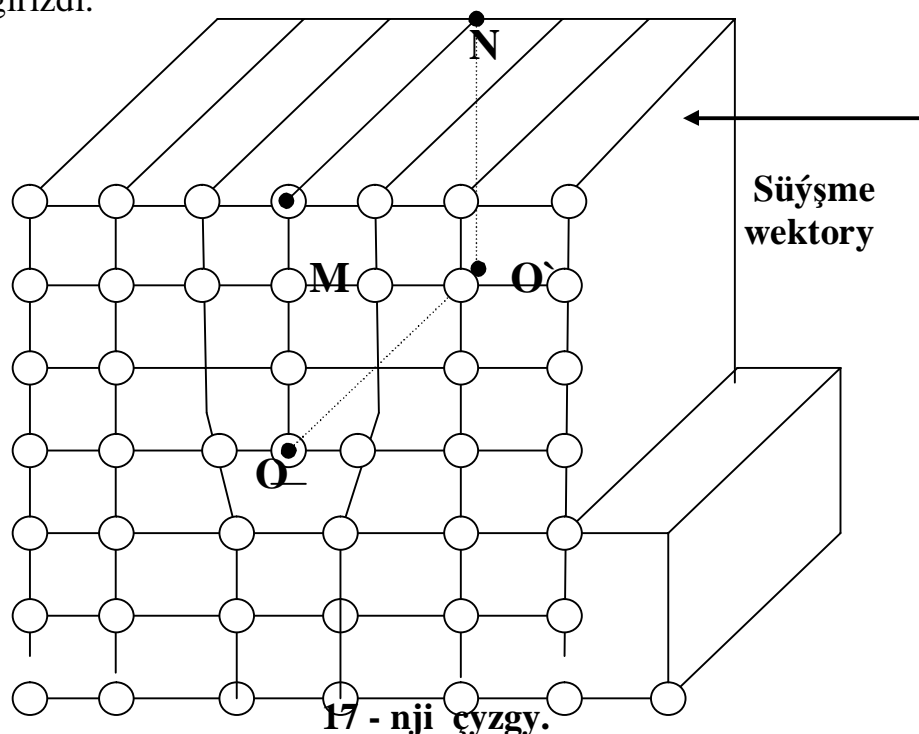
30-nji ýyllarda D. Teýlor we başgalary meňzeş defektler kristallardada bolup biler diýip çaklapdyrlar.

17 - nji çyzygyda kristallyň böleginiň bir atom aralygyna süýşmegi esasynda döran  $OO'$  dislokasiýa görkezilipdir.

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

$MNO'$  ýarym tekizligiň çyzygyny düşündirýän dislokasiýa “gyra” dislokasiýasy atlandyrylýar.

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



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

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

Ionizasion potensialy we garyndaşsyrama energiýa düşünjeler bilen başga bir düşünje – **ion walentligi** ysnyşykly baglydyr. Ion walentligi atomyň özüne çekýän ýa-da ýitirýän elektronlaryň sanyny kesgitläýär. 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.

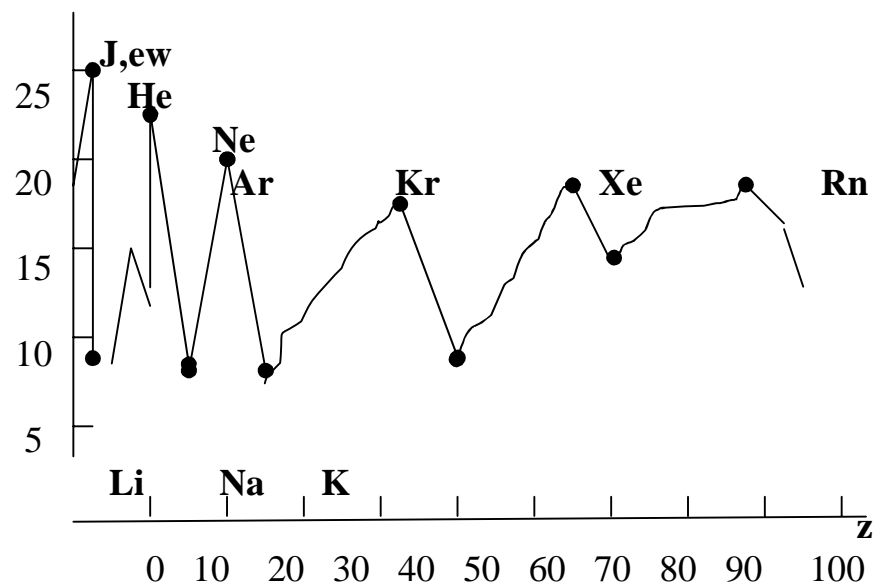
Mendileýewiň periodik sistemasynyň üçünji toparynyň elementleriniň atomlary 3 elektron ýitirip + 3 walentli ion emele getirýärler.

Bir sortly atomlaryň başga sortly atomlaryň özara täsirleşmede 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:

$$X = \frac{1}{2}(J + \mathfrak{E}) \quad (5.1)$$

### b) Baglanyşyk energiýasy.

Geliň indi biri- birinden r aralygynda ýerleşen radiuslary  $r_a$  we  $r_b$  bolan A we B iki atoma garalyň (23 - nji çyzygy).

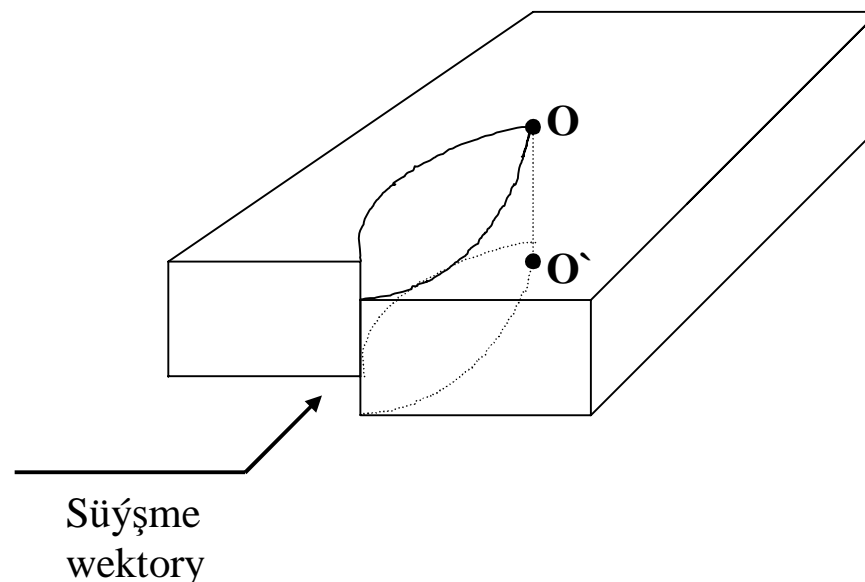


### 22 - nji çyzgy

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

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

Kristallda 18 - nji çyzgyda görkezzenimiz ýaly süýşme amala aşyryldy diýeli.

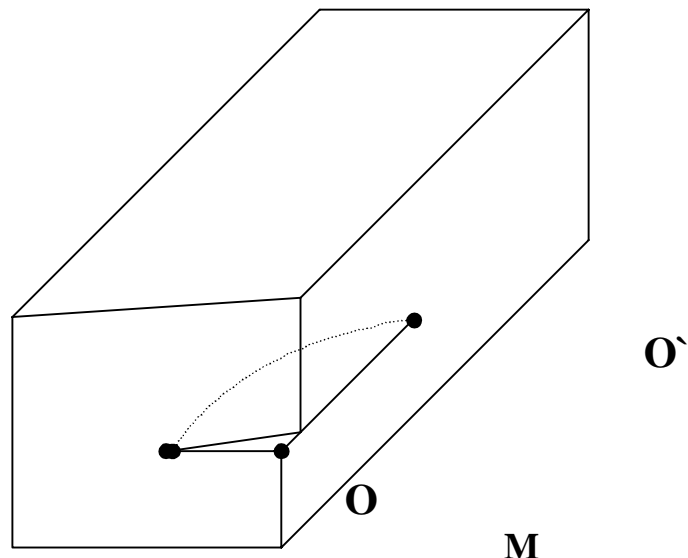


### 18 - nji çyzgy.

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

Şu ýagdaýda atom tekizligi OO' dislokasiýa töwreginde tovlanan ýaly bolandygy üçin, şoňa nurbat (wint) dislokasiýasy diýilýär.

Indi dislokasiýanyň ýene-de bir görnüşine seredeliň. 19 - nji çyzgyda görkezilen OO' çyzygy gyşykçyzykly dislokasiýanyň barlygyny görkezýär.



19 - nji çyzgy

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

Şu dislokasiýa **garyşyk** dislokasiýa diýilýär.

Dislokasiýa  $\perp$  simwol bilen bellenýär.

### b) Bürgersiň wektory.

Dislokasiýanyň möhüm häsiýetnamasynyň biri süýşme wektorydyr. Bu 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 (20 a

gatlaklaryň elektronlarynyň baglanyşyk energiýalary kiçi bolanlygy sebäbli atomlaryň arasyndaky baglanyşykda şol gatlaklaryň 1 – 2 elektronlary goşmaça gatnaşyp bilýär. Walent elektronlaryň sany köp bolan käbir elementlerde olaryň atom bilen ýokary baglanyşyk energiýalary bolanlygy 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.

22 - nji çyzgyda 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.

Şu metallaryň atomlarynda ýeke walent elektron bardyr. Bu 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. ( $Zi^+$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Rb^+$ ,  $Cs^+$ )



## II BAP

### GATY JISIMLERDÄKI HIMIKI BAGLANYŞYGYŇ GÖRNÜŞLERI

#### §5. Gaty jisimleriň klassifikasiýasy. Baglanyşyk energiýasy.

##### a) Gaty jisimleriň klassifikasiýasy.

Kristallardaky bölejikleri deň agramlyk ýagdaýynda saklaýan güýçler garşy zarädlanan bölejikleriň (elektronlaryň we ýadrolaryň) elektrostatiği dartyş we alamaty bir bolan zarädlanan bölejikleriň (elektronlaryň we elektronlaryň, ýadrolaryň we ýadrolaryň) iteleme güýçleridir. Magnit güýçleri bu ýerde örän kiçi, grawitasion güýçlerini bolsa göz önüne tutmasak hem bolar.

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

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

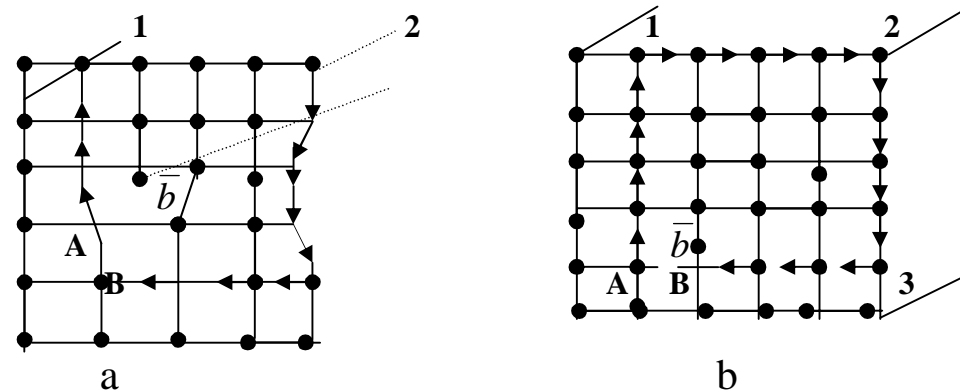
Başda aýdanymyza görä atomlaryň arasyndaky özara täsir güýçler özara täsir edýän atomlaryň elektron gatlaklarynyň gurluşy bilen kesgitlenýär.

Elementleriň köpüsinde atomlaryň arasyndaky baglanyşykda hemme daşky walent elektronlary gatnaşýarlar. Cu, Ag, Au ýaly elementlerde dolan d –

çyzgy), onda laýyklykdaky ideal kristallyndaky konturuň arasy açyk bolýar (20 a çyzgy).

Şu kontury utgaştırmak 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.

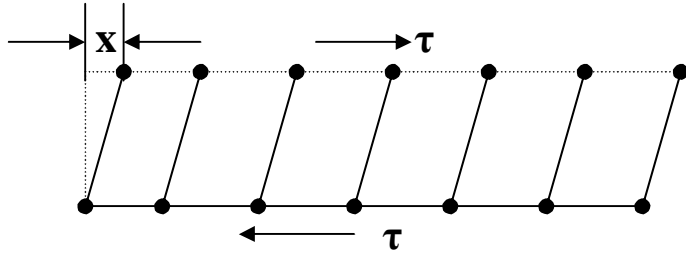


20 - nji çyzgy

##### ç) Kristallarda dislokasiýa emele gelmek üçin zerur bolan napräženiýeler.

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

Göni burçly gözenege garalyň. Goýulan “ $\tau$ ” süýşürme wektoryna laýyk gelýän gozgamany “ $x$ ” haryp bilen belläliň. (21 - nji çyzgy)



## 21 - nji çyzgy

Bir atom tekizlikligini beýleki atom tekizligine görä süýşürsek “ $\tau$ ” napräženiýe emele gelýär. Şol napräženiýe bozulan deňagramlygy dikeltmäne ymtlyýar.

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

Bu ýerde  $n = 0, 1, 2, \dots$

Şonuň ýaly şertleri kanagatlandyran ýonekeý funksiýa

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

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

(4.1) deňlemä girýän “ $k$ ” koeffisiýenti hemişelik koeffisiýentidir. Ol Gukýň kanuny boýunça tapylýar.

Kiçi süýşürmelerde

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

Şonuň üçin

$$\tau = k(2\pi x/b) \quad (4.2)$$

Başga tarapdan kiçi süýşürmeleri üçin Gukýň kanuny ýerine ýetirilýär:

$$\tau = G(x/a) \quad (4.3)$$

Bu ýerde  $G$  – gozgama wektory.

Şeýlelik bilen ýazyp bolar:

$$k(2\pi x/b) = G(x/a) \quad (4.4)$$

Bu ýerden “ $k$ ” koeffisiýentini tapylýar:

$$k = \frac{b}{a} \frac{G}{2\pi} \quad (4.5)$$

Ýene-de (4.1) aňlatma garalyň.

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

Bu ululyk kristallyň gozgamalygynyň nazary berkligidir.

$$\tau_{teor} = \frac{b}{a} \frac{G}{2\pi} \quad (4.6)$$

Kritiki nazary berklik

$$\tau_{teor.} \approx \frac{G}{10} \quad (4.7)$$

Nazary hasaplamalara görä

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

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

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

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.

Onda kristallyň gözeneginiň doly potensial energiýasy deňdir:

$$U = \frac{1}{2} N U_i = \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} U(r_{ij}) \quad (5.8)$$

Bu ýerde N – kristalldaky bölejikleriň sany.

(5.8) formulada  $1/2$  koeffisiýentiň bolandygy bölejikleriň her jübütiniň özara täsir energiýasy jemlenende iki gezek göz önünde tutmaklygyndan gelip çykýar.

## §6. Molekulýar kristallar. Ion kristallar.

### a) Molekulýar 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 (serpleşiklik energiýasynyň ululygy  $0,75 \cdot 10^{-3} \text{ew}$ ). Bu sebäpden geliý tä  $0^\circ K$  çenli suwuklyk halyndadyr. Ony gaty hala geçirmek üçin  $2,5 \cdot 10^6 \text{Pa}$  bolan basyş zerurdyr.

Molekulýar kristallaryň seplesiklik energiýalary örän kiçidir we  $0,02 - 0,15 \text{eV}$  deňdir. Bu sebäpden molekulýar kristallaryň eremek temperaturalary örän pesdir (jedwel 1).

Jedwel 1.

Kristall	Z – tertip nomerleri	Eremek temperaturalary $T, ^\circ\text{K}$
Ne	10	24,5
Ar	18	83,8
Kr	36	115,9
Xe	54	161,2
Rn	86	202,1
N <sub>2</sub>	7	27,1
F <sub>2</sub>	9	55,1
Cl <sub>2</sub>	17	117,2
Br <sub>2</sub>	35	265,8
I <sub>2</sub>	53	386,1

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

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.

Orta hasap bilen izolirlenen atomda zarädyň paýlanmagy sferiki simmetriýa eýedir (25 - nji çyzygy): položitel zaräd ähli elektronlaryň otrisatel zarädlaryna deňdir.

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

$$n = \frac{N}{n} - \text{umumylaşan}$$

elektronlaryň sany.

Bir walentli asgar metallary üçin orta kinetik energiýa

$$U_{kin.} = \frac{3}{5} E_f = \frac{30,1}{(r_s / a_0)^2} \quad (7.16)$$

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

Ferminiň energiýasy.

$U_{itkl.}$  we  $U_{kin.}$  Energiýalaryndan başga kristallyň energiýasynyň formulasynda ýene-de elektron-elektron özara täsirini göz önüne tutmaly:

$$U_{el.} = -\frac{12,5}{(r_s / a_0)} \quad (7.17)$$

Şeýlelikde asgar metallary üçin seplesme energiýasy üç çleniň jemine deňdir:

$$U = U_{dart.} + U_{kin.} + U_{el.} = \frac{30,1}{(r_s / a_0)^2} - \frac{36,8}{(r_s / a_0)} \quad (7.18)$$

Deň agramlyk ýagdaýda (7.18) deňlemenden alarys:  $r_s/a_0 = 1,6$

Eksperiment 2-den 6-çenli san berýär. Şunyň sebäbi metallyň ion modeliniň gödekliligi bilen düşündirilýär.

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

## b) Metallar.

Metallaryň örän gyzykly aýratynlyklary bar. Şu aýratynlyklara ýokary elektrik geçirijilik, metalliki ýalpyldy, ýokary ýylylyk geçirijilik, ýokary süýgeşiklik we başgalar degişlidirler. Metallaryň udel elektrik geçirijiligi otag temperaturada  $10^6 - 10^8 \text{ Om}^{-1}\text{m}^{-1}$  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-y metall dälir.

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

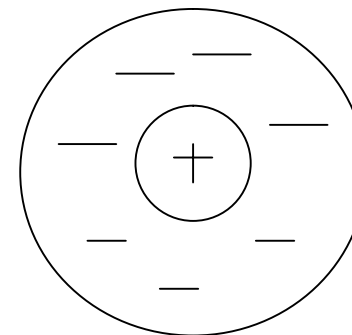
Metallarda atomlaryň daşky walent elektronlary umumylasandyrlar we ionlaryň arasyndaky giňişligi gaz ya-da suwuklanan ionlar otrisatel zarädlanan elektron gaz tarapyndan çekilýär.

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

$$U_{\text{dart.}} = - \frac{24,35}{(r_s / a_0)} \left[ \frac{ew}{\text{atom}} \right] \quad (7.15)$$

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

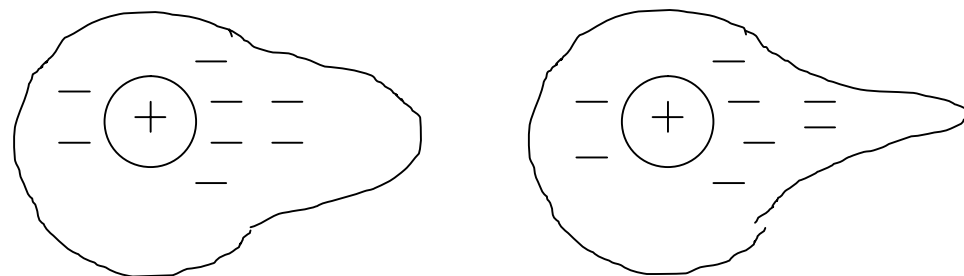
$$r_s = \left( \frac{3}{4\pi n} \right)^{1/3} - \text{sferznyň radiusy.}$$



## 25 - nji çyzgy

Eger munuň ýaly iki atom bir-birinden uzakda ýerleşen bolsa, onda olar özara täsirleşmeýärler. Atomlary golaýlaşdyranymyzda belli bir pursatda atomlaryň biriniň otrisatel zarädy süýşýär, şonuň üçin položitel 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 aýdlanda atomlaryň zarädlary bölünýär. Şeýlelikde, atomlar bir-birine golaýlaşanda olaryň durnukly konfigurasiýasy iki sany elektrik dipollaryna ekwiwalent bolup durýar (26 - nji çyzgy ).



## 26 - nji çyzgy

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

$$\Delta U = -\hbar\omega_0 \frac{\alpha^2}{2r^6} = -\frac{a}{r^6} \quad (6.1)$$

Bu ýerde  $\omega_0$  - ýonekeý garmonik ossilýatoryň hususy ýygylgy.

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

a- hemişelik.

Atomlaryň aralygyny azaldanymyzda olaryň elektron gatklary biri-biriniň üstlerini örtýär we atomlaryň arasynda itekleme güýçleri emele gelýär.

Iteklem gýüçleriň potensialy

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

Şol ýerde  $n=12$

Dartyş güýçleriň potensialy

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

Bu ýerde  $m=6$

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

$$U = -\frac{a}{r_{ij}^6} + \frac{b}{r_{ij}^{12}} \quad (6.2)$$

Eger determinant bolsa, onda (7.9) deňlemeler ulgamyny çözüp bolýar.

$$\Delta = \begin{vmatrix} (E_a - E) & (A - ES) \\ (A - ES) & (E_b - E) \end{vmatrix} = 0 \quad (7.10)$$

Bu ýerden E energiýany kesgitläär ýaly deňlemäni alýas:

$$(E - E_a)(E - E_b) - (A - ES)^2 = 0 \quad (7.11)$$

$$\text{Iki atomly molekula üçin } (E_a = E_b)\lambda = \frac{C_b}{C_a} \text{ bellesek,}$$

(7.9) deňlemeden alarys:

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

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

$$\psi_{\text{sim.}} = \psi_a + \psi_b \quad (7.12)$$

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

$$\psi_{\text{antisim.}} = \psi_a - \psi_b \quad (7.13)$$

(7.12) we (7.13) deňlemeden  $\psi_{\text{sim.}}$  we  $\psi_{\text{antisim.}}$  funksiýalaryna laýykly energiýalary tapyp bolýar:

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

Wodorodyň molekulasyndan kristallara (7.14) geçenimizde bir zady bellemek zerurdyr: kowalent kristallaryn aýratynlygy aşakdakylar daňdyr: kowalent baglanyşyklaryň sany atomyň daşky elektronlarynyň erkin ýagdaýdaky bolan sanyna ýa-da oýanmadyk walent halyndaky sanyna deňdir.

Bu ýerde  $S = \int \phi_a \phi_b d\upsilon$  - atom tolkun

funksiýalarynyň özara  
täsirleşmesinde  
örtülmekligiň derejesini  
häsiýetlendiren integral.

(7.3) molekulär tolkun funksiýasyny (7.2) deňlemä  
goysak, ulgamyň energiýasy üçin alarys:

$$\varepsilon = \frac{C_a^2 E + 2C_a C_b A + C_b^2 E}{C_a^2 + 2C_a C_b S + C_b^2} \quad (7.6)$$

$$E_a = \int \psi_a^* H \psi_a d\vartheta; \quad E_b = \int \psi_b^* H \psi_b d\vartheta \quad (7.7)$$

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

$$A = \int \psi_a^* H \psi_b d\vartheta = \int \psi_b^* H \psi_a d\vartheta - \text{çalyş integrally.}$$

Energiýanyň minimal bahasyny (7.6) deňlemeden E  
ululygyny  $C_a$  we  $C_b$  parametrleri boýunça üýtgedip, tapyp  
bolýar:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial C_a} = 0; \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial C_b} = 0 \quad (7.8)$$

Mundan soň  $C_a$  we  $C_b$  koeffisiýentlere görä çyzykly  
deňlemeleriň ulgamyny ýazyp bolar:

$$\begin{aligned} (E_a - E)C_a + (A - ES)C_b &= 0 \\ (A - ES)C_a + (E_b - E)C_b &= 0 \end{aligned} \quad (7.9)$$

Adatça elektrik neýtral atomlaryň we polýar däl  
molekulalarynyň özara täsirlerini beýan etmek üçin  
Lennard – Djonsiň potensialy ulanylýar.

$$U = 4E \left[ \left( \frac{\sigma}{r_{ij}} \right)^{12} - \left( \frac{\sigma}{r_{ij}} \right)^6 \right] \quad (6.3)$$

Potensial (6.3) iki parametrlere baglydyr:

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

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

$r_0$  bahasyny (6.4) formula goýanymyzdan soň, alarys:

$$U_0 = -N\varepsilon \frac{A_6^2}{2A_{12}} = -8,6N\varepsilon \quad (6.4)$$

$$\text{Bu ýerde } A_6 = \sum_{i \neq j} \left( \frac{1}{\sigma_{ij}^6} \right), \quad A_{12} = \sum_{i \neq j} \left( \frac{1}{\sigma_{ij}^{12}} \right) -$$

kristallik gözenegine bagly bolan gurluş jemleri.

$$r_{ij} = r\sigma_{ij} \quad (r - \text{golaý atomlaryň arasyndaky uzaklyk})$$

### b) Ion kristallary.

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.

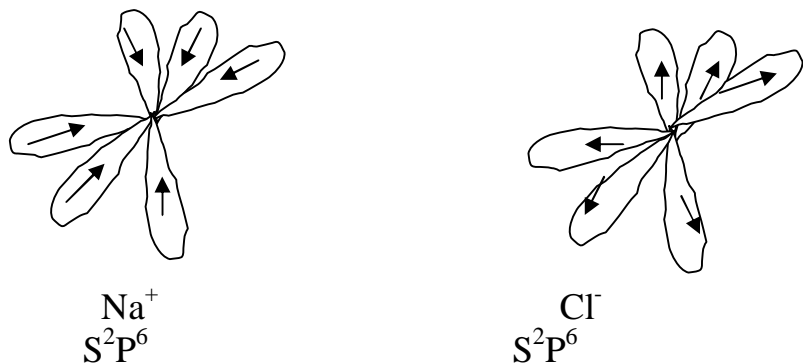


Nahar duzynyň (NaCl) kristallary emele gelende galogenleriň atomlary (F, Cl, Br, I) aşgar metallaryň (Li, Na, K, Rb, Cs) walent elektronlaryny özüne çekýärler.

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

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

Anionlaryň we kationlaryň dartyşmaklygynda NaCl gözenegi emele gelýär. Onuň koordinasion sany 6 deňdir. (Her bir atomyň goňşy atomlar bilen 6 walent baglanyşygy aňladýar). (27 -nji çyzgy).



## 27 -nji çyzgy

Ion kristallara udel elektrik garşylygy ýokary bolan dielektrikler deňşlidirler.

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 görünyän ýaýlasýnda durdyrlar.

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

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

$U$  – ulgamyň potensial energiýasy.

$E$  – ulgamyň doly energiýasy.

(7.1) deňlemäniň iki bölejigini sopräžonly  $\psi^*$  funksiýa köpeldip we göwrüm boýunça integrirläp, alýarys:

$$\varepsilon = \frac{\int \psi^* \hat{H} \psi dV}{\int \psi^* \psi dV} \quad (7.2)$$

(7.2) deňlemede ulgamyň gamiltoniýany  $\hat{H}$  bellidir.

Energiýany hasaplamak üçin  $\psi$  tolkun funksiýany tapmaly.

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

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

$$N = c_a; \quad \lambda = \frac{c_b}{c_a}; \quad (7.3)$$

Bu ýerde  $\psi_a$  we  $\psi_b$  – atom tolkun funksiýalary.

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

Tolkun funksiýanyň normirowka şertinden:

$$\int |\psi|^2 d\Omega = 1 \quad (7.4)$$

tapýarys:

$$C_a^2 + 2C_a C_b S + C_b^2 = 1 \quad (7.5)$$

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 biri-birine ýakynlaşanda olaryň elektron gatlaklary biri-biriniň üstini örtüp, bir atomyň beýleki atomyň orbitasyna geçmeklige mümkinçilik berýärler.

Eger iki özara täsirleşýän atom ulgamynyň üst örtülýän ýagdaýyndaky energiýa izolirlenen ýagdaýyň (atomlar biri-birinden uzak aralykda ýerleşýärler) kiçi bolsa, onda ulgamda dartýş güýçleri ýuze çykýar, soňra bolsa (atomlar biri-birine ýakynlaşanda) olar ýagdaýlaryň itekleme güýçleri bilen çalyşýarlar.

Sistemanyň minimal energiyasyna laýyklykdaky ýagrolaryň arasyndaky uzaklykda dartýş güýçleri itekleme güýçlere deň bolýarlar we  $H_2$  molekula emele gelýär. Bu molekulanyň elektron gatlagy geliýiňki ýalydyr. Munuň 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:

$$\hat{H}\psi = \varepsilon\psi \quad (7.1)$$

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

$$U_{ij} = \pm \frac{Z_1 Z_2 \ell^2}{r_{ij}} + \frac{b}{r_{ij}^n} \quad (6.5)$$

Bu ýerde birinji agza dartýş güýçleriň potensialyna, ikinji bolsa – itekleme güýçleriň potensialyna degişlidir.

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:

$$U_i = -\frac{AZ_1 Z_2 \ell^2}{r} + \frac{B}{r^2} \quad (6.6)$$

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

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

$$U(r) = NU_i = -N \left( \frac{Z_1 Z_2 \ell^2 A}{r} - \frac{B}{r^n} \right) \quad (6.7)$$

Bu ýerde N – ion jübütleriň sany.

Deňagramlyk ýagdaýynda ( $r = r_0$ )  $U(r)$  energiýa minimaldyr.

$$\left( \frac{dn}{dr} \right)_{r=r_0} = N \left( \frac{Z_1 Z_2 \ell^2 A}{r_0^2} - \frac{nB}{r_0^{n+1}} \right) = 0$$

$B = \frac{Z_1 Z_2 \ell^2 A}{n} r_0^{n-1}$  bahasyny (6.8) goyanymyzdan soň,

bir ion jübütine gelýän ion kristallyň sepleşik energiýasy aşakdaky formuladan tapylýar:

$$U(r_0) = -\frac{Z_1 Z_2 \ell^2 A}{r_0} \left(1 - \frac{1}{n}\right) \quad (6.8) -$$

Born-Landeniň formulasy.

Nazaryýet boýunça hasaplanan we eksperiment boýunça tapylan energiýalaryň tapawudy takmynan 3% deňdir.

Eger-de (6.7) formulada Bornuň dereje potensialynyň ýerine

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

real eksponensial potenciallaryny ulansak, onda eksperiment bilen nazaryýetiň arasyndaky ylalaşygy gowulandyryp bileris.

Bu ýerde  $\rho$  - koeffisiýent.

Onda kristallyň energiýasy asakdaky görnüşde ýazylýar:

$$U(r) = -N \left( \frac{Z_1 Z_2 \ell^2 A}{r} - B \ell^{-r/\rho} \right) \quad (6.9)$$

$r = r_0$  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

$$U(r_0) = -\frac{Z_1 Z_2 \ell^2 A}{r_0} \left(1 - \frac{\rho}{r_0}\right) \quad (6.10) - \text{Born-Meýeriň formulasy.}$$

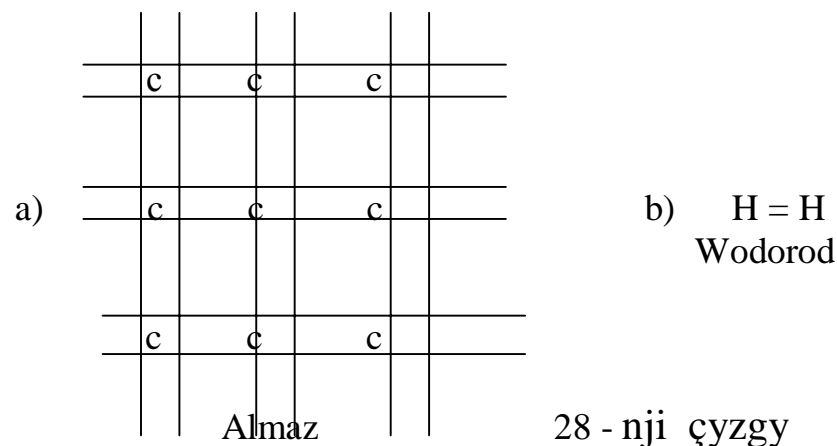
## §7. Kowalent kristallary. Metallar.

### a) Kowalent kristallary.

Kowalent kristallara kowalent baglanyşygyň esasynda dörän gaty jisimler degişlidirler.

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

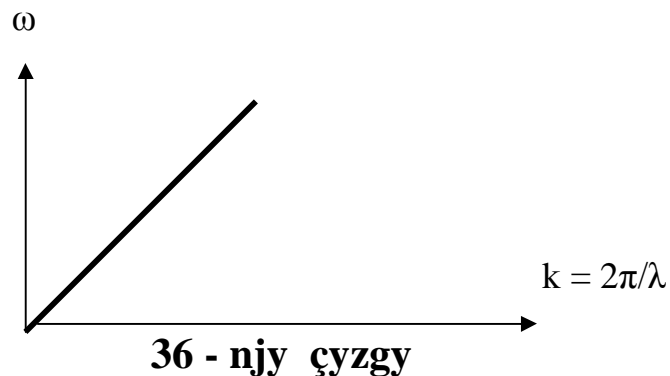
Gomopolýar molekulardaky yaly ( $H_2$ ,  $Cl_2$ ,  $I_2$ ) kowalent baglanyşygy alyş-çalyş elektron atomlaryň arasyndaky özara täsiri bilen düşündirilýär. Birinji suratda almazyň gurluşyndaky (28 a çyzgy) we wodorodyň molekulasyndaky (28 b çyzgy) kowalent baglanyşygy görkezilipdir.



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

$$\omega = \sqrt{E/\rho} \cdot k = v k \quad (10.6)$$

(10.6) formuladan gelip çykýan netije: tükeniksiz kirşde ýaýraýan maýyşgakly tolkun üçin yrgyldamalaryň ýygylgy tolkun sanyna çyzykly baglydyr (36-njy çyzgy).



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

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

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

### III BAP

## GATY JISIMLERIŇ MEHANIKI HÄSIÝETLERI.

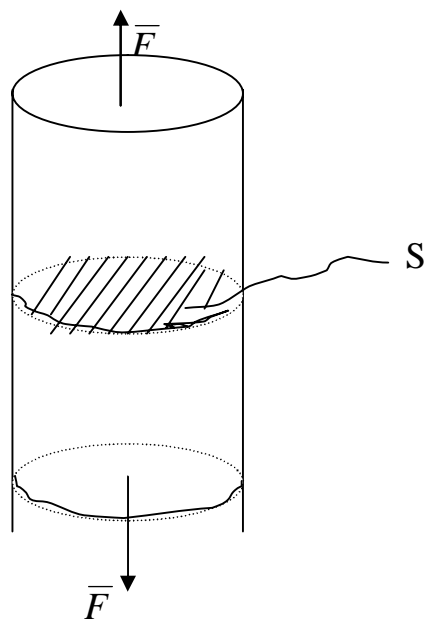
### §8. Gaty jisimleriň dartgynlygy we deformirli ýagdaýlary.

Gaty jisimleriň mehaniki häsiýetleri olaryň käbir daşky 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 mehaniki naprýaženiýe döreýär. Şu ýagdaýda gaty jisim dartgynly ýagdaýda bolýar diýip aýdýarlar.

Naprýaženiýe ýa-da has takyk mehaniki naprýaženiýe diýip jisime täsir edýän  $F$  güýjiň modulynyň onuň  $S$  kesekiginiň meýdanyna bolan gatnaşygyna aýdylýar: (29 - njy çyzgy).



### 29 - ngy çyzgy

$$\delta = \frac{F}{S} \quad (8.1)$$

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

Dartgynly ýagdaýy beýan etmek üçin jisimiň hemme nokatlarynda naprýaženiýe bir jynslydyr diýip hasap edeliň. Şu jisimiň göwrümünde islendik “O” nokat alyp, şonuň töwereginde tükeniksiz kiçi kub guralyň (30 - ngy çyzgy).

(2) deňlemäni aşakdaky görnüşde ýazalyň:

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

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

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma}{\partial x} \quad (10.3)$$

Izotrop jisimler üçin Gukyň kanunyna laýyklykda  $\sigma = E\varepsilon$ , bu ýerde E – Ýungyň moduly:

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

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

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

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (10.4)$$

Bu kirşin boýunda ýaýraýan maýyşgak tolkunlar üçin adaty hereketiň deňlemesidir.

Bu deňlemäniň çözülişini hereket edýän dik monohromatik tolkun görnüşde gözläliň:

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

### (10.5)

Bu ýerde  $u_0$  – yrgyldynyň amplitudasy

$\nu$  – yrgyldylaryň ýygylygy

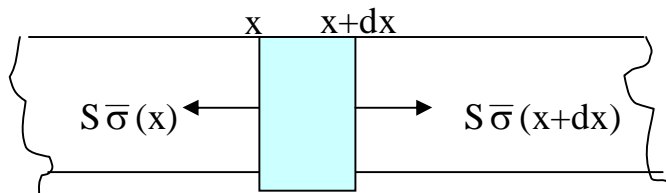
$t$  – wagt

$\omega = 2\pi\nu$  – tegelek ýygylyk

$k = 2\pi/\lambda$  – tolkun san

atomlarynyň yrgyldymalarynyň nazaryýeti örän çylşyrymlydyr. Şonuň üçin biz ilki birölçeqli gözenekdäki atomlaryň yrgyldymalaryna seredeliň. Mundan soň alnan netijeleri üçölçeqli kristallik gözeneklerine umumylaşdyrmak bolar.

Çyzykly dyklyklygy  $\rho$  bolan bir hilli kirşdäki dik tolkunlaryň ýaýramagyna seredeliň. Dik tolkun ýaýranda kirşin galyňlygy  $\Delta x$  bolan elementine (35 - nji çyzgy) güýçler täsir edýär: çepden  $S\sigma(x)$ , sagdan  $S\sigma(x+dx)$ .



**35 - nji çyzgy**

Bu ýerde  $S$  – kirşin kese kesiginiň meýdany,  $\sigma(x)$  we  $\sigma(x+dx)$  – normal maýyşgakly naprýaženiýalar.  $\Delta x$  element jemleýji güýç täsir edýär:

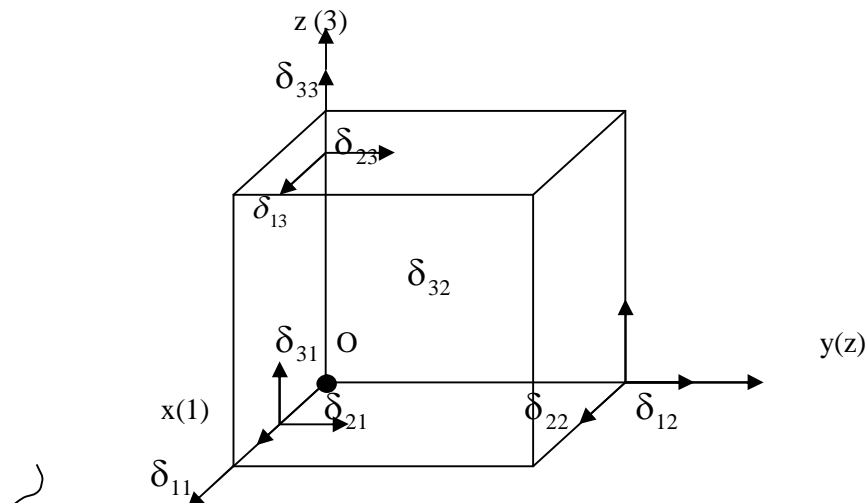
$$F = S\sigma(x+\Delta x) - S\sigma(x) \quad (10.1)$$

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

$$\rho s \Delta x \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = S\sigma(x + \Delta x) - S\sigma(x) \quad (10.2)$$

Bu ýerde  $\rho s \Delta x = m$ -galyňlygy  $\Delta x$  bolan elementiň massasy.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \text{tizlenme.}$$



**30 - nji çyzgy**

“j” okyna perpendikulär

bolan “i” ugry boýunça kubyň gyrasyna täsir edýän naprýaženiýeniň komponentini  $\delta_{ij}$  haryp bilen belläliň.

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

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

Deňagramlyk ýagdaýda  $\delta_{23} = \delta_{32}$ ,  $\delta_{31} = \delta_{13}$ ,  $\delta_{12} = \delta_{21}$ . Onda 9 komponentden diňe altysy biri-birine bagly däl. Şonuň üçin tenzoryň baş diagonalyna simmetrik bolan komponentler deňdirler ( $\delta_{ji} = \delta_{ij}$ ).

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

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

Ýüp özüne edilýän güýçleriň täsiri kesilenden soň ilkişadaky 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 diýilýär.

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

## **§10. Kristallardaky maýyşgak tolkunlar.**

### **Kristallik gözenekdäki atomlaryň yrgyldymalary. Bir jynsly kirşiň bir ölçegli yrgyldymalary. Monokristallardaky maýyşgak tolkunlar. Bir atomly çyzykly zynjyrjagazyň yrgyldymalary.**

#### **a) Kristallik gözenekdäki atomlaryň yrgyldymalary.**

#### **Bir jynsly kirşiň bir ölçegli yrgyldymalary.**

Gaty jisimleridäki atomlar islendik temperaturada özläriniň orta deňagramlyk ýagdaýlarynyň töwereginde arakesmesiz (üzüksiz) yrgyldaýarlar. Kiçi amplitudalarda şonuň ýaly yrgyldymalary garmonikli (yzygiderli) hasap edip bolýar. Temperaturanyň artmagy bilen yrgyldamalaryň amplitudalary we energiýalary ulalýar. Bu ýagdaýda atomlaryň biriniň yrgyldymasynyň oýanmagy golaýyndaky goňşy atomlara geçýär, olar bolsa öz gezeginde şol yrgyldymalary başga goňşy 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 basgalar). Üç ölçegli kristallyň



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 süýgeşik ýaly alyp barýar. Meselem, örän uly naprýäženiýelerde polat süýgeşiklik häsiýetleri üýze çykarýar. Bu bolsa örän uly agram döredýän desgalaryň kömegi bilen önümler ştamplananda giňden peýdalanylýar.

Sowuk polady ýa-da demiri 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 häsiýetlere eýe bolýar.

Gaty jisimleriň maýyşgaklyk 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 süýgeşiklik, metallar bolsa beter süýgeşiklikdirler: olarda dislokasiýalar erkin hereket edýärler.

Ideal we real kristallaryň mehaniki häsiýetlerini aşakdaky jedwelden görüp bolar:

Jedwel.

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

Eger bir ujy berkidilen bir jynsly sime okunyň ugruna tarap  $\vec{F}$  güýç goýulsa, onda sim süýnme deformasiýasyna sezewar bolýar (31 - nji çyzgy). Süýnme deformasiýasyny

$$\Delta \ell = \ell - \ell_0 \quad (8.2) \text{ absolüt uzalma}$$

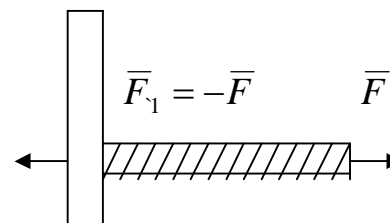
we

$$\varepsilon = \frac{\ell - \ell_0}{\ell_0} = \frac{\Delta \ell}{\ell} \quad (8.3) \text{ otnositel uzalma}$$

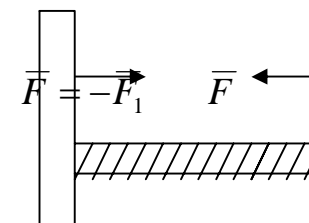
bilen häsiýetlendirýärler.

Bu ýerde  $\ell_0$  - simiň başdaky uzynlygy.

$\ell$  - ahyrky uzynlygy.



31 - nji çyzgy



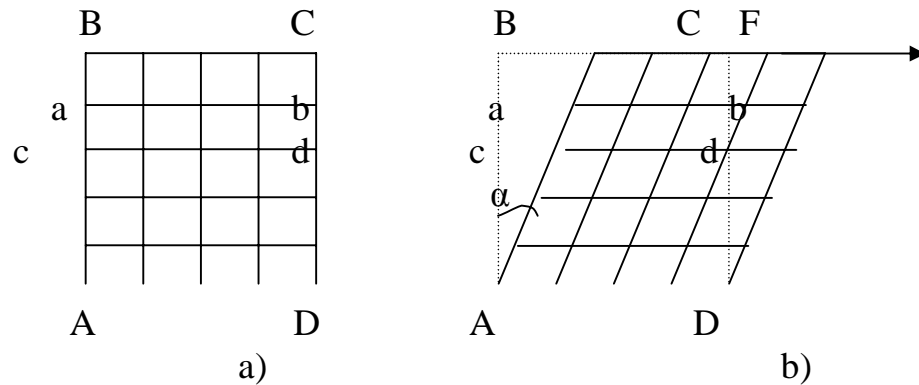
32 - nji çyzgy

Kiçi süýnmelerde ( $\Delta \ell \ll \ell_0$ ) jisimleriň köpüsiniň deformasiýasy maýyşgakdyr.

Eger şol sime berkidilen ujina tarap  $\vec{F}$  güýç bilen täsir edilse (32 - nji çyzgy), onda sim gysylma deformasiýasyna sezewar bolýar. Şu halda göräli deformasiýa otrisateldir:  $E < 0$ .

Süýnmede ýa-da gysylmada 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.



### 33 -nji çyzgy

Indi ýüzüne gorizonta we wertikal çyzyklar çyzylan kub ýa-da parallelepiped görnüşinde rezin jisimi alalyň (33a çyzgy). Jisimiň ýokarsyna gorizonta güýç goýalyň (33b çyzgy). Jisimiň  $ab$ ,  $cd$  we şolara meňzeş gatlaklary parallelligine galyp, süýşerler, wertikal granlary bolsa, tekizligine galyp,  $\alpha$  burça gyşarýarlar.

Jisimleriň gatlaklarynyň biri-birine göräli süýşmesinde bolup geçýän deformasiýa süýşme deformasiýasy diýýärler.

Eger güýç iki esse ulaldylsa, onda  $\alpha$  burç hem iki esse ulalýar. Maýyşgak deformasiýalarda  $\phi$  süýşme burçynyň  $F$  goýlan güýjüň modulyna göni proporsionaldygyny tejribeler görkezýär.

## §9. Maýyşgaklyk. Izotroply we anizotroply jisimler üçin

$\epsilon_{ij} = 9$  we  $\delta_{ij} = 9$ . Onda jemi  $C_{ijkl}$ -niň 81 sany komponentasy bolup biler.

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

Ýük artdygyça deformasiýa barha çalt ulalýar. Diagrammadaky  $C$  nokada deňişli naprýäženiýäniň käbir bahasynda praktiki taýdan ýük artdyrylmasa-da uzalma ösýär. Bu hadysa materialyň akyjylygy diýýärler ( $CD$  - uçastok). Diagrammadaky egri çyzyk şonda gorizonta 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  $\delta_b$  maksimal baha ýetenden soň üzülmeçlik bolup geçýär (nusga daşky 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 çäğinden bir näçe esse kiçi bolsa, onda olar ygtybarlydyrlar.

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

### b) Kristallik jisimleriň süýgeşiklik häsiýetleri.

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

Gukuň kanunyny başga görnüşde-de ýazyp bolýar:

$$\delta = C\varepsilon \quad (9.4)$$

Bu ýerde  $C = \frac{1}{S}$  - gatylygynyň 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 **proporsionallyk çägi** diýýärler.

Eger ýük ulaldylsa, onda deformasiýa çyzykly däl bolýar, naprýäženiýe bolsa otnositel uzalma bolan göni proporsionallygyny bes edýär. Muňa garamazdan, uly bolmadyk çyzykly däl deformasiýalarda ýük aýrylandan soň jisimiň formasy we ölçegleri praktiki taýdan öňki ýagdaýyna gelýär (diagram-manyň AB uçastogy). Galyndy deformasiýa heniz aýdyň ýüze çykmaryk mahalyndaky maksimal naprýäženiýä (otnositel galyndy deformasiýasy 0,1 %-den ýokaryk geçmeýär)  $\delta$  maýyşgaklyk çägi diýýärler.

Monokristall anizotrop gaty jisimler üçin Gukuň kanunyny şeýle ýazyp bolar:

$$\delta_{ij} = C_{ijkl}\varepsilon_{kl} \quad (9.5)$$

**Bu ýerde  $C_{ijkl}$  – kristallyň gatylygynyň hemişeligi**

$\varepsilon_{ij}$  we  $\delta_{ij}$  – laýyklygynda kristallyň deformasiýa we naprýäženiýe tenzorynyň komponentleri.

**Gukuň kanuny.**

**Kristallik jisimleriň süýgeşiklik häsiýetleri.**

**a) Maýyşgaklyk. Izotroply we anizotroply jisimler üçin**

**Gukuň kanuny.**

Belli 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 gatlakra perpendikulýar bolan ugurda döwmek has kyndyr.

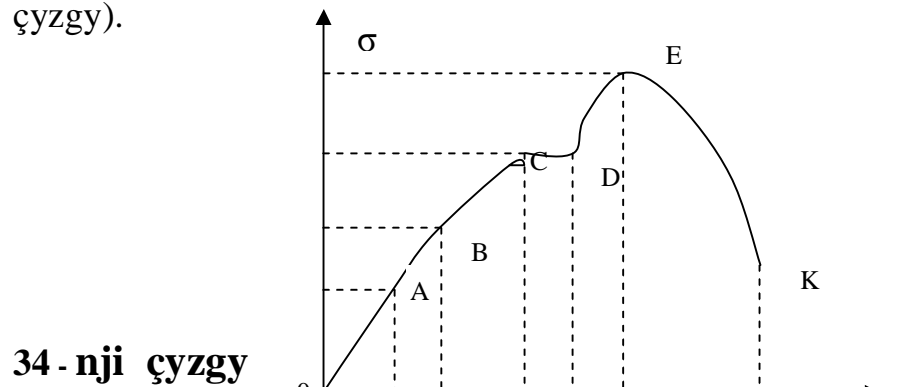
Fiziki häsiýetleriň kristalyň içindäki ugurlara bagly bolmagyna **anizotropiýa** diýilýär. Ähli kristallik jisimler anizotropdyrlar.

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

Bu ýerde ýagdaý, adaty metalynyň kiçijik kristallaryň biri-biri bilen bitişen ägirt köp mukdaryndan düzülýändiginden ybaratdyr. Her bir kristalyň häsiýeti ugurlara baglydyr, emma kristallar bir-birine görä tertipsiz ýerleşdirler. 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 döreyän naprýäženiýani ölçeýärler. Geçirilen tejribeleriň netijeleri boýunça naprýäženiýaniň süýnme diagrammasy diýen ady alan “E” otnositel uzalma bolan baglylyk grafigini çyzýarlar (34 - nji çyzgy).



Kiçi deformasiýalarda  $\delta$  naprýäženiýe otnositel uzalma göni proporsionaldyr (diagrammanyň OA uçastogy). Bu netijä ilkinji gezek 1678 ýylda R. Guk gelipdir. Onuň kesgitlemesine görä izotrop jisimlerde deformasiýa goýulan naprýäženiýä göni proporsionaldyr (Gukun kanuny):

$$\delta = |\varepsilon| E \quad (9.1)$$

(9.1) formulada  $\varepsilon = \frac{\Delta \ell}{\ell}$  otnositel uzalma modul

boýunça alnan, çünki Gukun kanuny süýnme

deformasiýasy üçin dogry bolşy ýaly,  $\varepsilon < 0$  bolanda gysylma deformasiýasy üçin hem dogrudyr.

Gukun kanunyna girýän E proporsionallyk koeffisiýentine **maýyşgaklyk** moduly ýa-da Ýungun moduly diýilýänr. Kiçi deformasiýalarda  $\delta$  naprýäženiýeni we  $\varepsilon$  otnositel uzalmany ölçäp, (9.1) formula boýunça Ýungun modulyny kesgitleýärler.

Giň ýaýran materiallaryň köpüsi üçin Ýungun moduly eksperimental ýol bilen kesgitlenendir. Meselem, hromnikel polady üçin  $E = 2,1 \cdot 10^{11}$  Pa, alüminiý üçin  $E = 7 \cdot 10^{10}$  Pa. Ýungun moduly näçe uly bolsa, beýleki deň şertlerde (F, S,  $\ell_0$  birmeňzeş bolanda) sim şonça-da az deformirlenýär.

Ýungun moduly süýnme ýa-da gysylma maýyşgaklyk deformasiýasynda materialyň görkezýän garşylygyny häsiýetlendirýär. (9.1) 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

$$F = \frac{SE}{\ell_0} |\Delta \ell| \quad (9.2)$$

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

$$F = K |\Delta \ell| \quad (9.3)$$

### **b) Fononlaryň metallaryň ýylylyk sygymyna goşandy.**

Häzirki zaman nazaryýeti boýunça metal položitel zarýadlanan ionlardan we erkin walent elektronlardan düzülen ulgamdan 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 Dülongyň we Ptininiň kanunynyň berýän ýylylyk sygymynyň ulylygyndan 1,5 esse köpdür, sebäbi jisimi ýylytmak üçin ýetirýän energiýa bar bolan erkin elektronlaryň arasynda paýlanylýar.

$0^0\text{K}$  golaýyndaky 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 aýdlanda, diňe 2 elektron birmeňzeş energiýa we hereketiň ugruna eýedirler.

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

### **b) Monokristallardaky maýyşgak tolkunlary. Bir atomly çyzykly zynjyrjagazyň yrgyldymalary.**

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

Dykyzlygy “ $\rho$ ” bolan kristalldaky maýyşgak tolkunlarynyň ýaýramagyna seredeliň.

Kristallyň içinde  $x$ ,  $y$ ,  $z$  koordinat oklaryna parallel  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  gapyrgaly elementar parallelepiped saýlalyň. Maýyşgak kirşdäki ýaly maýyşgak tolkunuň kristall boýunça hereket eden mahalynda  $\sigma_{ij}$  naprýaženiýe täsir astynda parallelepipediniň her bir grany kiçiräk ýerini üýtgedýär (maýyşgak oblastynda).

Maýyşgak tolkunuň “ $x$ ” ugry boýunça güýjeýän ýerini üýtgedýän hereketiň deňlemesini getirip çykaralyň (37 -nji çyzgy).

“ $x$ ” grana täsir edýän naprýaženiýe:

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

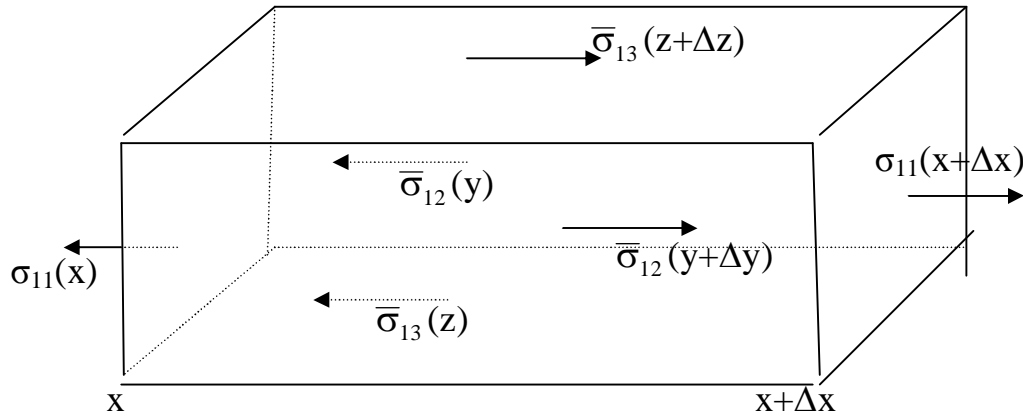
“ $x$ ” ugry boýunça täsir edýän jemleýji güýç deňdir

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

Şol ugru boýunça täsir edýän başga güýçler parallelepipediniň içindäki  $\sigma_{12}$  we  $\sigma_{13}$  naprýaženiýalaryň üýtgemeginde dörän güýçlerdir.

Şonuň üçin “ $x$ ” ugru boýunça jemleýji güýç:

$$F(x) = \left( \frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{13}}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z \quad (10.7)$$



### 37 - nji çyzgy

Indi parallelepipedin massa merkeziniň süýşmesiniň komponentlerini  $U$ ,  $v$  we  $\omega$  haryplary bilen belgiläliň.

Nýutonyň ikinji kanunyna laýyklykda güýç parallelepipedin  $\rho \Delta x \Delta y \Delta z$  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:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{13}}{\partial z} \quad (10.8)$$

Eger  $U$ ,  $v$  we  $\omega$  süýşmeleri “ $x_i$ ” bilen belgilesek, onda hereketiň deňlemesini aşakdaky görnüşinde ýazyp bolar:

Onda sferiki gatlakda şonuň ýaly öýjükleriň sany

$$dz = G(E) dE = \frac{3 \cdot 4\pi P^2 dp V}{(2\pi\hbar)^3} \quad (12.4)$$

Bu ýerde  $G(E)$  ýagdaýlaryň dykzlygy.

(12.4) aňlatmada  $P$ -ni  $E$  energiýa bilen çalyşsak we (12.3) aňlatmany göz öňüne tutsak, alarys

$$G(E) = \frac{12\pi V}{(2\pi\hbar)^3} \frac{1}{9_s^2} E^2 \quad (12.5)$$

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

$$\int_0^{K_0\theta_D} G(E) dE = 3N \quad (12.6)$$

(12.5) aňlatmany göz öňüne tutyp, alarys:

$$G(E) = \frac{9NE^2}{(K_0\theta_D)^3} \quad (12.7)$$

Onda Boze-Eýnşteýniň nazaryýetiniň esasynda kristalardaky fotonlaryň doly energiýasy aşakdaky deň bolar:

$$\langle E \rangle = \int_0^{K_0\theta_D} EG(E) \langle n(\bar{k}\bar{s}) \rangle dE = \frac{9NK_B T}{(\theta_D/T)^3} \int_0^{\theta_D/T} \frac{x^3 dx}{e^x - 1} \quad (12.8)$$

Bu ýerde  $\langle n(\bar{k}\bar{s}) \rangle$  - bir öýjükdäki fononlaryň orta sany.

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

$S = 1, 2, 3$  – polýarizasion san.

$$C_v = \left( \frac{\partial E}{\partial T} \right)_v = \frac{12\pi^4 Nk}{5\theta_D^3} T^3 = \gamma_D T^3 \quad (11.18)$$

Bu ýerde  $\gamma_D = \frac{12\pi^4 Nk}{5\theta_D^3}$ ; (11.18) aňlatma eksperiment bilen 0°K nokadyň golaýyndaky örän kiçi temperatura aralygynda gowy ylalyşýar.

## §12. Fononlar. Fononlaryň metallaryň ýylylyk sygymyna goşandy.

### a) Fononlar.

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

$$E = \hbar\omega \quad (12.1)$$

impulsy bolsa

$$P = \hbar k \quad (12.2)$$

Fononyň impulsy we energiýasy aşakdaky aňlatma bilen baglanyşyklydyrlar:

$$E = P v_s$$

Bu ýerde  $v_s$  – sesiň tizligi.

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

Sferiki gatlagyň göwrümi

$$dV = \frac{4\pi}{3} (P + dp)^3 - \frac{4\pi}{3} P^3 \approx 4\pi P^2 dp \quad (12.3)$$

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

$$\rho \frac{\partial x_i}{\partial t^2} = \sum \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad (j=1,2,3) \quad (10.9)$$

Bu ýerde  $\sigma_{ij}$  – naprýaženiýeleriň tenzorynyň komponentleri.

Kub kristallary üçin:

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

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

( $C_{ij}$  – maýyşgak komponentleri)

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

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = C_{11} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + C_{44} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + (C_{12} + C_{44}) \left( \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial z} \right) \quad (10.10)$$

$$\rho \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial t^2} = C_{11} \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + C_{44} \left( \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right) + (C_{12} + C_{44}) \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y \partial z} \right) \quad (10.11)$$

$$\rho \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} = C_{11} \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} + C_{44} \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) + (C_{12} + C_{44}) \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y \partial z} \right) \quad (10.12)$$

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

$$u = u_0 \exp[i(\bar{k}\bar{x} - \omega t)] \quad (10.13)$$

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.

(10.13) aňlatmany (10.10) deňlemä goýsak alarys:

$$\vartheta_\ell = \frac{\omega}{k} = \sqrt{C_{11}/\rho} \quad (10.14)$$

Bu ýerde  $v_\ell$  - [100] ugur boýunça maýyşgak (ses) tolkunynyň ýaýramasynyň tizligi.

(10.10) deňlemäniň başga çözülişi kese tolkunyny ýa-da süýnme wektorydyr:

$$\vartheta = \vartheta_0 \exp[i(\bar{k}\bar{x} - \omega t)] \quad (10.15)$$

(10.15) aňlatmany (10.11) goýsak, alarys:

$$\vartheta_t = \frac{\omega}{k} = \sqrt{C_{44}/\rho} \quad (10.16)$$

Bu ýerde  $v_t$  - [100] ugur boýunça maýyşgak tolkunynyň ýaýramasynyň tizligi.

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

$$\omega = \omega_0 \exp[i(\bar{k}\bar{x} - \omega t)] \quad (10.17)$$

Şu çözülişi (10.12) deňlemä goýsak, alarys:

$$\vartheta_t = \sqrt{C_{44}/\rho} \quad (10.18)$$

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

Bir atomly çyzykly zynjyrjagazyň yrgyldymasynyň ýygylgy:

$$\omega = \omega_{\max} = (4\beta/M)^{1/2} \approx 5 \cdot 10^{13} \text{ s}^{-1} \quad (10.19)$$

$k\theta\varepsilon = \hbar\omega_D$  – gözenegiň yrgyldamasyny oýatdyrmaga ukyply bolan energiýanyň maksimal kwanty – onuň fiziki manysydyr. Gaty jisimleriň köpüsi üçin  $\theta_D = 100 - 400\text{K}$  bolsa  $\theta_D = 2230\text{K}$ .

1. Ýokary temperaturaly ýagdaý:  $\hbar\omega \ll kT$ . Bu ýagdaýda (11.13) aňlatmanyň integralyň aşagyndaky  $\ell^x - 1$  aňlatmany bir hatara dargadyp bolýar:

$\ell^x - 1 \approx 1 + x - 1 = x$ , onda (11.13) aşakdaka deň bolar:

$$E = 9Nk\theta_D \left(\frac{T}{\theta_D}\right)^4 \int_0^{T/\theta_D} x^3 dx = 3NkT = 3RT \quad (11.15)$$

$$\text{Şonuň üçin ýylylyk sygymy } C_V = \left(\frac{\partial E}{\partial T}\right)_V = 3R$$

ýagny, Dulongiň we Ptininiň kanunyna laýyklykda.

2. Pes temperaturaly ýagdaý:  $\hbar\omega \gg kT$ , ýa-da  $x \gg 1$ .

Bu ýagdaýda (11.13) aňlatmanyň integrirlemäniň 0-dan tä  $\theta_D/T$  çenli çäklerini, 0-dan tä  $\infty$  çenli çäkleri çalşyryp bolar:

$$\int_0^\infty \frac{x^3 dx}{\ell^x - 1} = \frac{\pi^4}{15} \quad (11.16)$$

Onda akustik yrgyldymalaryň energiýasy

$$E = \frac{9Nk\theta_D \pi^4}{15} \left(\frac{T}{\theta_D}\right)^4 = \frac{3Nk\theta_D \pi^4}{5} \left(\frac{T}{\theta_D}\right)^4 \quad (11.17)$$

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

Pes temperaturalarda (11.17) deňlemeden gelip çykýan ýylylyk sygymynyň aňlatmasy aşakdaka deňdir:



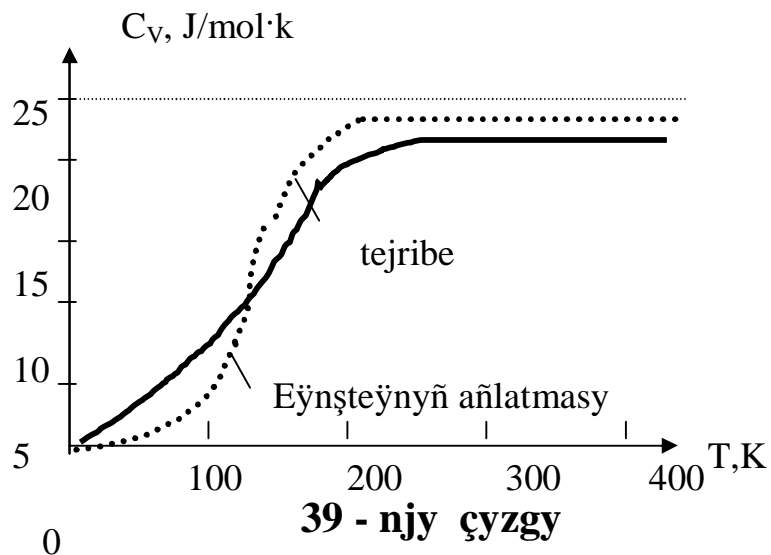
Eýnşteýniň esasy pikrini saklap, Debaý ony öz çaklamasy bilen üstüni ýetirdi. Onuň çaklamasyna görä garmoniki ossilýatorlar dürli ýygylýk bilen yrgyldýýarlar, olaryň energiýasy bolsa Plank boýunça kwantlanan.

Onda doly ýygylýk energiýa aşakdaky deňlemeden tapylýar:

$$E = \frac{9NkT}{(\theta_D/T)^3} \int_0^{\theta_D/T} \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = 3NkTD(\theta_D/T) \quad (11.13)$$

(11.13) aňlatma Debaýyň formulasy diýip atlandyrylýar, aşakdaky

$$D(\theta_D/T) = \frac{3}{(\theta_D/T)^3} \int_0^{\theta_D/T} \frac{x^3 dx}{e^x - 1} \quad (11.14)$$



aňlatma bolsa Debaýyň funksiýasy diýip atlandyrylýar.

$\theta_0$  – gaty jisimiň häsiýetlendiriji temperaturasy ýa-da Debaýyň temperaturasydyr.

Bu ýerde  $\beta$  – güýç berýän hemişelik.

$M$  – atomyň massasy.

San bahasyna görä bu ýygylýk gaty jisimlerdeki atomlaryň ýygylýk yrgyldymalarynyň ýygylýklaryna laýyklydyr.

## IV BAP

### GATY JISIMLERIŇ ÝYLYLYK HÄSIÝETLERI.

#### §11. Gaty jisimleriň ýylylyk sygymy. Dulong we Ptiniň kanuny. Eýnşteýniň ýylylyk sygymynyň nazaryýeti. Debaýyň ýylylyk sygymynyň nazaryýeti.

##### a) Gaty jisimleriň ýylylyk sygymy. Dulongyň we Ptiniň kanuny.

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

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

Şoňa görä-de hemişelik göwrümdäki ýylylyk sygymy

$$C_V = \left( \frac{\partial E}{\partial T} \right)_V \quad (11.1)$$

Başgaça aýdanymyzda, sistemanyň energiýasynyň üýtgemegi bilen  $(\partial E)$  onuň temperaturasy hem üýtgeýär  $(\partial T)$ .

$$\left( e^{\hbar\omega/kT} - 1 \right)^2 = \left( 1 + \frac{\hbar\omega}{kT} + \dots - 1 \right)^2 \approx \left( \frac{\hbar\omega}{kT} \right)^2 \quad (11.9)$$

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

Onda (11.8) aňlatmadan alarys:

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

2. Pes temperaturaly ýagdaý ( $kT \ll \hbar\omega$ ).

Bu ýagdaýda  $e^{\hbar\omega/kT} \gg 1$ .

Onda (11.8) aňlatmadan alarys:

$$C_V = 3N_A k \left( \frac{\hbar\omega}{kT} \right)^2 e^{-\hbar\omega/kT} \quad (11.10)$$

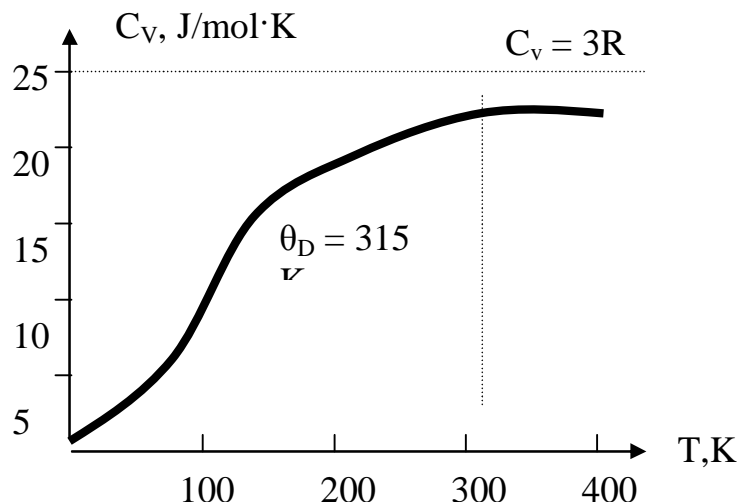
Ýylylyk sygymyň çalt pese düşýän  $\theta_\epsilon$  temperatura nokadyna Eýnşteýniň häsiýetlendiriji temperaturasy diýilýär. Bu temperatura aşakdaky deňlemiden tapylýar:

$$\hbar\omega_\epsilon = k\theta_\epsilon \quad (11.11)$$

Eger  $\omega_\epsilon = 2 \cdot 10^{13} \text{ s}^{-1}$ ,  $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  bolsa, onda  $\theta_\epsilon \approx 150 \text{ K}$ .

##### ç) Debaýyň ýylylyk sygymynyň nazaryýeti.

Eýnşteýniň ýylylyk sygymy üçin tapan aňlatmasy eksperiment bilen diňe  $T \approx \theta_\epsilon$  temperaturalarda ylalyşykda bolýar, emma olardan pes temperaturalarda şonuň ýaly ylalyşyk bolmaýar (39 - ný çyzgy). Munuň sebäbi – Eýnşteýniniň modelinde her bir aýratynlykda alynan atom başga atomlardan bagly däl ýagdaýynda  $\omega$  ýygylýk bilen yrgyldaýar. Emma hakykatdan gaty jisimlerdäki atomlar şol bir ýygylýk bilen yrgyldap bilmeýärler, çünki olar biri-birine baglydyrlar.



### 38 -nji çyzgy

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

$$E = 3N_A \langle E \rangle = 3N_A \frac{\hbar\omega}{e^{\hbar\omega/kT} - 1} \quad (11.7)$$

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

$$C_V = \left( \frac{\partial E}{\partial T} \right)_V = \frac{3kN_A \left( \frac{\hbar\omega}{kT} \right)^2}{\left( e^{\hbar\omega/kT} - 1 \right)} e^{\hbar\omega/kT} \quad (11.8)$$

Iki çäkli ýagdaýlara seredeliň.

1. Ýokary temperaturaly ýagdaý ( $kT \gg \hbar\omega$ ).

Bu ýagdaýda (11.8) deňlemäni ýönekeýleşdirip bolar. Munuň üçin deňlemedäki maýdalawjyny hatara dargadalyň:

1918-nji ýylda fransuz alymlary Dýulong we Pti eksperiment 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 deňölçepli paýlanmagynyň belli kanunyndan düşündirip bolar. Eger sistemanyň her bir erkinlik derejiligine degişli energiýa  $kT/2$  deň bolsa ( $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$  –Bolsmanyň hemişeligi), onda şu kanuna laýyklykda munuň ýaly sistemanyň orta energiýasy erkinlik derejiligiň sanyň  $kT/2$  köpeltmek hasylyna deňdir.

Gaty jisimde her bir atom kristallik gözenegiň düwünlerinde üç özara perpendikulär ugurlarda yrgyldýarlar. Munuň ýaly atomy üç sany çyzykly garmoniki ossilýator görnüşinde göz önüne getirip bolýar. Ossilýator yrgyldanda onuň kinetik energiýasy yzygiderli potensial energiýasyna we tersine, potensial energiýasy kinetik energiýasyna öwrülýär. Bir erkinlik derejeligi

degişli orta kinetik energiýa  $\left( \frac{kT}{2} \right)$  üýtgemeyänligi sebäbli

we orta potensial energiýasyna deň bolanlygy sebäbli ossilýatoryň orta doly energiýasy kinetik we potensial energiýalarynyň jemine deň bolmaly, ýagny  $kT$ .

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

$$E = 3N_A kT \quad (11.2)$$

Bu ýerden molýar ýylylyk sygymy

$$C_V = \left( \frac{\partial E}{\partial T} \right)_V = 3kN_A = 3R \quad (11.3)$$

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

Şeýlelikde, (11.3) aňlatmadan  $C_V$ -nyň bahasyny tapýas:

$$C_V = 25 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

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

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

Munuň ýaly ulgamyň doly orta ýylylyk energiýasy aşakdaka deňdir:

$$E = 3N_A kT + 3N_A kT / 2 \quad (11.4)$$

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

$$E = 3N_A kT + 3N_A kT / 2 = \frac{9}{2} N_A kT = \frac{9}{2} RT \quad (11.5)$$

Bu ýerde  $C_V = \frac{9}{2} R = 37,6 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  ýagny

klassiki fizikanyň berýan ýylylyk sygymy 1,5 esse eksperimentiň berýaninden köpdür. Şonuň üçin erkin elektronlar ýylylyk sygymyna goşant goşmaýarlar.

## b) Eýnşteýniň ýylylyk sygymynyň nazaryýeti.

Dülonyň we Ptiniň kanuny diňe ýeterlik ýokary temperaturalarda ýerine ýetirilýär. Muny 38 - nji çyzgydan görüp bolar.

Şu çyzgydan görüsimiz ýaly, aşaky temperaturalarda ýylylyk sygymy hemişelik däl-de, temperaturanyň artmagy bilen noldan tä Dulongyň we Ptiniň kanuny boýunça kesgitlenýän bahasyna çenli artýar. Bu fakty düşündirmek üçin kwant statistikanyň düşüňjelerini 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:

$$\langle E \rangle = \frac{\hbar \omega}{e^{\hbar \omega / kT} - 1} \quad (11.6)$$

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

Şu soraga jogap bermek üçin elektronlaryň tolkun häsiýetlerini göz önüne tutmaly.

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

Atomlarda elektronlaryň ömri oýatma ýagdaýynda  $\tau \sim 10^{-8}$ s deňdir.

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

#### b) Gaty jisimleriň geçirijiliginiň zona 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.

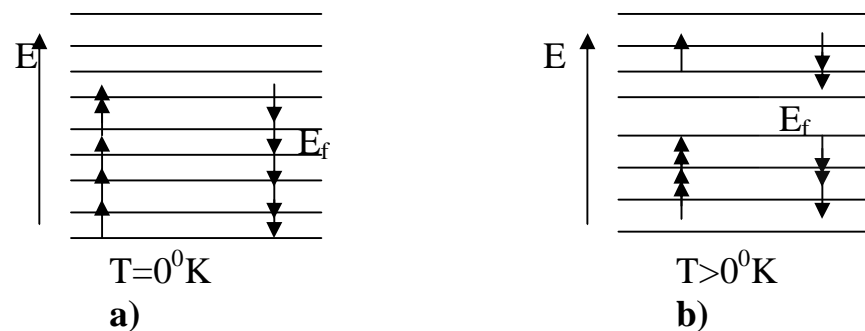
Zonalaryň elektronlar bilen doldurylmagynyň dürli wariantlaryna seredeliň.

1. Iň sonky zona elektronlar bilen bölekleyin dolan diýip çaklalyň. Şu zona walent elektronlary bilen dolýanlygy sebäbli, oňa walent zona diýilýär. Daşky elektrik meýdanyň täsiri astynda elektronlar tizlenip, şol zonanyň ýokarky boş derejelerine geçýärler. Kristalldan tok akyp başlar. Şeýlelikde, bölekleyin dolan walent zonasy bolan kristallar elektrik togyny gowy geçirýärler, ýagny metalldyrlar.

0 K-inde elektronlar iki-ikiden energetik basgançygynda ýerleşýärler (aşakydan tä iň ýokarka çenli) (40a çyzgy).

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

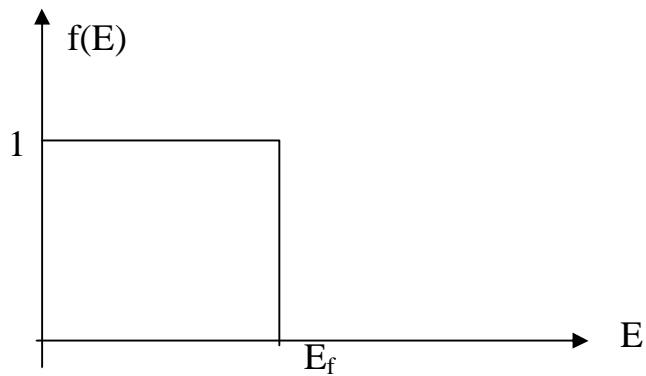
Doldurulan derejeleri doldurulmadyk derejelerinden bolýan derejä Fermiň derejesi diýilýär (ýa-da Fermiň energiýasy) we ol  $E_f$  harp bilen belleneýär.



40- ngy çyzgy

Temperaturanyň 0<sup>0</sup>k ýokary artyrylmagy diňe Fermiň derejesiniň golaýyndaky ýerleşen elektronlara täsir edýär. Olar oýanyp, goňşy, ýokarda ýerleşen doldurulmadyk derejelere geçýärler. (40 b- çyzgy) 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.

Elektronlaryň energiýa boýunça paýlanylyşy  $0^0$  K ýokary temperaturada 41 - nji çyzgyda görkezilipdir.



#### 40 ç - çyzgy

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:

$$f = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_f}{K_B T}\right) + 1} \quad (12.9)$$

(12.9) aňlatmadan gorüşimiz ýaly  $T=0$  temperaturada  $f=1$  eger  $E \leq E_f$  we  $f=0$ , eger  $E > E_f$ .

Örän ýokary temperaturada ( $k_B T \gg E_f$ ) we uly energiýalarda ( $\exp\left(\frac{E - E_f}{K_B T}\right) \gg 1$ ) Fermi-Dirakyň paýlanylyşy

tormozlanýarlar we tok emele getirýän bölejikleriň tertipleşdirilen hereketi togtaýar.

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

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

$$\sigma = \sigma_0 \exp[-\Delta E/kT], \quad (14.1)$$

ýagny  $\sigma$  temperaturanyň artmagy bilen eksponensial kanuna laýyk artýar.

Metallarda bolsa udel elektrik geçirijilik temperaturanyň artmagy bilen azalýar:

$$\sigma = \frac{T_0}{\sigma_{01}} \frac{1}{T} \quad (14.2)$$

(14.1) we (14.2) aňlatmalarda  $\sigma_0$ ,  $\sigma_{01}$  we  $T_0$  – konstantalar.

Metallarda elektronlaryň hereketiniň kanagatlandyrylan mukdar nazaryýetini klassiki mehanikanyň kanunlary esasynda gurmak mümkin däl. Ony aşakdaky mysaldan has aýdyn group bolar.

Eger metalda elektronlaryň ýylylyk hereketiniň orta kinetik energiýasy otag temperaturada eksperimental ýol bilen kesgittense we bu energiýa degişli temperatura  $\frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2} kT$  formuladan tapylsa, onda  $10^5$ - $10^6$  K tertipdäki temperaturany alarys. Munuň ýaly temperatura ýyldyzlaryň içinde bolýar.

Indi sorag ýüze çykýar.

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

alýumin. Arassa metallaryň udel garşylyklary aşakdaky jedwelde görkezilipdir.

Metallarda erkin zarädlary äkidijiler elektronlardyr. Olaryň konsensatriýasy ýokarydyr –  $10^{28} \text{ m}^{-3}$  tertibindedir. Bu elektronlar tertipsiz ýylylyk hereketine gatnaşýarlar. Elektrik meýdanynyň täsiri astynda olar  $10^{-4} \text{ m/s}$  tertipdäki orta tizlik bilen orunlaryny tertipli üýtgemäge başlaýarlar.

Jedwel №1

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

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

Bu tejribeleriň shemasy şeýledir. Tegege sim saraýarlar; onuň uçlaryny biri-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

$$f = \ell^{\frac{E_f}{K_B T}} \ell^{-\frac{E}{K_B T}} = A \ell^{-\frac{E}{K_B T}} \quad (12.10)$$

Şu ýagdaýda elektronlar özlerini adaty klassiki bölejik ýaly alyp barýarlar.

Şeýlelikde  $\exp\left(\frac{E - E_f}{K_B T}\right) \gg 1$  şertde elektron gazyň

dörejiligi doly aýrylýar. Derejiligiň aýrylmasy

$$T_F = \frac{E_f}{K_B} = 5 \cdot 10^4 \text{ K} \text{ temperaturada bolup geçýär. Munuň}$$

ýaly temperaturalarda metallaryň hemmesi ereýär.

Şeýlelikde, elektron gazy dörejilik ýagdaýyny tä eremek temperatura çenli saklaýar we onuň paýlanylyşy  $0^0 \text{ K}$  temperaturadaky Fermi-Diragyň paýlanylyşyndan örän az tapawutlanýar.

Ýylylyk oýatmasyna Ferminiň derejesiniň golaýynda ýerleşen elektronlaryň örän kiçi bölegi eýe bolýar. Otak temperaturasynda şu bölek geçiriji elektronlaryň umumy sanynyna görä 1%-den hem 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

$$\Delta E \approx kT \Delta N = NkT \frac{kT}{2E_f} \quad (12.11)$$

Bu ýerde  $\Delta T$  – termiki oýatmada synagdan geçýän elektronlaryň sany.

$N$  – Awogadronyň sany.

$Nk = R$  – uniwersal gaz hemişeligi.

Şonuň üçin:

$$\Delta E = RT \frac{kT}{2E_f} \quad (12.12)$$

Hemişelik göwrümdäki elektron gazyň ýylylyk sygymy deňdir

$$C_v = \frac{d(\Delta E)}{dT} = R \frac{kT}{E_f} \quad (12.13)$$

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

$$C_{v_{klas.}} = \frac{3}{2} R \quad (12.14)$$

(12.13) (12.14) paýlap, alarys:

$$\frac{C_v}{C_{v_{klas.}}} = \frac{2}{3} \frac{kT}{E_f} \quad (12.15)$$

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

$0,01 C_{v_{klas.}}$

Bu bolsa tejribe bilen ylalyşýar we gaty jisimleriniň ýylylyk sygymynyň klassiki nazaryýetinde bolan düşündirişin kynçylygyny aýyrýar.

### **§13. Gaty jisimleriniň ýylylyk giňelmegi we geçirijiligi. Gaty jisimlerdeki diffuziýa.**

#### **a) Gaty jisimleriniň ýylylyk giňelmegi.**

Geliň ýene-de belli bir aralyklarda özara täsir edişýän iki bölejikleriň energiýa bagly bolan egrisine seredeliň.

## **V BAP**

### **GATY JISIMLERIŇ ELEKTRIK HÄSIÝETLERI**

#### **§14. Gaty jisimleriniň elektrik geçirijiligi boýunça klassifikasiýasy. Metallar, dielektrikler, ýarymgeçirijiler. Gaty jisimleriniň geçirijiliginiň zona nazaryýeti.**

##### **a) Gaty jisimleriniň elektrik geçirijiligi boýunça klassifikasiýasy.**

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

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

Metallardan we dielektriklerden başga, geçirijiligi metallar bilen dielektrikleriň arasyndaky aralyk ýagdaýy eýeleýän maddalar topary hem bar. Olara ýarymgeçirijiler diýip atlandyrylýar.

Arassa metallaryň arasynda elektrigi iň gowy kümüş geçirýär, ikinji ýerde mis, üçünji – altyn, dördünji –



2. Ýeterlik energiýa eýe bolan atom (ýa-da ion) öz tertipli ýagdaýyndan gözenegiň düwün aralygyna geçip bilýär. Bu prosesse Frenkel bagly atomlaryň dissosiýasy diýen ady berdi.
3. Dissosirlenen atom potensial barýerden geçip, başga erkin ýagdaýa geçmeklikden öň, şol wagtyň dowamynda özüniň täze ýagdaýynyň golaýynda yrgyldar.
4. Jonyň täze deňagramlyk ýagdaýdan ondan “ $\delta$ ” 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:

$$P_m \approx v_0 \exp[-E_m/K_B T] \quad (13.14)$$

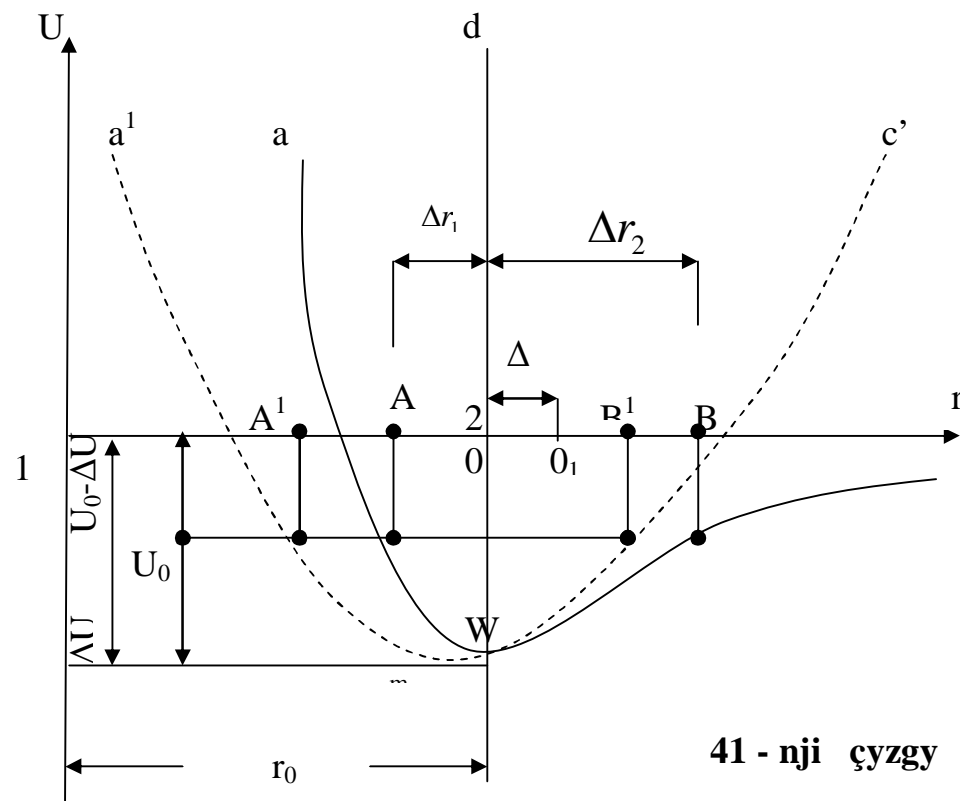
Bu ýerde  $E_m$  – potensial barýeriň beýikligi.

$v_0 \sim 10^{13} \text{ s}^{-1}$  – atomyň yrgyldymasynyň hususy ýygylgy.

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

Özara täsir edişýän bölejikler minimum  $U_0$  energiýa (abc potensial çukuryň dübünde) eýe bolýar, haçanda olar absolut nolda  $r_0$  aralykda ýerleşen bolsa, bu aralyk 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 yrgyldyýan bolsun. Yrgyldyýan bölejik “O” deňagramlyk ýagdaýyny geçýän pursatda uly bahaly bolan  $W_k$  kinetik energiýa eýedir (41 a - çyzgy).



Goý  $W_k$  energiýa potensial çukurdan ýokarda goýulan bolsun. 2 bölejik deňagramlyk ýagdaýdan çepe hereket edende kinetik energiýa ony 1 bölejigi iteklemek üçin harçlanýar we bölejikleriň özara täsiriniň potensial energiýasyna öwürlýär. Bölejigiň çepe gyşarmaklygy, onuň kinetik energiýasynyň azalmagyna getirýär. Bu prosess potensial energiýa eýe bolýança dowam edýär. Potensial energiýa  $\Delta U = W_k$  ýokarlanýar we  $-(U_0 - \Delta U)$  deň bolýar, 2 bölejik bolsa çepe  $\Delta r_1$  aralyga gutarnykly süýşýär. Bölejik  $\Delta r$  aralyga deňagramlyk ýagdaýyndan saga hereket etmegi bilen kinetik energiýa 1 bölejige goýulan dartys güýjini ýeňip geçmekligine harçlanýar. Şeýlelikde bölejikleriň özara täsirinde kinetik energiýa potensial energiýa geçýär. “B” nokatda, deňagramlyk ýagdaýdan  $\Delta r_2$  aralykda ýerleşen bölejigiň kinetik energiýasy potensial energiýa geçýär. Netijede potensial energiýa  $\Delta U = W_k$  ýokarlarynýar we  $-(U_0 - \Delta U)$  deň bolýar.

Eger-de, bu şert ýerine ýetmese, onda gyşarma  $\Delta r$  ululygyna proporsional we deňagramlyk ýagdaýyna urukdyrylan bolardy:

$$F = -c\Delta r \quad (13.1)$$

Bu ýerde  $c$  – proporsional koefisiýenti.

Bölejigiň  $\Delta U$  potensial energiýanyň üýtgeýşini  $a \cdot b \cdot c$  parabola görnüşinde beýan edilerdi, onuň deňlemesi şeýledir:

$$\Delta U = \frac{1}{2} c \Delta r^2 \quad (13.2)$$

Bu parabola ordinat okuna  $\parallel$  bolan we  $r_0$  aralykda ýerleşen bd göni çyzyga simmetrikdir. Bu sebäpden  $\Delta r_1$  we  $\Delta r_1$  gyşarmalaryň ölçegleri deň bolar we olaryň bat

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

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

### ç) Gaty jisimlerdeki diffuziýa.

Gaty gisimlerdeki 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 kinetic energiýasy ýeterlik uly bolýan birnäçe atomlar duş gelýar. Şeýle atomlar özleriniň deňagramlyk ýagdaýyny ýitirip, ony gurşap alýan atomlaryň emele getiren potensial barýerini ýeňip geçip, täze erkin deňagramlyk ýagdaýa geçýärler. Şunlukda atom özüniň artykmaç energiýasyny ýitirýär. Bu energiýa kristalik gözenekde ýerleşen atomlara berilýär. Bir näçe wagtdan soň atom ýene-de ýeterlik derejedäki energiýa eýe bolýar we ony gurşap alýan täze töwereklige geçýär. Atomlaryň munuň ýaly ýylylyk hereketiniň täsiri astynda orny üýtgemeklik gaty jisimlerdeki diffuziýa prosessiniň esasy bolup durýar.

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

1. Tertipli ýagdaýda goýulan deňagramlygyň golaýynda atomyň yrgyldylary.

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:

$$K = K_{\text{fon.}} + K_{\text{el.}} \quad (13.11)$$

Ýöne metallarda ýylylyk geçirijiligiň esasy mehanizmi elektron ýylylyk geçirijiligidir.

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

Otag temperaturada izolýatorda fononyň erkin ylgawynyň uzynlygy

$$\langle \lambda_f \rangle = 3 \cdot 10^{-6} \text{sm},$$

sesiň tizligi  $\langle v_{\text{ses.}} \rangle = 10^5 \text{sm/s}$ , ýylylyk sygymy  $C_v = 3R$ , onda

$$K_{\text{fon.}} = \frac{1}{3} C_v \langle v_{\text{ses.}} \rangle \langle \lambda_f \rangle = \frac{1}{3} 3R \cdot 10^5 \cdot 3 \cdot 10^{-6} = 0,3R \quad (13.12)$$

Metalda ýylylyk esasan elektronlaryň hasabyna geçirilýär diýsek, onda

$$K_{\text{el.}} = \frac{1}{3} C_v \vartheta_F \langle \lambda_{\text{el.}} \rangle \quad (13.13)$$

Bu ýerde  $\langle \lambda_{\text{el.}} \rangle$  - elektronlaryň ortaky erkin ylgaw uzynlygy  $10^{-5} \text{sm}$  deň.

$v_F$  – ýylylyk hereketiň tizligi. Ol Fermi energiýasyna baglydyr we deňdir  $10^8 \text{sm/s}$ .

$C_v$  – elektron gazyň ýylylyksygymy.

Onda

alma  $A'B'$  merkezi “O” deňagramlyk ýagdaýy bilen gabat geler. Jisimiň gyzdrylmany bilen onuň giňelmegini ýüze çykmaýar, ýagny temperaturanyň artmagy bilen diňe yrgyldaýan bölejigiň amplitudasy ýokarlanýar, olaryň ortaky aralyklary bolsa üýtgemän galýar.

Hakykatda bolsa, energiýanyň abc potensial egrisi bd göni çyzyga 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 (13.2) deňlemesine bu assimetriýany kesgitleýän goşmaça  $-\frac{1}{3} g \Delta r^3$  agzany girizmek hökmanydyr. (g – proporsional koefisiýenti).

Onda (13.2) deňlemäni şeýle ýazyp bolar:

$$\Delta U = \frac{1}{2} c \Delta r^2 - \frac{1}{3} g \Delta r^3 \quad (13.3)$$

2 bölejik saga gyşarmaklygynda ( $\Delta r > 0$ )  $\frac{1}{3} g \Delta r^3$  çlen

$\frac{1}{2} c \Delta r^2$  agzadan hasaplanylýar we bc şahasy bc` şaha görä gorizonta ugra golaý gidýär, çepde gyşarmaklygy

bolsa ( $\Delta r < 0$ )  $\frac{1}{3} g \Delta r^3$  çlen  $\frac{1}{2} c \Delta r^2$  çlene goşulýar we ba şaha

ba` şahadan dik gidýär. Potensial energiýanyň simmetrik däl häsiýeti şeýle ýagdaýa getirýär, ýagny 2 bölejigiň çepde we saga edýän gyşarmasy deň bolmaýar: saga bölejik güýçli gyşarýar, çepde bolsa onuň ýaly däl. Netijede bu bölejigiň ortaky ýagdaýy ( $O_1$  nokatda) deňagramlyk O

ýagdaýy bilen gabat gelmeýär, ýagny ondan saga  $\Delta r = \frac{\Delta r_2 - \Delta r_1}{2}$  aralykda ýerleşer.

Bu bolsa bölejikleriň ortaky aralygynyň  $\Delta r$  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  $\Delta r$  ululygynyň artýandygyny görkezýär:

$$\Delta \bar{r} = \frac{g}{c^2} kT \quad (13.4)$$

( $k$  – Bolsmanyň hemişeligi)

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

$$\frac{\Delta \bar{r}}{r} = \frac{g}{c^2 r_0} kT = \alpha T \quad (13.5)$$

$\alpha = \frac{g^2}{c^2 r_0}$  bu proporsional koefisiýent jisimiň çyzykly

giňelmeginiň koefisiýentini aňladýar, onuň tertibi  $10^{-4} - 10^{-5}$ . Bu san tejribe bilen ylalaşýar.

### b) Gaty jisimleriniň ýylylyk geçirijiligi.

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

$$\bar{q} = -k \text{grad} T = -k \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_n \quad (13.6)$$

Bu ýerde  $q$  – ýylylyk akymynyň üst dykzlygy ol wektor ululykdyr,  $T$  – temperatura,  $\frac{\partial T}{\partial n}$  –

izotermiki üst üçin normal boýunça temperaturanyň gradiýenti,  $K$  – ýylylyk geçirijilik.

(13.6) 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:

$$q_i = K_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad (13.7)$$

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

$$K_{ij} = \begin{vmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{vmatrix}; \quad K_{ij} = K_{ji} \quad (13.8)$$

Eger (13.8) tenzory  $(x, y, z)$  baş oklara getirsek, onda ol şeýle görnüşi alar:

$$K_{ij} = \begin{vmatrix} K_1 & 0 & 0 \\ 0 & K_2 & 0 \\ 0 & 0 & K_3 \end{vmatrix} \quad (13.9)$$

Onda (13.7) deňleme şeýle ýönekeý forma eýe bolar:

$$q_1 = -K_1 \frac{\partial T}{\partial x}; \quad q_2 = -K_2 \frac{\partial T}{\partial y}; \quad q_3 = -K_3 \frac{\partial T}{\partial z} \quad (13.10)$$

IS ulgamynda ýylylyk geçirijilik  $Wt/M \cdot K$  ölçege eýedir.

$$M = iS = -\frac{\ell\omega_0}{2\pi} S \quad (16.5)$$

Bu ýerde  $i$  – konturdaky tok.

$S$  – orbitanyň meýdany.

Magnit meýdanynda burç tizligi  $\Delta\omega$  çenli üýtgeýär we

$$\text{diamagnet momenti ýüze çykyär:} \quad \Delta M = -\frac{\ell S}{2\pi} \Delta\omega$$

(16.6)

Eger biz  $\Delta\omega$ -ny 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 (47a çyzgy).

Onda elektrona  $r_0$  radius boýunça gönükdirilen  $F_\ell = \ell\vartheta_0 B$  goşmaça Lorensiň güýji täsir edip başlaýär (bu ýerde  $v_0$  – elektronyň hereketiniň çyzykly tizligi). Netijeli merkeze ymtylýän güýç  $F_0 + F_\ell$  jemine deň bolmaly:

$$F = m\omega_1^2 r = F_0 + F_\ell = m\omega_0^2 r + \ell\vartheta_0 B \quad (16.7)$$

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  $\omega_1$  burç tizligi  $\omega_0$ -dan kän tapawutlanmaly däl.

Şeýlelikde

$$mr(\omega_1 - \omega_0)(\omega_1 + \omega_0) \approx mr \cdot \Delta\omega \cdot 2\omega_0 = \ell v_0 B = \ell\omega_0 r B$$

Bu ýerden

Natriýniň atomyny mysal getirip bilýäs. Natriýniň her bir atomy 11 elektrondan ybaratdyr. Energetik ýagdaýlara görä olaryň paýlanylyşy:  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$ .

Atomlar kristalla birleşende olaryň energetik derejeleri zonalara öwrülýärler. Atomyň içki gatlaklaryndaky elektronlar  $1s$ ,  $2s$  we  $2p$  derejelerden emele gelen zonalary doldurýarlar, sebäbi  $2N$ ,  $2N$  we  $6N$  ýagdaýlara deňşilikde  $2N$ ,  $2N$  we  $6N$  elektronlar düşýär. Walent zona  $3s$  ýagdaýlardan ybarat. Olara  $N$  elektronlar düşýär (her atoma bir walent elektron). Şeýlelikde natriýniň walent zonasyny diňe ýarysy dolan. Şuňa meňzeş ýaly zonalar başga aşgar metallarda-da bolýar.

2. Indi walent zonasy elektronlar bilen doly doldyrylan we indiki rugsat edilen boş zona bilen üsti örtülýär diýip çaklalyň. Eger munuň ýaly kristala daşky elektrik meýdany göýulsa, onda elektronlar erkin zonalaryň derejelerine geçýärler we tok emele gelyär. Munuň 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.

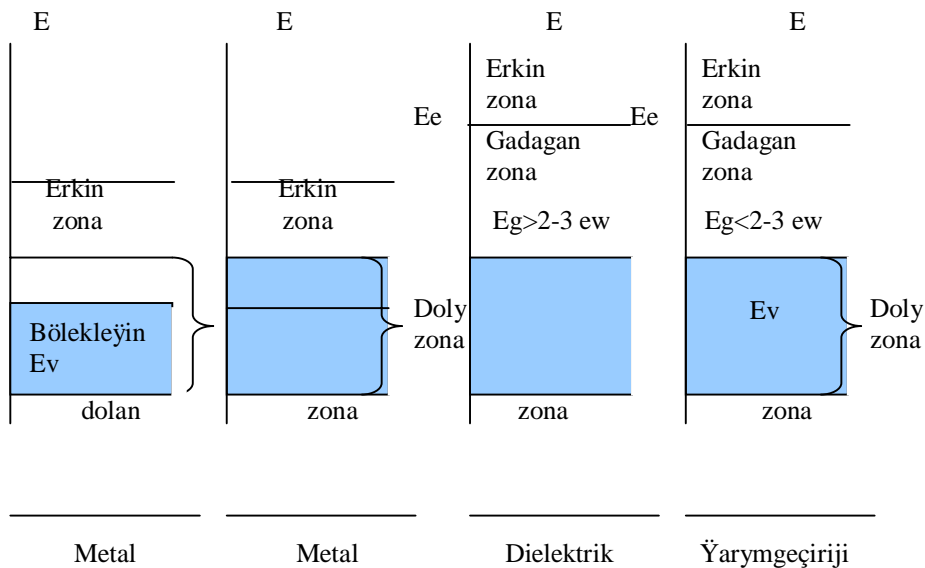
3. Goý indi walent zonasy elektronlar bilen bütinleý doldurulan we indiki boş zonadan ini 2-3 ew bolan gadagan zonadan aýrylan. Munuň ýaly zona gurluşly kristalda daşky elektrik meýdany elektrik togyny döredip bilmeýär, çünki doly zonadaky elektronlar öz energiýasyny üýtgedip bilmeýär. Mysal üçin, şonuň ýaly ýagdaý  $\text{NaCl}$  kristallynda bolýar. Natriýniň položitel zarýadlanan ionlarynyň konfigurasiýasy  $\text{Na}^+ (1s^2 2s^2 2p^6)$ , otrisatel zarýadlanan hloryň  $\text{Cl}^- (1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6)$ .

İn soňky doly zona 3p Cl<sup>-</sup>, boş zona 3s Na<sup>+</sup>. Energetiki deşik deňdir 9 eW.

Eger gadagan zonanyň ini 2-3 eW-dan az bolsa, onda kristala ýarymgeçiriji diýilýär. Ýarymgeçirijilerde kT ýylylyk energiýanyň hasabyna elektronlaryň görnüp duran sany erkin zona geçýär. Bu 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 42-nji çyzgyda shemalaýyn görkezilipdir.



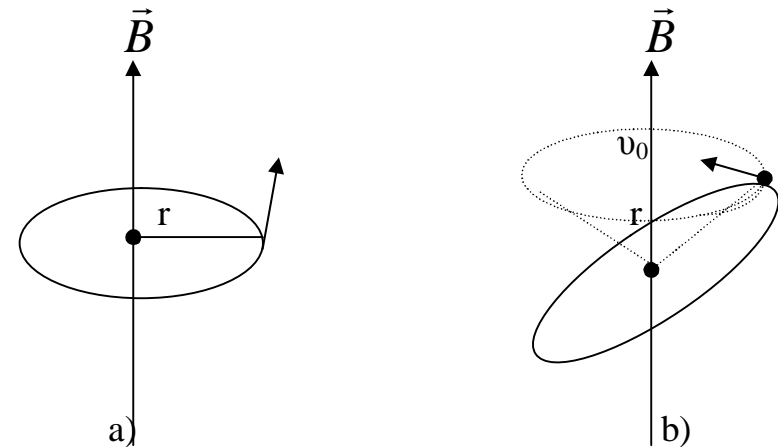
42- nji çyzgy

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

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

Bu bolsa goşmaça magnit momentiniň döremegine getirýär. Şol momentniň 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 (47a çyzgy).



47- nji çyzgy

$\omega_0$  bilen elektronyň hereketiniň burç tizligini belgiläliň. Orbital magnit momenti (“i” burumly toga meňzeş) deňdir:

2-nji jedwel

Diamag-netikler	$\chi$	Paramag-netikler	$\chi$	Ferro-magnetikler	$\chi$
Cu	$-0,9 \cdot 10^{-5}$	Pt	$26 \cdot 10^{-5}$	Fe	1000
Bi	$-18 \cdot 10^{-5}$	O <sub>2</sub>	$360 \cdot 10^{-5}$	Ni	240
Almaz (C)	$-2 \cdot 10^{-5}$	Fl <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$140 \cdot 10^{-5}$	Co	150
Ge	$-0,8 \cdot 10^{-5}$	FeCl <sub>2</sub>	$360 \cdot 10^{-5}$	Permaloý (78% Ni, 21% Fe)	8000
Si	$-0,3 \cdot 10^{-5}$	CoO	$580 \cdot 10^{-5}$		
Se	$-1,7 \cdot 10^{-5}$	NiSO <sub>4</sub>	$120 \cdot 10^{-5}$	Supermaloý (79% Ni, 15% Fe, 5% Cr)	72000
He	$-1,9 \cdot 10^{-6}$	Li	$25 \cdot 10^{-6}$		

**b) Dia- we paramagnetikleriň tebigaty.  
Gaty jisimleriň diamagnit we paramagnit häsiýetleri.**

Diamagnetizmiň fiziki tebigatyny atomyň klassiki modeliniň esasynda düşündirip bolýär. Bu modele laýyklykda elektronlar ýadronyň töwereginde ýapyk orbitalar boýunça hereket edýärler.

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

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

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

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

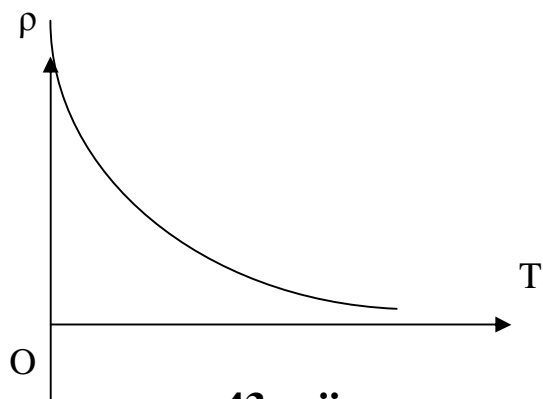
**§15. Ýarym geçirijileriň hususy geçirijiligi.  
Garyndy ýarym geçirijileriň geçirijiligi.  
Metallaryň elektrik geçirijiliginiň temperatura baglylygy. Aşageçirijilik.**

**a) 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 PbS, JnSb, GaAs, CdS birleşmeleri we başgalyry degişlidirler.

Elektrik geçirijiliginiň temperatura baglylygyna bolan häsiýeti boýunça ýarymgeçirijiler has aýdyň tapawutlanýarlar. Olaryň udel garşylygyň metallaryňky ýaly temperaturanyň ýokarlanmagy bilen artman, eýsem tersine, birden kemelýändigini ölçegler görkezýär (43- nji çyzgy).



43- nji çyzgy

Absolýut nola ýakyn temperaturalarda ýarymgeçirijileriň udel garşylygynyň örän ýokarydygy 43-nji çyzgyda şekillendirilen grafikden görüp bolar.

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

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

Ýarymgeçirijilerde erkin elektronlaryň bolmalysy bilen şertli olaryň geçirijiligine **elektron geçirijilik** diýýärler. Temperatura ýokarlarda üzülen baglanyşyklaryň sany, diýmek, erkin elektronlaryň sany hem köpeliýär. 300-den 700 K çenli gyzdyrylanda zarýady erkin göçürjileriň

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

$$\chi = \frac{I}{B} = \frac{I}{\mu_0 H} \quad (16.3)$$

Bu ýerden

$$I = \chi B = \chi \mu_0 H \quad (16.4)$$

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

Diamagnetik jisimlerde  $\chi$  uly däl, onuň alamaty otrisateldir we daşky magnit meýdanyna we temperatura bagly däl. Diamagnetikler daşky meýdanyň ugryna garşy magnitlenýärler, şonuň üçin olar güýjenmesi uly bolan oblastlaryndan özülerini itip çykarýarlar.

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

Ferromagnetik jisimleriň magnit kabul edijiligi položitelidir, ýöne paramagnetiklere görä olaryň san bahasy örän ýokarydyr. Mundan başga-da  $\chi$  daşky magnit meýdanynyň güýjenmesine baglydyr. Munuň ýaly jisimlerde magnitlenme daşky magnit meýdanyny aýyranymyzda nola deň bolanok.

Ikinji jedwelde käbir diamagnetik, paramagnetik we ferromagnetik jisimleri we olaryň magnit kabul edijiligi getirilipdir.



## VI BAP

### GATY JISIMLERİN MAGNİT HÄSİYETLERİ

#### §16. Magnetiklerin klassifikasiyası. Dia - we paramagnetiklerin tebigaty. Gaty jisimlerin diamagnet we paramagnet häsiyetleri.

##### a) Magnetiklerin klassifikasiyası.

Eger güýjemesi  $H$  we induksiýasy  $B = \mu_0 H$  birhilli magnet meýdanyna göwrümi  $V$  bolan izotrop jisimini ýerleşdirsek, onda meýdanyň täsiri astynda jisim “ $M$ ” magnet momentine eýe bolýar ýa-da magnetlenýär.

Magnet momentini jisimiň göwrümüne bolan gatnaşygyna **magnetlenme** diýýärler:

$$I = \frac{M}{V} \quad (16.1)$$

Jisimi deňölçegsiz däl magnetlendiremizde

$$I = \frac{dM}{dV} \quad (16.2)$$

Magnetlenme wektor ululygydyr. Birhilli magnetiklerde magnet meýdanyň  $\vec{I}$  güýjenmesine ( $\vec{H}$ ) ýa-da paralleldir, ýa-da antiparalleldir. IS ulgamynda  $M$ -iň ölçege birliki  $\omega \cdot s \cdot m = \text{wb} \cdot m$ , göwrümiň  $m^3$ , magnetlenmäniň  $\frac{\omega \cdot S}{m^2} = \frac{\omega b}{m^2}$ ;

sany  $10^{17}$ -den  $10^{24} \text{ l/m}^3$  çenli köpeliýär. Bu bolsa garşylygyň kemlemegine getirýär.

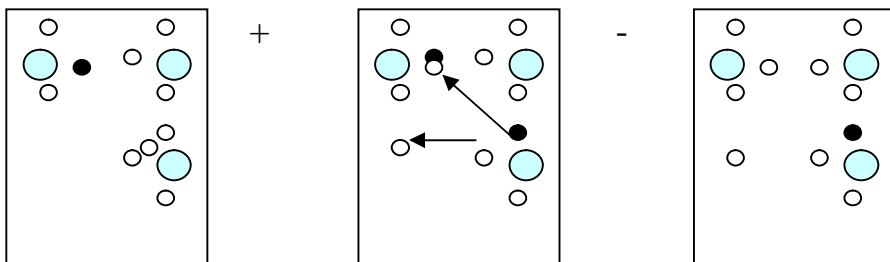
Baglanyşyk üzülende elektron ýetmeýän boş orun emele gelýär. Oňa **deşijek** diýýärler. Deşijekde beýleki kadaly baglanyşyklara garanda, artykmaç položitel zarýad bardyr.

Kristalda deşijiniň ýagdaýy üýtgeýändir. Aşakdaky prosess üznüksiz suratda bolup geçýär. Elektronlaryň baglanyşygyny üpjün edýän elektronlaryň biri deşijiniň emele gelýän ýerine böküp geçýär we şol ýerde jübüt elektron baglanyşygyny dikeldýär, elektronyň böküp gaýdan ýerinde bolsa täze deşijek emele gelýär. Şeýlelikde, deşijek tutuş kristal boýunça ornuny çalşyryp biler.

Eger elektrik meýdanynyň güýjenmesi nola deň bolsa, onda položitel zarädlaryň orun çalşyrmasyna deň bahaly bolan deşijekleriň orun çalşyrmasy tertipsiz görnüşde bolup geçýär, şona görä-de elektrik toguny döretmeýär. Elektrik meýdanynyň täsiri astynda deşijekleriň tertipleşen orun çalşyrmasy emele gelýär we şeýlelikde, erkin elektronlaryň elektrik togunyň üstüne deşijekleriň orun çalşyrmasy bilen baglanyşykly bolan elektrik togy goşulýar. Deşijekleriň hereket edýän ugry elektronlaryň hereket edýän ugryna garşylyklydyr. Elektron we deşijekli geçirijiligiň mehanizmi 44- nji çyzgyda düşündirilýär.

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

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



#### 44- nji çyzgy

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

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

$$j = neV_{orta} = \frac{ne^2\tau}{m^*} E \quad (15.1)$$

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

$m^*$  – elektronyň effektiv massasy.

$\tau$  – relaksasiýa wagty.

Onda udel elektrik geçiriji üçin alarys:

$$\sigma = ne^2\tau / m^* \quad (15.2)$$

Köplenç we  $\sigma$  ululyklary başga görnüşde ýazýarlar. Birlik güýjenmeli elektrik meýdanynda elektronlaryň ugurdaş hereket etmegine deň bolan ululyk girizeliň:

akademik N. N. Bogoyubow tarapyndan berildi. (BKŞ - nazaryýeti).

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

nola çenli peselýändigini ýüze çykardy (46- ný çyzgy). Ol hadysa aşageçirijilik diýip at berlipdir. Soňra ýene-de köp aşageçirijiler açylypdyr.

Aşageçirijilik jisimleriniň köpüsinde örän pes temperaturada bolup geçirijide tok döredilse, soňra bolsa elektrik togynyň çeşmesi aýrylsa, onda şol togyň güýji islendikçe uzak wagtlaý üýtgemeyär. Adatdaky aşageçiriji däl geçirijide elektrik togy bu halatda kesilýär.

Aşageçirijiler praktikada giňden ulanylýar. Meselem, aşageçirijili sargyly kuwwatly elektromagnitleri gurýarlar, 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 öwürýän magnitogidrodinamiki generatorlarda peýdalanýarlar.

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

Aşageçirijiligi düşündirmek diňe kwant nazaryýetiniň esasynda mümkindir. Ol diňe 1957-nji ýylda amerikan alymlary J. Bardin, L. Kuper, J. Şriffer we sowet fizigi

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

Bu ululyga **elektronlaryň hereketliligi** diýilýär. (15.1) we (15.2) aňlatmalary göz önüne tutsak, alarys:

$$j = ne\mu_n E \quad (15.3)$$

$$\sigma = ne^2\mu_n \quad (15.4)$$

Bu ýerde 
$$\mu_n = \frac{\ell\tau}{m^*} \quad (15.5)$$

Edil munuň ýaly aňlatmalary deşijikli düzmeler üçin ýazyp bolar.

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

$$\sigma = ne\mu_n + pe\mu_p \quad (15.6)$$

Bu ýerde  $\mu_p$  – deşjikleriň ugurdaş hereket etmegi (hereketliligi).

n we p – zarýady göçürijileriň sany.

## b) Garyndy ýarym geçirijileriň geçirijiligi.

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

Ýarymgeçirijileriň düýpli aýratynlygy olarda hususy geçirijilik bilen bir hatarda goşmaça – **garyndyly geçirijilik** döreýändiginden ybaratdyr. Garyndynyň konsentrasiýasyny üýtgedip, şol ýa-da beýleki alamatly zarýad äkidijileriň sanyny ep-esli üýtgetmek bolar.

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

Garyndylaryň bar wagtynda meselem, myşşagyň atomlary, hatda olaryň örän az könsentrasiýasynda hem erkin elektronlaryň sany köp esse artýan eken. Ol aşakdaky sebäbe görä bolýar. Myşşagyň atomlarynyň baş sany walentli atomlar bilen, meselem kremniniň atomlary bilen kowalent baglanyşygy döretmäge gatnaşýar. Başynji walentli elektron atom bilen gowşak baglanyşykda bolýar. Ol myşşagyň atomlaryny aňsatlyk bilen taşlaýar we erkin bolýar. Myşşak atomlarynyň on milliondan bir üleşini goşulanda erkin elektronlaryň konsentrasiýasy  $10^{16} \text{sm}^{-3}$  deň bolýar. Bu bolsa arassa ýarymgeçirijileriň erkin elektronlarynyň konsentrasiýasyndan mün esse köpdür.

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

Donor garyndyly ýarymgeçirijileriň elektronlarynyň sanynyň (deşikleriň sany bilen deňeşirilende) köpdüğine 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 goňsulary bilen kadaly jübüt elektron baglanyşyklaryny emele getirmek üçin indiýniň atomyna bir elektron ýetmeýär.

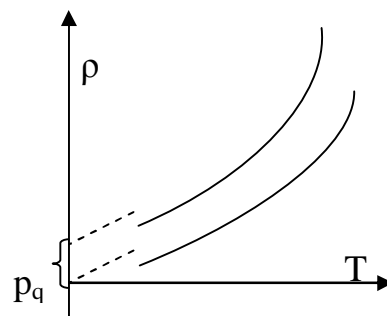
Netijede deşikler emele gelýär. Kristaldaky deşikleriň sany garyndynyň atomlarynyň sanyna deňdir. Munuň ýaly garyndylara **akseptor** (kabul ediji) **garyndylar** diýýärler.

Elektrik meýdany bolsa deşikler meýdan boýunça orunlaryny çalşyýarlar we deşikli geçirijilik döreýär. Deşikleri geçirijiligi elektronly geçirijilikden agdyklyk edýän ýarymgeçirijilere **p – tipli** (positiv – položitel diýen sözden) **ýarymgeçirijiler** diýýärler.

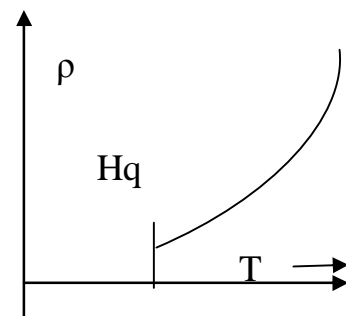
P – tipli ýarymgeçirijide zarädy esasy äkidijiler deşikdirler, esasy däl äkidijiler bolsa elektronlardyr.

### ç) Metallaryň elektrik geçirijiliginiň temperatura baglylygy. Aşageçirijilik.

Geçirijileriň garşylygy temperatura baglydyr. Metallaryň garşylygy temperaturanyň peselmegi bilen azalýar (45- nji çyzgy).



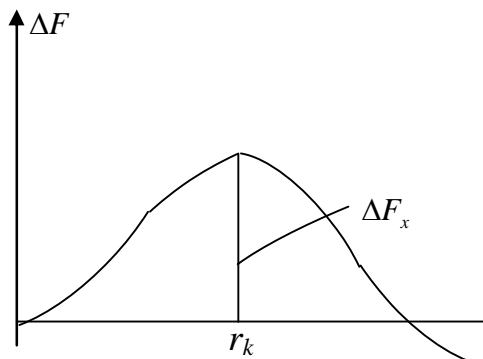
45- nji çyzgy



46- nji çyzgy

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

Bu egri



52 - nji çyzgy

$r_k$  – dan uly bolan kristalljagazlar ösüp başlarlar., sebäbi ösüş prosessi ergin energiýanyň azalmagynda amala aşyrylýar. Egriniň maksimumy (sur.19.2) düwünjigiň emele gelmeginiň işini kesgitleýär:

$$W = \Delta F_k = -\frac{4\pi\sigma}{3}r^2 + 4\pi\sigma r^2 = \frac{1}{3}\pi\sigma r^2 = \frac{1}{3}\sigma S \quad (19.2)$$

Bu iş düwünjigiň üst energiýasynyň 1/3 bölegine deň.

### ç) Diwarjyklaryň we garyndylaryň täsiri.

Täze fazanyň emele gelmeginiň işi olaryň gabyň diwarjyklarynda ýa-da garyndylaryň bölejikleriniň üstlerinde kemelýär. Geliň bugdan (faza I) emele gelen ABC sferiki suwuklygyň (faza II) döremegine seredeliň (53- nji çyzgy).

Diwarjykda düwünjigiň emele gelmeginiň işi deňdir.

$$r_k = \frac{2\sigma T_0}{q(T_0 - T)}$$

radiusda düwünjigiň kritiki ululygyny kesgitleýän maksimuma eýe bolýar.

$r_k$  – dan kiçi bolan ähli kristallaşma merkezleri durnukly däl, sebäbi olar ösende erkin energiýa ulalmaly.

$$\Delta\omega = \frac{\ell B}{2m} \quad (16.8)$$

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

(16.6) we (16.8) aňlatmalardan gelip çykýär:

$$\Delta M = -\frac{\ell^2 S}{4\pi m} B \quad (16.9)$$

Eger maddanyň birlik göwrümünde N atom bolsa, onda magnitlenme

$$I = N\Delta M_a = -\frac{Nz\ell^2 \langle r^2 \rangle B}{6m} \quad (16.10)$$

Bu ýerde  $\Delta M_a$  – köpelektronly atomyň magnit momenti.

$$\Delta M_a = \frac{\mu_0 I}{B} = -\frac{z\ell^2 \langle a^2 \rangle}{4m} B \quad (16.11)$$

(16.10) deňlemenden birlik göwrüm üçin diamagnit kabul edijiligiň aňlatmasyny alýas:

$$\chi_d = \frac{\mu_0 I}{B} = -\frac{N\mu_0 z^2 \ell^2 \langle r^2 \rangle}{6m} \quad (16.12)$$

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

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

$$\chi = \frac{C}{T} \quad (16.13)$$

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

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 nazaryýeti ilkinji P. Lanžewen tarapyndan döredildi. Birlik göwrümünde  $N$  sany atomlar bolan sreda seredeliň. Goý her bir atomyň magnit momenti  $\bar{M}$  deňdir, atomlaryň arasyndaky özara täsir ýok. Magnit meýdany bolmadyk ýagdaýynda bu momentler dürli taraplara gönükdirilen. Şonuň üçin jemleýji magnitlenme nola deňdir. Magnit meýdanynda magnit momentleri meýdanyň ugry boýunça gönükdirilýärler. Şonda meýdanyň ugry boýunça gönükdirilen magnitlenme döreýär.

Lanžeweniň nazaryýetine laýyklykda paramagnit kabul ediljiligi üçin aşakdaky aňlatma alynýar:

$$\chi_p = \frac{\mu_0 I}{B} = \frac{N \mu_0 M^2}{3 K_B T} \quad (16.14)$$

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

Küriniň hemişeligi:

we kristall.  $\Delta T = T - T_0$  ululyga sowadylanda ergin (faza I) durnukly faza II (kristall) görä metadurnukly bolýar. Öz-özünden kristallaşma prosessi başlamak üçin kristallik düwünjigiň (kristallaşma merkeziniň) döremegi zerurdyr. Bu prosessiň energetik balansy iki agzalaryň jemi bilen kesgitlenýär. Olaryň birinjisi  $q$  kristallaşma ýylylygynyň hasabyna düwünjigiň içki göwrüm energiýasynyň kemelýändigine deňdir, ikinjisi  $S$ -düwünjigiň üstüniň emele gelmeginiň işi bilen kesgitlenýär. Bu iş ulgamyň içki energiýasynyň hasabyna amala aşyrylýar. Ikinji agza iki fazanyň araçäginde  $\sigma$  üst energiýasyna proporsionaldyr. Düwünjigiň  $\vartheta$  göwrümi erginiň  $V$  göwrümüne görä kiçidir, bu bolsa düwünjigiň emele gelmegindäki ulgamyň göwrüminiň üýtgemegi nazara alynmagy mümkindir. Bu halatda kristallaşma prosessi izotermik we izohorik bolup durýar we ulgamyň deňagramlylygy erkin energiýanyň minimumy bilen kesgitlenýär.

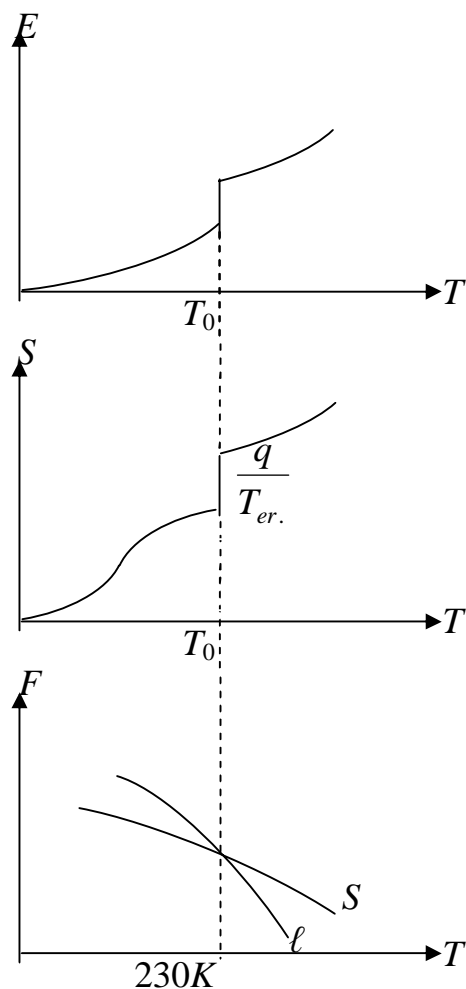
Düwünjik emele gelende erkin energiýanyň  $\Delta F$  üýtgemegi aşakdaka deň bolar:

$$\Delta F = (E_2 - E_1) - T(S_2 - S_1) + \sigma S = -q\vartheta - (T_0 - \Delta T) \left( -\frac{q}{T_0} \vartheta \right) + \sigma S.$$

Radiusy  $r$  bolan düwünjik üçin taparys:

$$\Delta F = -q\vartheta + q\vartheta + \Delta T \left( -q \frac{\vartheta}{T_0} \right) + \sigma S = -\frac{4}{3} \pi r^3 \left( q \frac{\Delta T}{T_0} \right) + 4\pi r^2 \sigma \quad (19.1)$$

(2.1) formuladan görnüşi ýaly kristall – ergin deňagramlylyk durnukly däl. Muny  $\Delta F(r)$  egriden (52 -nji çyzgy) aýdyň görüp bolar.



51 - nji çyzgy

**b) Kristallaşma düwünjigiň (merkeziniň) emele gelmeginiň termodinamikasy.**

Ergin – kristall faza geçiji geterogendir.  $T_0$  temperatura geçişinde deňagramlylykda iki faza bar: ergin

Çyzgydan görnüşi ýaly içki energiýa we entropiýa temperaturanyň artmagy bilen artýarlar.  $T_{er}$  eremek temperaturada bu ululyklar  $q$  eremek ýylylygyň şertiliginde böküşi synap görýärler. Böküş I-nji jynsly faza geçişiniň alamatydyr.  $S$  we  $\ell$  gaty we suwuk fazalaryň erkin energiýalarynyň egrileri temperaturanyň artmagy bilen peselýärler. Suwuk faza üçin peselmegiň tizligi gaty faza göre ýokary, sebäbi suwuk fazanyň entropiýasy bitertipsizligiň derejesiniň ulyrak bolany sebäpli ýokarydyr. Şu sebäpli egrileriň kesişýän nokadyndan aşakda  $S$  gaty faza durnuklydyr, ýokarda bolsa -  $\ell$  suwuk faza.

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

Paramagnetizme eýe bolan gaty jisimleriniň köpüsinde magnit kabul ediljiligiň temperatura baglanyşyklygy Küriniň kanuny bilen däl-de, Küri-Weýssiň kanuny bilen beýan edilýär:

$$\chi = \frac{C}{T - \theta} \quad (16.15)$$

Bu ýerde  $\theta$  – položitel ýa-da otrisatel temperatura (paramagnit Küri nokady).

**§17. Ferromagnetizm. Alyşma özara täsiri we onuň**

**ferromagnetizmiň döremegindäki roly. Antiferromagnetizm we ferrimagnetizm.**

**a) Ferromagnetizm. Alyşma özara täsiri we onuň**

**ferromagnetizmiň döremegindäki roly.**

Ferromagnetikler diýilýän (Fe, Co, Ni, selçenýäm elementleri we köp erginler) uly magnit syzyjylykly ( $\mu \gg 1$ ) 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** sözünüň ýanyna ýaly sözünüň

goşulmagy elektronyň öz häsiýetleri örän kiçijik şarjagaza meňzeş däldegi üçindir. Onuň hereketi Nyutonyň klassyk mehanikanyň kanunyna däl-de, kwant mehanikanyň kanunyna boýun egýär. Elektronyň hususy aýlanma momentine **spin** diýilýär.

Ähli ferromagnit jisimleriniň aýratynlygy olaryň atomlarynyň d we f gatlardaky kompensirlenmedik spin magnit momentlerinden ybaratdyr. Emma ferromagnetizm döremeginde kompensirlenmedik spin magnit momentleriniň 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 spinleriniň özara oriýentasiýasyna bagly bolan ýene-de goşmaça kwant afzasyndan ybaratdyr. Bu goşmaça energiýa **çalyş** energiýa diýip atlandyrylýar.

Ýonekeý ýagdaýda iki elektronlaryň özara täsirini aşakdaky görnüşde görkezip bolar:

$$E_{calys} = -A(\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{\sigma}_2) \quad (17.1)$$

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

$\vec{\sigma}_1$  we  $\vec{\sigma}_2$  - spinleriniň birlik wektorlary.

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

doýan suwuk erginleriniň kristallaşmasy, gaty haldaky polimorf we faza öwürülmeleri. Ýene-de iki dürli erginleriniň himiki usul bilen fazanyň bölünip çykýandygyny hem ýatlamak bolar.

$$\alpha + \beta \rightarrow \gamma \quad (18.1)$$

## §19. KRISTALLAŞMA

### 1. Birinji jynsly faza geçişiň termodinamikasy. Kristallaşma düwünjigiň (merkeziniň) emele gelmeginiň termodinamikasy. Düwünjikleriniň öz - özünden döremegi.

#### a) Birinji jynsly faza geçişiň termodinamikasy.

Ulgamyň deňagramlyk ýagdaýy  $T = const$  we  $V = const$  şertlerde  $F = U - TS$  erkin energiýanyň iň pes bahasy bilen kesgitlenýär. Bu ýerde

$$U = U_{bagl.} + \int_0^T C_p dT - \text{bölejikleriň } U_{bagl.} \text{ baglylyk}$$

energiýasynyň we  $T$  temperatura we  $C_p$  ýylylyk sygymy bilen kesgitlenýän ýylylyk energiýanyň jemi

$$S = \int_0^T \frac{C_p}{T} dT - \text{ulgamyň entropiýasy. 51 - nji çyzgyda}$$

simap üçin erkin energiýanyň temperatura baglylygy görkezilen.



Deňagramsyzlygyň derejesi barada amorf surmanyň partlamagyndan we jaýramaklygyndan bilip bolýar.

**Suwuk kristallar** – deňagramly, anizotrop, uly akyjylyga eýe bolan bölekleyin gurluşly-tertipli hallardyr.

**Kristallar** – deňagramly, anizotrop, doly gurluşly-tertipli hallardyr.

### ç) Gaty jisimiň akyjylygy we suwuklyklaryň portlugy.

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

Buz kristallik jisimiň portlugynyň mysaly bolup biler, sebäbi ol urgylarda böleklere döwürlýär. 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 jisimleriniň we suwuklyklaryň döwürlemegine ýardam edýär. Meselem, transformator ýag bilen kaniforly garyndysynyň akymy uly urgyda (23 m/s tizlik bilen) aýratyn böleklere bölünýär.

### d) Kondensirlenen hallaryň alnyşynyň esasy usullary

Bu usullar aşakdakylardyr: buguň kondensasiýasy, atom ýa-da molekulýar densesiniň kondensasiýasy, aşa

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

Köp sanly elektron bolan ýagdaýynda çalyş energiýasyny (17.1) meňzeş bolan aňlatma bilen ýazyp bolar:

$$E_{calys} = - \sum_{i,j} A_{ij} (\vec{S}_i \cdot \vec{S}_j) \quad (17.2)$$

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 önüne tutýar. Frenkeliň teoriýasynda elektron gazyň käbir dykzlygynda 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 öwrülünde elektron uly energiýaly ýagdaý tutmaly bolýar.

2. Geýzenbergiň modeli.

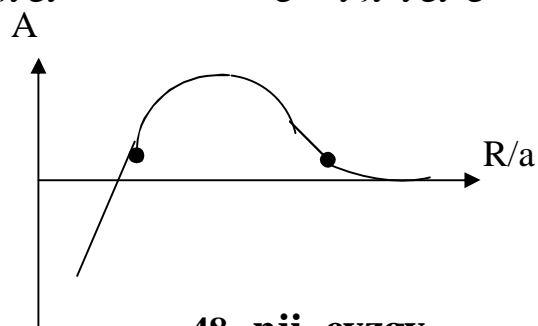
Bu modelde tertipleşen ferromagnit gurluşyny düzýän magnit momentleri kristallik gözenegiň düwünleriniň töwereginde toplanýarlar diýip çaklanyldy. Geýzenbergiň modeline laýyklykda ferromagnetizm d- ýa-da f- gatlakly goňşy ionlaryň magnit momentleriniň tertipleşmegi bilen

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 selçen-ýer elementlerde bolýar.

Çalşyk energiýanyň san bahasy we alamaty atomlaryň aralygyna bagly.

48- nji çyzgyda çalyş energiýanyň atomlaryň özara R arasynyň dolmadyk elektron gatlagynyň “a” radiusyna bolan gatnaşygyndan bolan baglanyşylygy görkezilipdir



48- nji çyzgy

Bu çyzgydan görüşimiz ýaly demir toparyndaky geçiş metallaryndan ferromagnetizm diňe demirde ( $\alpha$  - Fe), kobaltda we nikelde bolup biler.

Şu toparyň Mn,  $\gamma$  – 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

ulgamlar daşky güýçler gatnaşmasa-da bölejikleriň tirkemeginiň (ildirmeginiň) içki güýçleriniň esasynda saklanýarlar, gazlar bolsa olara berlen göwrümi doldurmaga ymtylýarlar.

Ýokarda aýdylan konstantalar (hemişelikler) (şepbeşiklik, dykzlyk we başg.) adaty basyşlara degişlidirler, ýokary we aşýokary basyşlarda (münlerçe 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) Kondensirlenen hallaryň görnüşleri.

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

**Suwuklyklar** – deňagramly, izotrop, gurluşly-tertipsiz hallardyr. Olar akyjylyga eýedirler ( $\varphi = 1/\eta$ , bu ýerde  $\varphi$  – akyjylyk,  $\eta$  – şepbeşiklik), ýagny öz görnüşlerini aňsatlyk bilen üýtgetmek ukybyna. Ideal suwuklyklar üçin süýşme moduly  $G = 0$ .

**Aýnalar** – kwazideňagramly, izotrop, gurluşly-tertipsiz hallardyr. 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 hallardyr.

## VII BAP

### KONDENSIRLENEN HALLARYŇ UMUMY HÄSIÝETNAMASY

#### §18. Umumy häsiýetnama. Kondensirlenen hallaryň görnüşleri.

Gaty jisimiň akyjylygy we suwuklyklaryň portlugy.  
Kondensirlenen hallaryň alnyşynyň esasy usullary.

##### a) Umumy häsiýetnama

Kondensirlenen ulgamlar – kritiki nokatdan daşdaky gaty jisimler we suwuklyklar – gazlara görä million esse kiçi gysylmak ukyby bilen häsiýetlenýärler. Meselem,  $NaCl$  kristallyň gysylmak ukyby deňdir  $0,3 \cdot 10^{-12} \text{ sm}^2/\text{din}$ , suwuk simabyň -  $3,8 \cdot 10^{-12} \text{ sm}^2/\text{din}$ , atmosfera basyşynda howanyň gysylmak ukyby bolsa deňdir  $10^{-6} \text{ sm}^2/\text{din}$ . 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. Kondensirlenen ulgamlarda ol yrgyldydyr, gazlarda bolsa – güýjenýändir.

Kondensirlenen hallar bir belli  $\rho$  dykzlyga eýedirler we maddanyň berlen mukdarynda belli bir  $V$  göwrüme eýedirler. Bu göwrümiň çäginde kondensirlenen

aralykda ýerleşýärler, şonuň üçinem olar üçin çalyş integralyň alamaty položitelidir.

Çalyş energiýanyň orta bahasy aşakdaky formuladan kesgitläp bolar:

$$E_{\text{çalyş}} \approx - NzAy^2 \quad (17.4)$$

Bu ýerde  $z$  – koordinasion san.

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

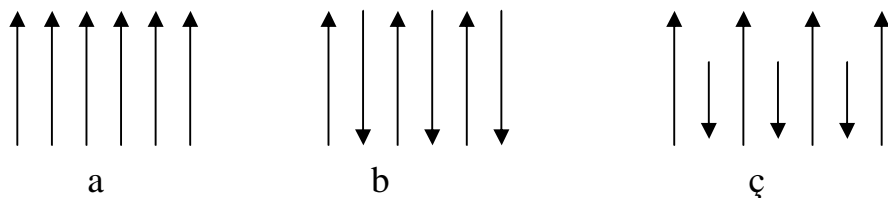
Magnitlenmäniň doýgun ýagdaýynda  $y = \pm 1$ , onda çalyş energiýanyň san bahasy iň kiçidir.

##### a) Antiferromagnetizm we ferrimagnetizm.

Ferromagnetiklerden başga ýene-de magnit tertipleşen maddalaryň uly topary bar. Şol maddalarda atomlaryň spin magnit momentleri antiparallel ugrukdyrylan. Mälim boluşy ýaly, spin magnit momentleriň antiparallel ugrukdyrylmagy otnositel çalyş özaratäsirinde ( $A < 0$ ) ýüze çykýar. Edil ferromagnetiklerdäki ýaly bu ýerde magnit tertipleşme  $0^\circ\text{K}$  tä  $\theta_N$  kritiki nokada çenli temperatura interwalynda bolýar.  $\theta_N$  – 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 tertipleşmăniň dürli görnüşleri 49- njy çyzgyda görkezilipdir.



**49- njy çyzgy. Spin magnit momentiniň tertipleşmesi:**

a – ferromagnit; b – antiferromagnit; ç – ferrimagnit

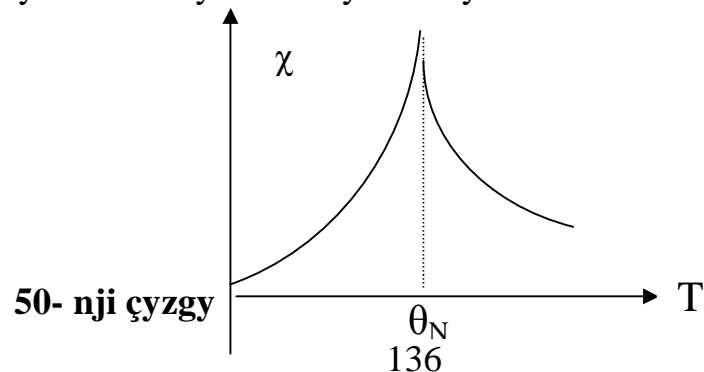
Ferrimagnetikleriň köpüsi ion kristallara degişlidirler, şonuň üçin olaryň elektrik geçirijiligi pesdir. Göwnejaý magnit häsiýetleri (ýokary magnit syzyjylygy, uly doýgun magnitlenme we başgalar) bilen bilelikde adaty ferromagnetiklere görä bu olaryň artykmaçlygyny ýokary ýygýlykly tehnika peýdalanýarlar.

Kompensirlenen ferrimagnetizm bolan maddalary antiferromagnetikler diýip atlandyrylýarlar. Antiferromagnetikleriň magnit kabul edijiliginiň temperatura görä baglanyşygy 50- nji çyzgyda görkezilipdir.

$T > \theta_N$  bolan ýagdaýda magnit kabul edijilik Kuri-Weýssiň kanuny bilen beýan edilýär:

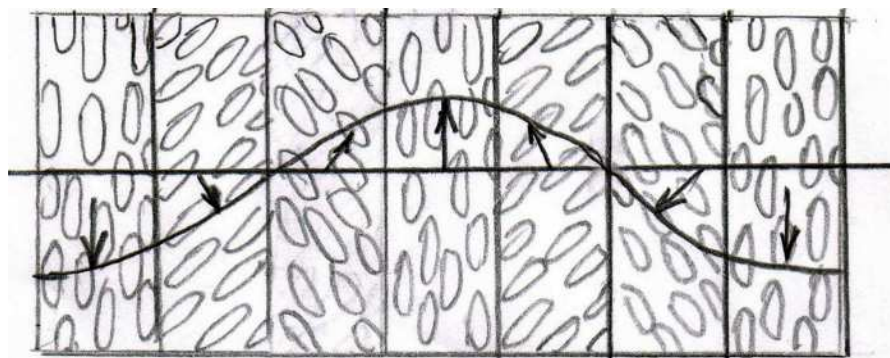
$$\chi = \frac{C}{T + \theta_N} \quad (17.5)$$

Şeýlelikde, ferromagnetizmiň çalyş integrally položitel bolan maddalarda ýüze çykýar. Eger-de çalyş integrallyň alamaty otrisatel bolsa, onda spinleriň antiparallel ugrukdyrylmaklary amatlydyr. Bu ýagdaýda antiferromagnetizm ýüze çykýar.



Bu kristallar öz adyny düzüminde holesterin bar bolan köp sanly birleşmelerden alypdyrlar. Olarda suwukkrystalliki fazalar emele gelýär (holerestiniň özi munuň ýaly faza emele getirmeýär). Holesterikler garyndy smektikinematiki görnüşli gurluşa eýedirler.

Smektikalardaky ýaly molekulalar parallel gatlaklarda ýerleşýärler, emma her bir gatlakda molekulalaryň oklary nematik görnüşli gatlagga paralleldirler (61 - nji çyzgy). Her bir soňky gatlak öňki gatlagga görä bir belli burça öwrülen. Gatlaklaryň öwürmekligiň sebäbi molekulalaryň görnüşi bilen bagly bolan giňişleýin päsgelçilikleriň döremegi bolup durýar.



61 - nji çyzgy

Holesterikler optiki taýdan biroklydyrlar we otrisateldirler  $n_o > n_e$ , sebäbi molekulalaryň oklarynyň ugurlary nematiklere we smektiklere görä tapawutlylykda optiki oka perpendikulýardyrlar. Holesteriniň spiral gurluşy optiki işjeňlige getirýär, ýagny ýagtylygyň polýarlanma tekizliginiň aýlanyşyna.

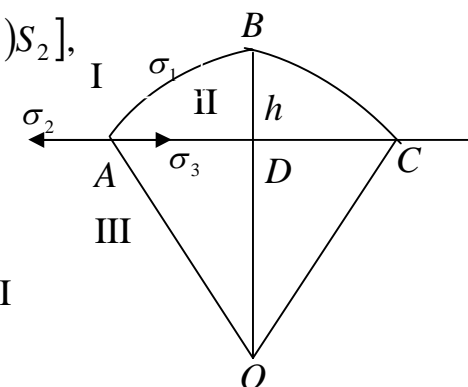
$$\frac{1}{3} \sigma S = \frac{1}{3} [\sigma_1 S_1 + (\sigma_3 - \sigma_2) S_2],$$

bu ýerde “düzünjik – faza I” araçäginde  $\sigma_1$  üst çekişmegiň,  $\sigma_2$  - şol “düzünjik – diwarjyk” araçäginde şol “diwarjyk – faza I” araçäginde”.

Deňagramlylykda

$$\sigma_2 - \sigma_3 = \sigma_1 \cos \theta, \quad (19.3)$$

bu ýerde  $\theta$  -gyra burç.



53 - nji çyzgy

$ABC$  sferiki segmentiň üstüniň  $S_1$  meýdany we segmentiň esasyň  $S_2$  meýdany deňdir:

$$S_1 = 2\pi r h = 2\pi r^2 (1 - \cos \theta)$$

$$S_2 = 2\pi r^2 \sin^2 \theta.$$

Bu ýerden

$$W = \frac{1}{2} \pi r^2 \sigma_1 [2(1 - \cos \theta) - \sin^2 \theta \cos \theta] \quad (19.4)$$

Öllenmedik halatda gyra burçy  $\theta = \pi$  (aýnanyň üstünde simabyň damjalary), gomogen fazada  $W = \frac{4}{3} \pi r^2 \sigma$  erkin sferiki düwünjigiň döremeginiň işi deňdir damjanyň  $\frac{1}{3}$  üst energiýasyna.

Bölekleyin öllemekde ( $\theta < \pi$ )  $W$  iş azalýar, ýagny araçägiň üstünde düwünjigiň emele gelmeginiň işi erkin

düwünjigiň emele gelmeginiň içinden kiçidir. Doly ölmekde  $\theta = 0$  (aýnanyň arassa üstünde suwuň damjasynyň ýaýraýyşy)  $W$  iş deňdir nola. Bu halatda täze fazanyň emele gelmegi (buguň kondensasiýasy) örän kiçi döügunlykda amala aşyrylýar.

Aýdylan zatlar kristalliki düwünjikleriň emele gelmeginiň halaty üçin hem dogrudyr, bu bolsa diwarjyklaryň we garyndylaryň bölejikleriniň kristallaşma prosessini tizlendirmekde uly roluny düşündirýär.

#### d) Düwünjikleriň fluktasion emele gelmegi

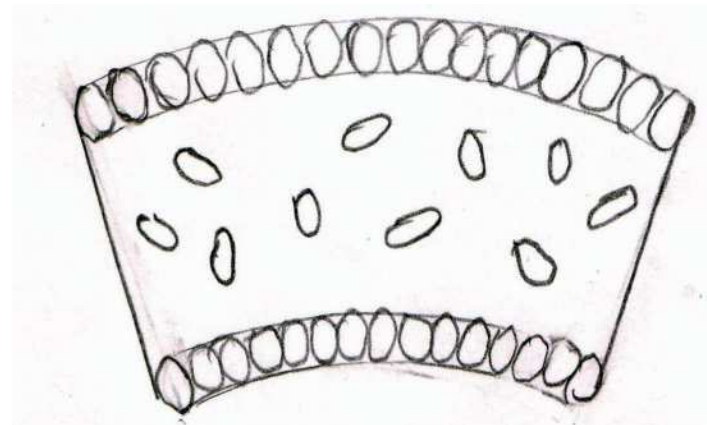
Garyndylar bolmadyk halatda ýylylyk fluktusiýasyýalarynyň energiýasynyň hasabyna düwünjikleriň öz-özünden emele gelmegi mümkindir. Düwünjigiň emele gelmeginiň  $C$  ähtimallygy bu halatda Bolsmanyň formulasy bilen kesgitlenýär:

$$C = \exp\left\{-\frac{\Delta F}{kT}\right\} = \exp\left\{\frac{\sigma S}{3kT}\right\} = \exp\left\{-\frac{aT_0^2}{kT(\Delta T)^2}\right\}, \quad (19.5)$$

bu ýerde

$$\alpha = \frac{16\pi\sigma^3}{3q^2}.$$

Bu ähtimallyk sowadylmanyň derejesiniň artmagy bilen ösýär. Temperaturanyň peselmegi bilen diffuziýanyň tizligi hem azalýar. Onuň koeffisiýenti  $D = Ae^{-Q/kT}$ , bu ýerde  $Q$  – diffuziýanyň aktiwasiýasynyň energiýasy. Bu erginiň şepbeşikliginiň artmagyna ekwiwalentdir. Şepbeşikleriň nazara alynmagynda düwünjikleriň emele gelmeginiň ähtimallygy



60 - nji çyzgy

#### ç) Smektikler (“smega” grek sözünden – sabyn).

Smektiki kristallarda molekulalar diňe biri-birine parallel gönükdirilen däl-de, galyňlygy bir molecula deň bolan tekiz gatlaklara düzülýärler (59 - nji çyzgy). Sabynyň köpürjigi smektika mysal bolup biler. Köpürjigiň daşky we içki üsti smektiki gatlaklardyr.

Üst gatlaklardaky sabynyň molekulalarynyň özara täsirleşmesi köpürjigiň durnuklylygy üçin üst dartylmasyny döredýär. Köpürjigi çişirende we onuň ölçegi artanda sabynyň plýonkasynyň ergininde ýerleşen erkin molekulalar gatlaklarda orunlaryny tapýarlar we köpürjigiň diametrini ulaldýarlar (60 - nji çyzgy). Köpürjigi gysanda sabynyň molekulalary gatlaklardan gysyp çykarylyp gaýtadan ergine geçýärler.

#### d) Holeristik suwuk kristallar.

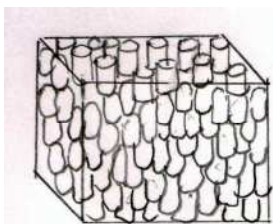
özara täsirleşmesiniň gowşaklygy bolsa akyjylaryň döremegini düşündirýär.

Suwuk kristallaryň üç görnüşü bar: nematik, smektik we holesterik.

**Nematikler.** (“nema” grek sözünden – sapak diýmek). Nematiki suwuk kristallarda molekulalaryň oklary biri-birine parallel gönükdirilen, molekulalaryň özleri bolsa erkin biri-birine görä süýşirilýän (58 - nji çyzgy). Netijede maddada molekulalaryň çyzykly ugrukdyrmagy döreýär.

Nematikler optiki taýdan biroklydyrlar we položitelidirler.

Molekulalaryň oklarynyň ugry bilen gabat gelýän optiki oka parallel ýagtylygyň ýaýramagynyň tizligi oka perpendikulýar ugra görä ulydyr, ýagny  $\vartheta_{\omega} > \vartheta_{\varepsilon}$ .



58 - nji çyzgy

Bu ýerden şöhleleriň  $n_{\omega}$  adaty däl döwürleşme görkezijiler üçin  $n_{\omega} < n_{\varepsilon}$  gatnaşyk alýar. Bu gatnaşyk optiki položitel kristallary häsiýetlendirýär.

Nematikleriň elektrik we magnit meýdanlaryna duýgurlygy uly. Meselem, paraazoksianizolyň şepbeşikligi gowşak magnit meýdanyň täsiri astynda akymyň perpendikulýar ugrunda örän güýçli üýtgeýär.

$$C \approx \exp \left\{ -\frac{1}{kT} \left[ Q + \frac{aT_0^2}{(\Delta T)^2} \right] \right\} \quad (19.6)$$

Iki gapma garşy faktorlaryň täsiriniň netijesinde bu funksiýa

$ax^2(3-x) = Q(x-1)^3$ ,  $x = T_0/T$  deňleme bilen kesgitlenýän ekstremumlara eýedir.

Ýokarda ýazylan deňlemeden  $T$  temperaturany tapyp bolar.

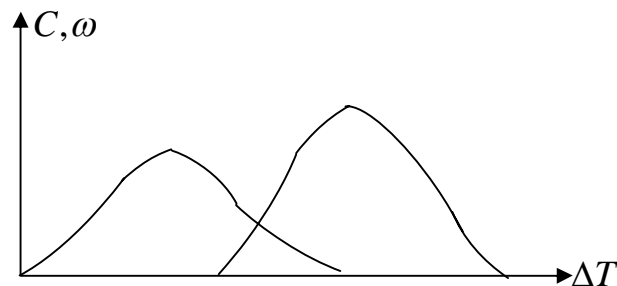
## 2. Kristallaşma prosessiň kinetikasy. Ýeňil we kyn kristallaşýan suwuklyklar. Kristallaşma prosessiň mehanizmi.

### a) Kristallaşma prosessiň kinetikasy

Tejribeleriň görkezmelerine görä, ergin kristallaşma temperaturasyna çenli sowadylanda onuň massasy kristallik halyna şol bir pursatda we şol bir wagtda ähli göwrümde bolup geçmeýär. Kristallaşma ýeke ýa-da birnäçe merkezlerden başlap, gutarnykly tizlik bilen ýaýraýar we ýuwaş-ýuwaşdan durnukly däl fazanyň ähli göwrümüne gürşap alýar. Kristallaşma prosessiň kinetikasy iki ululyklar bilen ýazylyp beýan edilýär: wagt birliginde erginiň göwrüm birliginde kristallaşma merkezleriniň emele gelmeginiň  $C$  tizligi bilen (ölçeği  $L^{-3}T^{-1}$ ) we tizligi bilen (ölçeği  $LT^{-1}$ ).



$C, \omega$  we  $\eta$  şepleşigiň temperatura baglylygyna seredeliň. Mysal hökmünde ereme temperaturasy  $95^{\circ}\text{C}$  bolan organiki birleşmä – betoly alalyň.



54 - nji çyzgy

$C(\Delta T)$  we  $\omega(\Delta T)$  egriler maksimuma eýedirler (54-nji çyzgy). Muny sowadylmagyň kiçi derejelerinde (egriniň we kristalyň erkin energiýalarynyň tapawudynyň proporsional artmagynyň netijesinde, ýagny

$$\Delta F = F_s - F_\ell \text{ artmagy bilen),}$$

$\omega$  we  $C$  ululyklaryň artmagy bilen, sowadylmagyň uly derejelerinde (şepbeşikligiň artmagynyň netijesinde)  $\omega$  we  $C$  ululyklaryň peselmegi bilen düşündirip bolar.

Betolyň şepbeşikligi temperaturanyň  $50^{\circ}\text{C}$  peselmegi bilen 40000 esse ulalýar we deňşlilikde erginiň bölejikleriniň hereket edýänligi kiçelýär:

50	40	30	20	10	0	$T^{\circ}\text{C}$
0,014	0,035	0,157	2,65	46,0	580	$\eta$

gomogenli we birhilligi bilen baglydyr. Başga bir sebäp amorflaryň özleriniň häsiýetleri bilen (gatylyk, berklik, himiki durnuklylyk) baglydyr. Bu häsiýetler kristalliki maddalara görä ýokary bolup biler.

Amorflaryň deňagramlylygy gyzdymada ýüze çykýar. Olarda şunlukda kristallaşmanyň gaýdyp gelmedik prosessler bolup geçýär. Soňky sowadylmakda amorf hala geçip bolanok.

#### ç. Suwuk kristallar.

##### Suwuk kristallara mahsus bolan häsiýetler.

Suwuk kristallar anizotropiýa eýe bolan (kristallara mahsus bolan) we şol bir wagtda akyjylyga ukyply (suwuklyklara mahsus bolan) aralyk (mezomorfly) fazalar deňşlidir. Suwuk kristallar fazanyň termodinamiki düşünjesini kanagatlandyrýarlar. Olar belli bir temperatura aralygynda bolup bilýärler. Bu temperatura aralykdan aşakda suwuk kristallar tertipleşýän kristala kristallaşýarlar, ýokarda bolsa izotroply suwulyga geçýärler.

Suwuk kristallar molekulýar maddalardyr we kristallik we suwuk fazalaryň aralyk gurluş tertipleşmesine eýedirler. Suwuk kristallaryň fiziki häsiýetlerini aňsatlyk bilen dolandyrmak bolýar, bu bolsa olaryň uly nazary we amaly ähmiýetiniň sebäbi bolup durýar.

Suwuk kristallaryň gurluşly we häsiýetleri birinji nobatda olaryň molekulalarynyň uzyn görnüşe eýediginden kesgittenýär. Molekulalaryň arasynda iki görnüşli baglanyşyk bar: gapdal we ujly. Gapdal baglanyşyk molekulalary parallel ugrukdyrma getirýär, ujly bolsa olary zynjyrjagazlara düzmek üçin ymtylýar. Parallel ugrukdyrma anizotropiýany ýüze çykarýar, molekulýar



## §21. Amorflaşma. Suwuk kristallar.

**Kesgitleme. Amorflaryň häsiýetleriniň aýratynlygy.**  
**Suwuk kristallar we olara mahsus bolan häsiýetler.**

**Nematiklar, smetiklar,**  
**holeristik suwuk kristallar. Maddalaryň faza**  
**geçişleriniň**  
**köpgörnüşligi.**

### **a) Kesgitleme.**

Deňagramsyzlyk şertlerinde, mysal üçin aşa çalt sowadylmakda (suwuklygyň  $10^4 - 10^{10} K/s$  taplamasynyň tizligi bilen) alynýan tertipsiz gurluşly gaty jisimlere **amorflar** diýilýär. Munuň ýaly sowadylma usulynyň biri erginiň damjasynyň massiw metallik plitanyň ýüzüne atylmagynyň netijesinde amala aşyrylýar ýa-da erginiň akymyny çalt aýlanýan we intensiw sowadylan walikleriň (oklowjyklar) arasyndan goýbermegiň netijesinde alynýan tükeniksiz amorf lentanyň. Munuň ýaly lentanyň alnyşy amorf materiallaryň tehnologiýa ulanmaklygy üçin amatlydyr. Ýene-de bir usul güýçli sowadylýan podložkanyň ýüzüne buguň kondensirlenmesinden ybarat. Üçünji usul metallik erginleriň üstüne lazer impulsalaryň täsirlemeginde amala aşyrylýar.

### **b) Amorflaryň häsiýetleriniň aýratynlygy.**

Soňky ýyllarda amorflara bildirýän uly gyzyklanma iki sebäp bilen düşündirilýär. Olaryň biri gurluşyň

$\omega$  we  $C$  egrileriň maksimumlary biri birine görä temperaturanyň şkalasy boýunça  $60^\circ C$  süýşürilen. Maksimum ýaýlada ösüşiň tizliginde kristallaşma merkezleri entäk emele gelmeýärler, merkezleriň emele gelmeginiň tizligi bolsa maksimum ýaýlada örän kiçidir. Bu kristallaşmanyň jemleýji tizligini tormozlýar, erginiň ähli göwrüminiň kristallaşmasynyň doly wagty artýar, sebäbi proses diňe  $\omega$  we  $C$  egrileriň kesişmeleriniň hasabyna gidýär. Kristallaşmany tizlendirip bolar, eger-de ergini  $C(\Delta T)$  erginiň maksimum bolar ýaly temperatura çenli sowadyp, kristallaşma merkezleri emele gelýänçe birnäçe wagt saklap, soňra ulgamy gyzdyryp, kristallaşma merkezleriniň çalt ösüşi başlanan ýagdaýynda, ony ösüşiň maksimum tizliginiň ýaýlasyna gaýdyp getirmeli.

### **b) Ýeňil we kyn kristallaşýan suwuklyklar.**

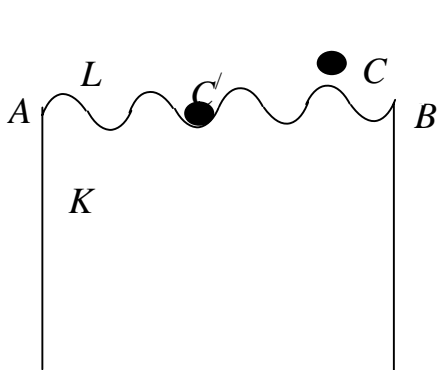
Erginiň sowadylmaga bolan ukyplygy  $\omega$  we  $C$  egrileriň maksimumlarynyň gabat gelmeýäni bilen kesgitlenýär. Bu egrileriň maksimumlarynyň biri-birinden golaý ýagdaýy ulgamyň kristallaşma uly bolan ukyplygyny we onuň amorf halatdaky alnyşynyň kynlygyny görkezýär.  $\omega$  we  $C$  egrileriň temperatura şkalasy boýunça özara uzaklaşmasy ulgamyň sowadylmaga uly bolan ukyplygyny we kristallik halatdaky alnyşynyň kynlygyny görkezýär. Mysal üçin, kwarsyň kristally eremekden, soňra bolsa sowadylan soň elmydama kwars aýna görnüşinde alynýar (eredilen kwars) we hiç haçan erginden kwarsy ýeke monokristal görnüşinde däl-de, poliristall görnüşinde hem alyp bolmaýar (Tebigatda we emeli şertlerde kwarsyň

kristallary aşgar erginlerinden gidrotermal şertlerde – ýokary temperaturalarda we uly basyşlarda, alynýar.

Ýokarda beýan edilen şekil fenomenologiki suwuklyklyň ýeňil we kyn kristallaşýan suwuklara bölünýändigini düşündirýär.

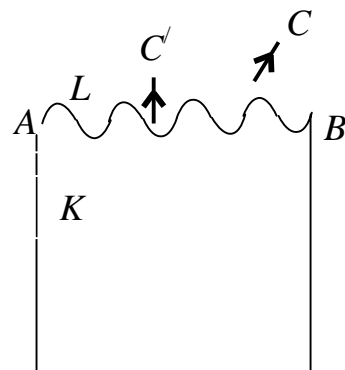
### ç) Kristallaşma prosessiň mehanizmi.

Kristallaşmanyň elementar akty birnäçe etaplardan durýar:  $C$  bölegiň kristallyň ösüşiniň  $AB$  frontyna dartýşma atom aralygyndaky täsiriniň aralygyna golaýlaşmasyndan, ösüş frontynyň bölegi tutyp almagyndan we onuň položitel energiýanyň  $C'$  lokal minimumlarynyň birinde ýerleşmesinden (55- nji çyzgy).



55 - nji çyzgy

Çylşyrymly konfigurasiýaly bölejikler üçin (kwars –  $\text{SiO}_2$ , silikatlar) ýa-da sferiki däl görnüşe eýe bolan bölejikler üçin (organiki molekulalar) ýene-de goşmaça oriýentasiýa



56- nji çyzgy

çykmagyna getirýär.  $T_f$  nokadyň özünde bolsa magnit kabuledijiligiň maksimumy syn edilýär.

$T_f$  temperaturadan aşakda ýokarda agzalan magnitrelaksasiýa effektini ýüze çykarmak üçin üýtgeýän magnit meýdanynda magnit kabuledijiligini hem ölçeyärler.

Häzirki wagtda spin aýnalar elektrik geçiriji garyndylarda gowy öwrenilen we onuň döremeginiň sebäbi geçiriji elektronlaryň üsti bilen gytak alyş-çalyş özara täsirleşmesi bolup durýar.

Sorag ýüze çykýar, geçiriji elektronlar bolmadyk geçiriji däl magnit ulgamlarynda spin aýnalar döräp bilermi? Nazary pikirleşmelere görä spin aýna suwuklanan magnit dielektriklerde hem döräp biler, eger-de olarda biri-biri bilen bäsleşýän ferro we antiferromagnit özara täsirleşmeler bar bolsa. Emma bu özara täsirleşmeleriniň mehanizmi başgaçadyr, aralyk magnit däl atomlaryň oýadylmagynyň üsti bilen gytak alyş-çalyşy hut özidir (aşaalys özara täsirleşme).

Spin aýna geçiriji däl ferrit-granatlarda, mysal üçin  $\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  birleşmede we  $0,13 \leq x \leq 0,5$  şertlerde  $\text{Eu}_x\text{Sr}_{1-x}\text{S}$  ulgamda tapyldy. Bu hal  $\text{Ca}_{2/3}\text{Cr}_2\text{S}_4$  magnit ýarymgeçirijide hem tapyldy. Bu birleşmelerde magnit atomlaryň ( $\text{Fe}, \text{Eu}$ ) düzümi artany bilen alyş-çalyş özara täsirleşme ulalýar we ferro ýa-da antiferromagnetizm ýaýlalar emele gelýär.

Magnit atomlaryň düzüminiň soňraky artmagy bilen ölçegleri çäksiz bolan ýaýlalar döreyär, bu bolsa uzakdaky magnit tertipleşmesine getirýär (ferro- ýa-da antiferromagnetizme).

Spin aýna düşünjesi güýçli suwukdyrylan magnit garyndylaryň derňemeginiň esasynda döredi. Bu garyndylara misiň düzüminde geçiş elementleriniň (demir, kowalt we başg.) az möçberde bolan gaty erginler degişlidirler.

Munuň ýaly erginiň gözeneginde magnit atomlaryň magnit däl atomlar bilen biri-birinden aýrylýandygyna garamazdan, olaryň arasynda položitel hem otrisatel alyş-çalyş özara täsirleşme döremegi mümkin, ýagny garyndynyň nusgasynyň aýratyn ýerlerinde geçiş elementleriniň magnit momentleriniň ferro- we antiferromagnit ýagdaýlary ýüze çykmagy mümkin. “Ýaýradýjy” hökmünde bu ýerde geçiriji elektronlardyr (geçiriji elektronlaryň üsti bilen gytak alyş-çalyş özara täsiri).

Spin aýnalaryň aýratynlygy olarda atomlaryň magnit momentleriniň  $T_f$  doňdurma temperaturanyň barlygy bolup durýar. Bu temperaturadan aşakda atomlaryň magnit momentleri tötänleýin ugurlarda gaty berkidilen ýaly bolýarlar. Munuň ýaly berkidilme dürli alamatly bäsdeşlik edýän alyş-çalyş özara täsirleşmeleriň täsiriniň netijesidir. Atomlaryň magnit momentleriniň islendik ugurlar boýunça paýlanlygy sebäpli garyndynyň makroskopiki magnit momenti nola deň bolýar. Munuň ýaly ýagdaýa hut özi spin aýna diýilýär. Tertipsiz magnit halynyň bu görnüşi Kýuri nokadyndan ýokary bolan ferromagnetigiň, ýagny paramagnetigiň halyna meňzeş däl.

Dürli mümkin bolan ugurlaryň arasynda energetiki päsgelçilikleriň barlygy  $T_f$  temperaturadan aşakda dürli magnetrelaksion we gisterezis hadysalaryň ýüze

gerek bolýar. Mundan soň bölejigiň “çykydy” başga bölejikleriň emele getiren potensial çukurynyň degişlilikdäki çukanagyna düşmeli (56 - ngy çyzgy).

## §20. Erginleriň gatamagy.

### Kyn kristallaşýan suwuklyklaryň sowadylmagynda häsiýetleriň

#### üýtgemegi. “Aýna” düşünjäniň kesgitlemesi.

#### Aýnalaryň metastabilligi. Spin aýnalar.

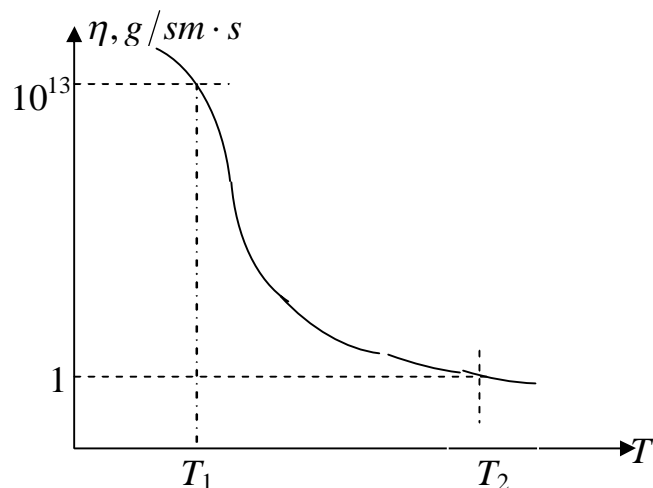
##### a) Häsiýetleriň üýtgemegi.

Eger ýokarda aýdylan sebäplere görä suwuklygyň kristallaşmasy mümkin däl bolsa, onda onuň sowadylmagynda ähli göwrümde gomogen prosess amala aşyrylýar. Bu prosess fiziki häsiýetleriň üýtgemegi bilen geçýär we erginiň bölejikleriniň ýylylyk hereketleriniň energiýasynyň azalmagyna sebäp bolýar. Bu halatda erginiň şepbeşikligi ep-esli artýar we degişlilikde akyjylygy azalýar. Meselem, güýçli sowadylanma suwuklyklaryň şepbeşikligi pes temperaturalarda  $10^{13} \frac{g}{sm \cdot s}$  ýetýär, bu bolsa gaty jisimleriň şepbeşikligine golaýlaşýar. Muny 57 - nji çyzgydan görüp bolýar.

Berk sowadylan erginleriň mehaniki häsiýetleri (gatylyk, berklik, maýyşgaklyk) edil gaty jisimleriňki ýalydyr.

$T_1$  temperaturadan pes temperaturalara çenli sowadylan ergine “aýna” diýilýär.

Suwuklygyň we aýnanyň arasyndaky şertli araçäge şepbeşikligiň  $10^{12} \text{ g/sm} \cdot \text{s}$  bahasynda geçirilýär.



57 - nji çyzgy

Deňeşdirmek üçin  $0^{\circ}\text{C}$  temperaturada suwuň şepbeşikligi  $0,017 \text{ g/sm} \cdot \text{s}$  deňdir, buzuňky bolsa  $10^{14} \text{ g/sm} \cdot \text{s}$ . Şeýlelikde, kristallaşmada suwuň şepbeşikligi takmynan 16 tertip üýtgeýär. Buzuň ýokary şepbeşikligi onuň gurluşynda molekulýarara baglanyşygyň üç ölçegli toruň emele gelmegi bilen düşündirilýär.

Aýnalaryň atom gurluşly suwuklaryňky ýaly ýakyn tertipleşme bilen häsiýetlendirilýär.

Bu tertipleşme birnäçe in golaý koordinasion sferalara ýaýraýar, ýagny  $5 - 10A^0$  deň bolan ýaýlalara. Bu

ýaýlalaryň çäginin daşynda bölejikleriň paýlanmagy statistiki taýdan tertipsizdir. Aýna görnüşinde metallary we olaryň garyndylaryny almak örän kyn, sebäbi olar çalt kristallaşýarlar. Kristallaşmany azaltmak üçin metallara ugrukdyrylan baglylykly elementleri garyýarlar (bor, kremniý, fosfor).

#### b) “Aýna” düşünjäniň kesgitlemesi.

Himiki düzümine we sowap doňmanyň temperaturasyňa bagly bolmadyk we erginiň çenden aşa sowadylmagynyň esasynda alnan we şepbeşikligiň ýuwaş-ýuwaşdan artmagynyň netijesinde gaty jisimleriniň mehaniki häsiýetlerine eýe bolan ähli rentgenamorf jisimlere “aýnalar” diýilýär. Ondan hem başga suwuk haldan aýnagörnüşli hala geçiş prosessi öwrülip bilýän bolmaly.

#### ç) Aýnalaryň metastabilligi (metadurnuklylygy).

Aýnalar – metastabil, deňagramsyz ulgamlardyr. Olar şeýle çenden aşa sowadylan suwuklyklardyr welin, suwuk hala eýe bolan häsiýetini, ýagny akyjylygyny ýitirýärler.

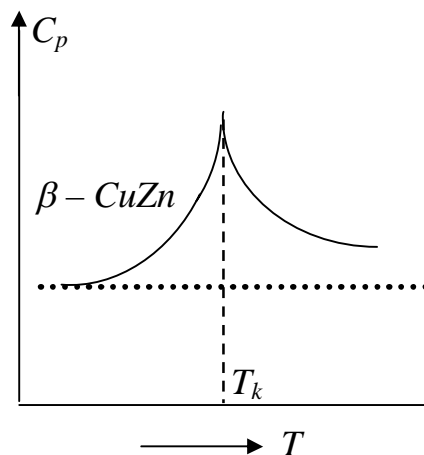
Aýnagörnüşli halyň deňagramsyzlygyny köne aýnalaryň reňkli ýorkasyndan görüp bolar.

Temperaturanyň täsiri astynda hem (çüýşe önüm ýasaýan işler alyp barlanda) aýnaň ýüzünde bulanmaklyk emele gelýär. Şunuň ýaly aýnany täzedan uredip ýasamaly.

d) **Spin aýnalar** – kiçi ýaýlalarda spinleriniň tertipli ýerleşişli kristallik we kristallik däl magnetiklerdir. Pes temperaturalarda spinler “doňdurylýar we magnit meýdanynda olary öwürmek” bolanok.

öwrülmede bölünip çykýan ýylylyk mukdaryna we deňişlilikde I-nji jynsly faza geçişiniň bardygyny görkezýär.

$\beta$  - latunda ( $\text{CuZn}$ ) atom tertipleşmegi II – jynsly faza geçişe deňşlidir, öwrülmeniň ýylylygynyň ýoklugy aýdyňlaşdyrýar.  $\beta - \text{CuZn}$ -iň öwrülme nokadynda ýylylyk sygymynyň temperatura baglylygy  $\lambda$  – görnüşe eýedir, emma  $T_k$  geçiş nokadynda üznüksizdir (68 - nji çyzgy).



68 - nji çyzgy

Seredilen erginlerdäki öwrülmeleriň tebigaty rentgengurluş derňewiniň kömegi belen anyklandy. Toplanan we gyzdyrylan erginleriň rentgenogramalarynyň tapawudy gyzartmadan soň emele gelýän goşmaça gowşak intensiwli çyzyklaryň emele gelmeginden durýar.

Goşmaça (aşagurluşly) çyzyklaryň emele gelmegi kristallik gözenegiň käbir periodlarynyň we elementar öýjügiň göwrüminiň ulalmagyna görkezýär. Periodlaryň ulalmagynyň sebäbi gyşardyrylan nusgalarda atomlaryň tertipli ýerleşmegi we taplanan nusgalarda – tertipsiz ýerleşmegi bolup durýar.

Adaty kristallaryň arasynda uly optiki işjeňlige alfa-kwars eýedir. Onuň polýarlanma tekizligi 1 mm geçende  $20^\circ$ -a öwrülýär. Holesteriniň optiki işjeňligi ummasyz ulydyr. Ol  $18000^\circ$ -a ýetýär, bu bolsa galyňlygyň 1 mm –ine düşýän 50 doly aýlawa deňdir.

e) **Suwukkristalliki** maddalaryň hemme görnüşleri üçin umumy optiki häsiýeti – goşa şöhläniň döwürleşmesidir. Ýagtylygyň polýarlanmadyk şöhləsi maddanyň üstüne düşende iki sany çyzykly polýarlanma komponentlere bölünýär (adaty we adaty däl). Olaryň elektrik wektorlary (polýarlanmanyň tekizlikleri) özara perpendikulýardyr. Adaty we adaty däl – şöhläniň ýaýramagynyň tizligi we döwürleşme koeffisiýentleri dürli-dürlidir. Olar maddanyň gatlagyndan parallel desseler bilen çykýarlar. Goşa şöhläniň döwürleşmesine geçirilýän barlag maddanyň suwukkristalliki halynyň iň amatly usuly bolup durýar.

f) **Gurluşyň dolandyryjylygy (labilligi) we holesterikleriň häsiýetleri.**

Holesterigiň molekulýar gurluşy içki molekulýar güýçler bilen örän ýuka deňagramlylykdadyr we ony aňsatlyk bilen bozup bolýar. Islendik kiçi daşky täsir bilen (optiki, ýylylyk, elektrik we ş.m.) holesterigiň fiziki häsiýetlerini oýatmagyň netijesinde holesterikleriň fiziki häsiýetleri, birinji nobatda optiki häsiýetleri (ýagtylygyň serpikmegi we geçirmekligi, optiki işjeňligi, reňklemegi) düýpgöter üýtgeýär. Meselem, üç holesterikden ybarat bolan plýonkada  $4^\circ\text{C}$  temperatura aralygynda ähli göze görünýän spektrde reňki üýtgedip bolýar. Munuň ýaly plýonkalary kesellenen organy ýüze çykarmak üçin adamyň endamynyň üstünde temperatura meýdanyň üýtgemegine gözegçilik edip bolar. Mundan başga

holesterikleriň himiki birleşmeleriniň buglaryna ýagtylyk duýgurlygy hem ulydyr. Munuň esasynda käbir yslyry kesgitlemek üçin abzal döretmek mümkindir.

Holesterikleriň spiral gurluşynyň periody takmynan göze görünýän ýagtylygyň tolkun uzynlygyna deň. Munuň ýaly periodik gurluşda ýagtylygyň kesgitlenen serpikmeleri görünýär. Olar Wulf-Breggyň formulasy bilen ýazyp beýan edilýär.

$$\lambda = 2d \sin \theta$$

Eger period  $d = 5000 \text{ Å}$ -e deň bolsa, onda  $45^\circ$  burçuň astynda ýagtylyk  $7000 \text{ Å}$  (gyzyl) deň bolan tolkun uzynlygy bilen serpikleýär,  $30^\circ$  burçuň astynda bolsa – tolkun uzynlygy  $5000 \text{ Å}$  (gök) deň bolan ýagtylyk. Fiksirlenen serpikme burçunda holesterigiň plýonkasy bir reňkde reňklenen ýaly görünýär. Smektikler üçin molekulalar gatlaklaryň arasyndaky uzaklyk birnäçe angstremlere deň. Bu ýagdaýda rentgen şöhleleri kesgitlenen serpikýärler.

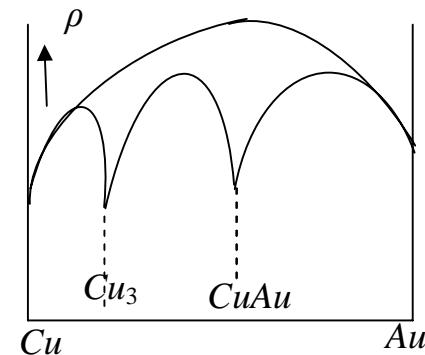
Nematiklerde gatlaklaryň arasy mikronlar bilen ölçenilýär we olar şöhlelenmäni kesgitlenen diňe infragyzy ýaýlada serpikdirýärler.

#### g) Maddanyň faza geçişleriniň köpgörnüşligi.

$G$ ,  $L$ ,  $F$ ,  $S$  haryplary bilen degişlilikde gaz, suwuk, suwuk kristal we gaty hallary belgiläliň. Adaty gaza geçişleriň formulasy aşakdaky görnüşde ýazylýar:



67 - nji çyzgyda  $Au - Cu$  garyndylaryň gyzardyrylan we gyzardylmadyk hallardaky elektrik garşylygyň konsentrasiýa bagly grafigi görkezilipdir.



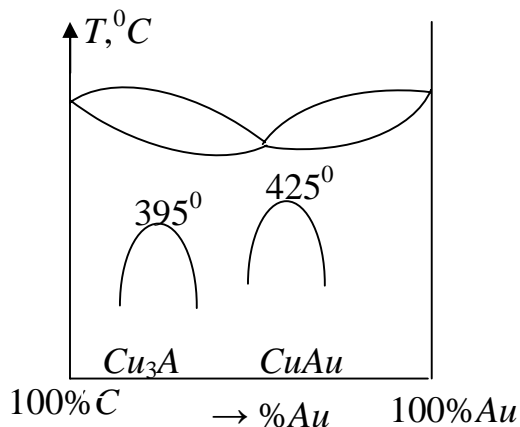
#### 67 - nji çyzgy

Gyzardylmadyk garyndylar üçin egriniň gümmez görnüşi gaty erginleriň konsentrasiýanyň artmagy bilen elektrik garşylygynyň artmagyny düşündirýär. Gaty ergindäki tertipleşme halda elektrik garşylygy birden bire pese düşýär, şonuň üçin elektrik garşylygyň egrisinde gyşardyrylan garyndylarda tertipleşen fazalar degişli elektrik garşylygynyň minimumlary emele gelýär.

Kalorimetrik ölçegler  $AuCu$  we  $AuCu_3$  erginlerdäki atom gurluşynyň tertipleşmesi sowadylanda ýylylygyň bölünip çykýandygyny görkezýär. Ýylylyk sygymy diňe  $T_k$  geçişniň başynda däl-de, käbir temperatura interwalynda (aralykda) üýtgeýär.

Muňa görä-de öwrülme ýaýlasýnda ýylylyk sygymy öwrülme nokadynda üzülen  $\lambda$  – görnüşe eýedir, bu bolsa

simleriň gyzardylmagy sozma prosesinde emele gelen berkligi aýyrman, tersine, portlugyň artmagyna getirdi. Şol bir wagtda ýagdaýlar diagrammasynda likwidus we solidus çyzyklary gaty haldaky çäksiz eredilmegini görkezip durdylar (66 - njy çyzgy). Fiziki-himiki usullar bilen geçirilen derňewler  $Au - Cu$  ulgamynda gaty halda faza öwrülmeleriň bardygyny görkezdi.



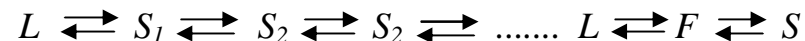
66 - njy çyzgy

Ýagdaýlar diagrammasynda faza deňagramlygyň çyzyklary iki sany gümmez (kupol) görnüşli ýaýlany ýüze çykaryar ( $AuCu$  we  $AuCu_3$  düzümlerde).

Öwrülmäniň başlangyç tem-peraturasy (Kurnakowyň temperasy atlandyrylan) stehiometrik düzü-minde  $AuCu$  üçin deňdir  $425^{\circ}C$ ,  $AuCu_3$  bolsa  $395^{\circ}C$ .

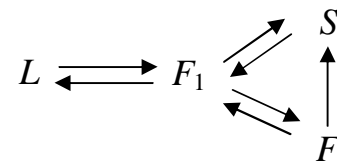
Gaty haldaky faza öwrülmeleriň bardygyny ýylylyk sygymy we elektrik garşylygy ýaly häsiýetlerinden bilip bolýar.

Bu ýerde diller geçişiniň ugruny görkezýärler. Gaty halda polimorfizm – allotropiýa hadysasy ýüze çykýar. Mysal üçin plutoniý üçin 6 sany modifikasiýa, suw üçin – 8 sany modifikasiýa bellidir. Bu ýagdaýda ýokarda ýazylan shemanyň dowamy bolýar:



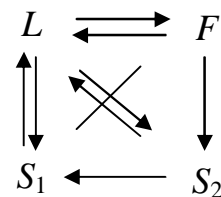
shema suwukkrystallik fazanyň ýüze çykmaklygynyň halatyny ýazyp beýan edýär. Goşa diller faza geçişiniň öwrülip bilýändigini görkezýär (enantiotropiýa).

Kaprinowoturşy holesterinde faza geçişler aşakdaky shema bilen ýazyp beýan edilýär:

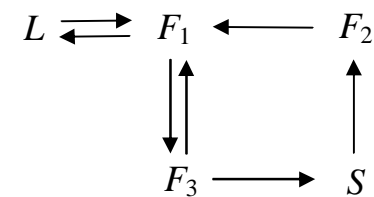


Bu ýerde iki kristallik faza görünýär, üstesine-de  $F_2 \rightarrow S$  geçiş öwrülmedik (diňe bir ugurda amala aşyrylýar). Bu hadysa **monotropiýa** diýip atlandyrylýar.

Ahyrda faza geçişleriň ýene-de iki shemasyny görkezeliň:



Sirketurşuly  
holesterin



Paraaminkoriçli turşusynyň  
etil efiranizoly

## VIII BAP

### GATY HALDAKY FAZA ÖWRÜLMELERI

#### §22. Fazalaryň durnuklygy. Faza geçişlerde fazaara araçäkleriň roly.

##### a)Fazalaryň durnuklygy we gaty halda faza öwrülmeleriniň mehanizmi.

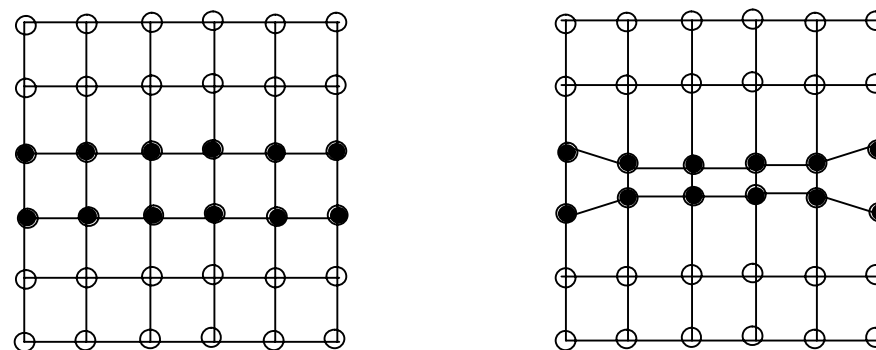
Faza öwrülmeleriniň nazaryýetini guranymyza faza halyň we öwrülmäniň mehanizmine seretmek zerurdyr. Faza öwrülmeleriniň sebäbi daşky täsirleriň astynda fazalaryň durnuklygynyň üýtgemeginden bolup durýar. Meselem, kesgitli temperatura ýaýladaky durnukly faza temperaturanyň peselmegi ýa-da ýokarlanmagy bilen durnuksyz bolýar.

Gibbs tarapyndan döredilen deňagramlyk nazaryýeti termodinamiki ululyklar bilen iş çalyşýar we fazalaryň durnuklygynyň derňewi bu ululyklaryň atomlaryň we molekulalaryň häsiýetleriniň üsti bilen aňladylýar. Munuň ýaly meseläniň takyk çözüwi ýeňip geçmedik kynçylyklar bilen baglydyr, sebäbi tolkun deňlemeleri öz içinde  $\sim 10^{22}$  sany üýtgeýän ululyklary saklaýarlar. Adatça kristallik gurluşlaryň hatda göräli durnuklygyny hem önünden kesgitlemek mümkin däl, sebäbi gaty haldaky faza geçişleriň ýylylygy gaty jisimiň baglansyk energiýasynyň 1%-e barabardyr.

Faza geçişleriň mehanizminiň nazary derňewi belli bir modelleriň peýdalanmasyna esaslanýar. Bu halatda takmynan usullaryň ulanmaklygy amatlydyr, sebäbi kinetik häsiýetleri atomara güýçleriniň häsiýetine deňagramly

döredýär. Zolagyň esasy aýratynlygy – matrisa bilen araçägiň ýokdugy. Şonuň üçin zolaga faza diýip bolmaýar (Faza düşünje üçin araçägiň bolmaklygy zerurdyr).

Ginýe-Preston zolaglary iki topara bölünýärler: matrisany ýoýmadyk zolaglar we matrisany ýoýmadyk zolaglar. 65 - nji çyzgyda Ginýe-Prestonyň deňişli modelleri görkezilipdir.



65 - nji çyzgy

Pes temperaturaly köpeltmegiň başlangyç döwürlerinde garyndynyň gatylygynyň artmagyna **dispersion** gatalma diýilýär.

#### §24. Atom – kristallik gurluşyň tertipleşmegi.

Atom – kristallik gurluşyň tertipleşme hadysasy 1914-nji ýylda N.Kurnakow, S.Žemçužnyý we M.Zasedatelew tarapyndan açylypdy.

*Au – Cu* garyndylaryň elektrik garşylygyny derňände şu garyndylardan inçe sim taýýarlamakda kynçylyklar döredi: *AuCu* we *AuCu<sub>3</sub>* birleşmeleriň düzümine golaý



Gaty erginiň bölünmegi aşakdaky görnüşlerden ybarat:

**a) Gomogen we geterogen bölünme.**

Gomogen bölünme kristalliki gurluşyň şikeslersiz fazanyň bölünip çykmagyny aňladýar (ýagny dislokasiýalarsyz, gaplama şikeslersiz, dänejikleriň araçäkleri bolmadyk halatlarda).

Gomogen bölünme fazanyň şikesli bölünip çykmagyny aňladýar. Gurluş wakansiýalar şikewleriň sanawyna girenok. Oly nazara alsak, onda fazanyň bölünip çykmagy mydama geterogen bolar, sebäbi wakansiýalar bölünip çykýan fazanyň merkezleriniň (klasterleriň) emele gelmeginde işjeň rol oýnaýar.

**b) Bîrfazaly we ikifazaly bölünme.**

Logika nukdaý nazardan bu adalgalar umuman nädogrydyr, sebäbi bölünýän garyndyda iň azy iki faza bar.

**ç) Üznükli we üznüksiz bölünme.**

Eger matrisanyň gözeneginiň parametri böküp üýtgeýän bolsa, onda munuň ýaly bölünmäniň görnüşi üznükli diýip atlandyrylýar. Eger-de matrisanyň gözeneginiň parametri, ýagny düzümi üznüksiz üýtgeýän bolsa, onda bölünme üznüksiz diýip atlandyrylýar.

**d) Bölünmäniň zolag döwri.**

Könelmäniň başlangyç döwürlerinde käbir erginlerde, meselem,  $Al - Zn$ ,  $Al - Ag$ ,  $Al - Cu$ ,  $Cu - Be$  we başg. Ginýe-Preston atlandyrylýan zolaglar döreýär. Ginýe-Preston zolagy – kristallik gurluşynyň bozulmasynyň lokal ýaýlasydyr. Ol konsentrasiýanyň we gözenegiň düwünlerine görä atamlaryň süýşmesiniň hasabyna

häsiýetlerine görä durnuklygy kiçidir. Bir zady bellemek gerek: eger-de ulgamyň ýagdaýlaryny ýazyp beýan edende gurluş şikesleri (wakansiýalar, ornaşdyrylan atomlar, dislokasiýalar, dänejikleriň araçäkleri) kiçi rol oýnaýan bolsalar, öwrülmäniň mehanizmine olaryň täsiri uly bolup biler.

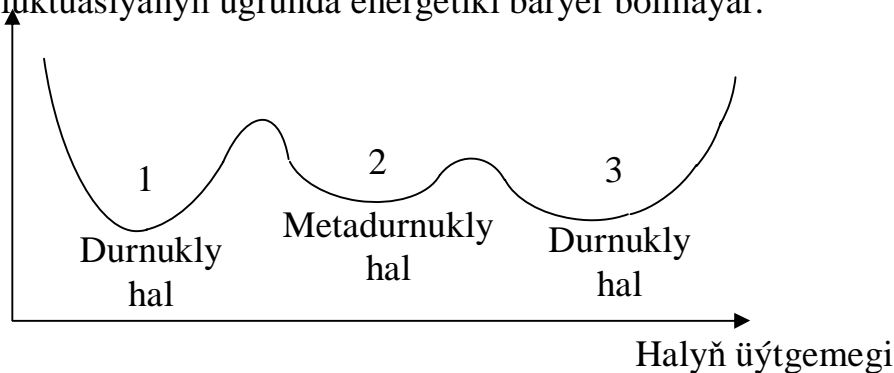
Islendik faza öwrülmelerde gaty halda ulgamyň atom gurluşynyň täzedan gurulmasy amala aşyrylýar. Gaty halda gurluşyň täzedan gurulmasy faza öwrülmeleri däl prosesslerde hem bolup bilýär, mysal üçin rekristallaşmada, plastik deformasiýada, typmada, goşalamakda. Munuň ýaly prosessler faza öwrülmelerine tapawutlylykda kristallik gözenegiň täzedan gurulmasynyň sebäbi bolup durýar: atomlar üst ýa-da maýyşgak güýçleriň, daşky naprýaženiýanyň täsiri astynda täze orunlaryny tutýarlar. Bu halatda atamlaryň termodinamiki potensialygynyň tapawutlylygy uly rol oýnamaýar.

Termodinamiki potensial  $\rho$  we  $T$  hemişeliklerde iki minimumdan köp bolan halata seredeliň (62 - nji çyzgy). Has durnukly hallar iki çuň minimumlara degişli 1 we 3 hallardyr. Ownuk minimuma degişli 2 hal metadurnuklydyr.

Metadurnukly hallar tejribeçilikde edil deňagramly hallar ýaly we çäksiz wagtda, hususan pes temperaturalarda bolup bilýärler. Meselem, bürünç asyryndan ýasalan şaýlar şu waga çenli galypdyr.

Metadurnukly ulgam düzümiň sähelçe üýtgemegine durnuklydyr, sebäbi deňagramlyk ýagdaýyna geçmek üçin potensial barýeri ýeňip geçmeli. Ýagdaý absolýut durnuksyz hasap edilýär, eger-de islendik tükeniksiz kiçi

fluktuasiýa termodinamiki potensialy peseldýär we berlen fluktuasiýanyň ugrunda energetiki baryýer bolmaýar.



62 - nji çyzgy

Fazalaryň durnuklygyny öwrenip, Gibss fluktuasiýalaryň iki görnüşini tapawutlandyryýar: örän kiçi lokal ýaýdalaryň çäklerinde radikal atom täzedan üýtgedip gurmaklyga jogap berýän fluktuasiýalar we uly göwrümde örän kiçi atom täzedan üýtgedip gurmaklyga jogap berýän fluktuasiýalar. Faza öwrülmeleriň köpüsi – gaty erginiň bölünmegi, ewtektoidli, martensit öwrülmeler – ulgamyň birinji görnüşli fluktuasiýalara durnuksyzlygy bilen düşündirilýär we fiziki taýdan täze fazanyň emele gelmegi bilen başlanýar (dörediş prosessi), soňra bolsa öwrülmä sezewar bolan ýaýlalar olaryň daş töweregindäki metastabil fazanyň içinde ösýärler (ösüş prosessi). Degişli öwrülmeler geterogendirler, sebäbi öwrülme wagtda ulgamda dürli gurluşly ýa-da düzümlü makroskopiki ýaýlalar bolýar, hatda başlangyç we ahyrky ýagdaýlar bir fazaly bolsa.

Haçan-da ulgam ikinji görnüşli fluktuasiýalara görä durnuksyz bolsa, ähli göwrümde bir wagtda gomogen

bolan ulgamda durnukly B – fazany taplamanyň üsti bilen (64 - nji çyzgydaky 1,2,3 dik çyzyklar) pes temperaturada metadurnukly hala geçirip bolýar. Bu metadurnukly faza aşakdaky shema boýunça bölünýär.

$$1. \beta_{met.} \rightarrow \beta_{deñ.} + \alpha_{deñ.}$$

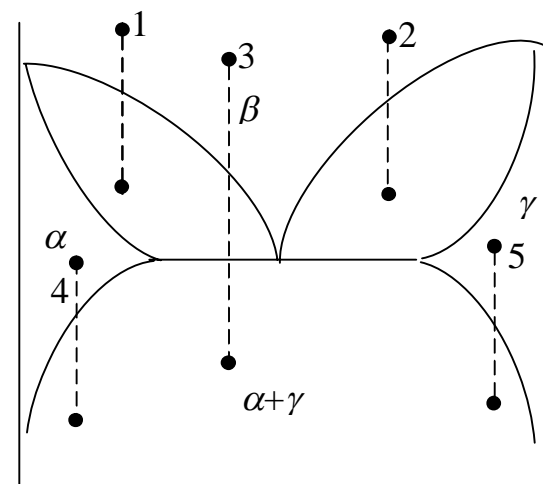
$$2. \beta_{met.} \rightarrow \beta_{deñ.} + \gamma_{deñ.}$$

$$3. \beta_{met.} \rightarrow \alpha_{deñ.} + \gamma_{deñ.}$$

Mundan başga, metastabil (metadurnukly gaty erginleri A komponentiň esasynda ( $\alpha$ -faza) we intermetalliki birleşmäniň  $A_nB_m$  esasynda ( $\gamma$ -faza) taplamanyň kömegi bilen bir fazaly ýaýlalardan alyp bolar (64 - nji çyzgydaky 4 we 5 dik çyzyklar). Soňky bölünme aşakdaky shema boýunça geçýär:

$$4. \alpha_{met.} \rightarrow \alpha_{deñ.} + \gamma_{deñ.}$$

$$5. \gamma_{met.} \rightarrow \gamma_{deñ.} + \alpha_{deñ.}$$



64 - nji çyzgy

öwrülmeleriniň üçünji topary ulgamyň ölçeğinde komponentleriň täzeden paýlanylyşyny talap etmeýär we diffuzion däl prinsip boýunça amala aşyrylýar, meselem, martensit öwrülmelerde atomlaryň kooperatiw süýşme hereketiniň hasabyna.

Ýokarda görkezilen faza öwrülmeleriniň toparlara bölünmeginiň käbir şertliligi görünýär:

Bir tarapdan, öwrülmeleriň gomogen we geterogen ýa-da diffuzion we diffuzion däl toparlara bölünmegi esaslydyr, sebäbi kiçi fluktuasiýalara görä ulgamyň durnukly dældiginiň tebigatynyň üstüni açýar, ýa-da kristallik gözenegiň täzeden gurmaklygynyň mehanizmi barada maglumat berýär.

Emma başga tarapdan, şunyň ýaly bölünme adaty terminologiýa bilen gabat gelmeýär.(aýratyn toparlara gaty erginiň bölünmegini, martensit öwrümlerini, allotropik öwrülmelerini we ş.m. bölünmegi).

Meselem, eger-de gaty erginiň bölünmegi bölünip çykýan faza bölejikleriň döremegi we olaryň ösüşi bilen bagly bolsa, ýagny geterogen görnüşli öwrülmä degişli bolsa, onda şol ulgamda we hatda edil şonuň ýaly düzümlü garyndylarda, ýöne pes temperaturaly ýaýlada geçýän spinoidal bölünme gomogen görnüşli öwrülmä degişlidir.

## 2.Gaty erginiň bölünmegi.

Goşa ulgamyň termodinamiki potensialy temperaturanyň, basyşyň we konsentrasiýanyň funksiýasydyr.Köp sany ulgamlarda ýokary temperaturaly ýaýlada durnukly halda bir fazaly gaty ergin bolup biler, aşakgy temperaturaly ýaýlada bolsa deňagramlylykda iki fazaly hal bolup bilýär.Taplamanyň üsti bilen gaty erginiň halyny üýtgedip bolýar.Meselem, ewtektoidli öwrülmä eýe

öwrülme amala aşyrylýar. Gomogen öwrülmelere zerur bolan şertler spinoidal bölünmekde we käbir tertip-tertipsizlik geçişlerde berjaý edilýär.

## b) Faza geçişlerde fazalara araçäkleriň roly.

Gaty haldaky faza öwrülmeleriň aýratynlygy fazaara araçäkler bilen baglydyr. Geterogen öwrülmelerde maýyşgak we üst energiýalaryň goşandyny bölünip çykýan fazanyň düwünjeginiň kritiki ölçeğini we düwünjekleriň döremeginiň tizligini kesgitleýär.

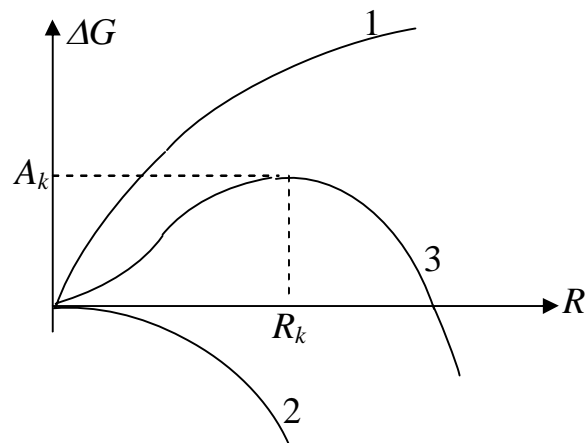
Gelin kristalliki matrisada deňölçegli ýa-da metastabil fazanyň öz-özünden emele gelmegine seredeliň. Radiusy  $R$  bolan sferiki görnüşli düwünjek üçin termodinamiki potensiyalyň üýtgemegi göwrüm, üst we maýyşgak energiýalaryň üýtgemegi bilen bagly bolan 3 sany agzanyň jeminden durýar:

$$\Delta G = \Delta G_{göwrüm} + \Delta G_{üst} + \Delta G_{\varepsilon} = -\frac{4}{3}\pi R^3 g_g + 4\pi R^2 \gamma_s + \frac{4}{3}\pi R^3 \varepsilon_g \quad (20.1)$$

Bu ýerde  $g_g$  –termodinamiki potensialyň udel üýtgemegi,  $\varepsilon_g$  –udel maýyşgak energiýa;  $\gamma_s$  –üst energiýa.

62 çyzgyda bölünip çykýan bölejigiň radiusyndan  $\Delta G$  ululygyň baglylygy görkezilen ( $g_g > 0$  we  $\varepsilon_g = 0$  halatlar üçin).  $g_g < 0$  halat birfazaly durnukly hala degişlidir, sebäbi energetiki taýdan täze fazanyň bölünip çykmagy amatly däl, çünki (6.1) aňlatmada 3 agzalaryň hemmesi noldan uludyr.

Birinji egri  
fazaara araçägiň  
meýdanynyň  
ulalmagynda  
termodinamiki  
potensialyň ulalmagyny  
görkezýär. Ikinji egri  
fazanyň matrisasyna  
deňşdireniňde  
durnuklyrak fazanyň  
emele gelmeginiň  
hasabyna  
termodinamiki



63 - nji çyzgy

Üçünji jemleýji egri ulgamyň termodinamiki potensialynyň üýtgemeginiň düwünjeginiň ululygyna baglylygyny görkezýär. Egriniň maksimumy düwünjeginiň  $R_k$  kritiki ululygyny kesgitleýär.  $R_k$  –nyň köpelmegi bilen bölünip çykýan faza bölejigiň ösüşi amatly bolýar.

Düwünjeginiň kritiki ululygyny  $\Delta G$ -nyň maksimal şertinden tapyp bolar.

$$\frac{d\Delta G}{dR} = -4\pi R^2 g_g + 8\pi R\gamma_s + 4\pi R^2 \varepsilon_g = 0$$

$$R_k = \frac{2\gamma_s}{g_g - \varepsilon_g} \quad (20.2)$$

$A_k$  energetiki barýeriň (päsgelçiligiň) ululygy asäkdaky aňlatmadan tapylýar:

$$A_k = \frac{16\pi\gamma_s}{3(g_g - \varepsilon_g)^2} \quad (20.3)$$

Kritiki radius we energetiki barýer  $\gamma_s$  we  $\varepsilon_g$  artmagy bilen ösýärler, ýagny üst we maýyşgak energiýalar bir fazaly haly stabilleşdirýär (durnuklaşdyrýar) we tersine, üst energiýanyň azalmagy bilen kritiki düwünjeginiň we energetiki barýeriň ululyklary hem azalýar. Çäkde barýer doly ýitýär we öwrülme şunlukda gomogen bolýar.

### §23. Diffuzly däl we diffuzly faza öwrülmeleri. Gaty erginiň bölünmegi.

#### 1. Diffuzly däl we diffuzly faza öwrülmeleri.

Indiki faza öwrülmeleriniň klassifikasiýasy ulgamyň başdaky we ahyrky faza düzüminiň deňşdirmeginiň esasynda geçirilýär. Faza öwrülmäniň önümi başlangyç (matrisa) fazadan tapawutlylykda bolup biler:

1) Gözenekde atomlaryň koordinasiýasy saklanmagynda düzümi bilen (gaty erginiň izogurluşly bölünmegi).

2) Gurluşy we düzümi bilen (ewtektoidli bölünme, artykmaç fazanyň bölünip çykmaklygy).

3) Kristalliki gurluş bilen, ýagny atomlaryň gözenekde koordinasiýasy bilen (martensit we massiw öwrülmeler, atom-kristallik gurluşyň tertipleşmegi).

Faza öwrülmeleriniň birinji iki topary matrisa fazanyň düzüminden tapawutly düzümlü fazalaryň emele gelmegi bilen häsiýetlenýär. Munyň ýaly öwrülmeler diffuzion mehanizm boýunça amala aşyrylýar. Faza

Atomlaryň tertipli ýerleşmeginiň emele gelmegi  $A_nB_m$  gurluşly gaty erginlerde mümkindir.  $Au - Cu$  ulgamyň gaty erginleri elementar öýjüginde 4 sany atomdan ybarat bolan gyrany – merkezleşen gözenege eýedirler.

$AuCu_3$  garyndylarda altynyň atomlary elementar öýjügiň depelerinde misiňki bolsa gyranlaryň merkezlerinde ýerleşýärler (69a - çyzgy).  $AuCu$  garyndylarda tertipleşme misiň we altynyň atomlarynyň gatma-gat gezekleşmeginiň hasabyna döreýär. Netijede gözenegiň kubiki simmetriýasy tetragonal simmetriýa çenli peselýär. (69b - çyzgy)

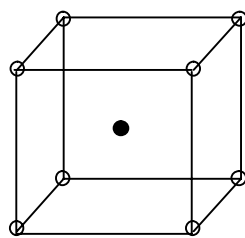


### 69 - nji çyzgy

Tetragonal gurluşda gözenegiň parametrleriniň gatnaşygy deňdir  $c/a = 0,93$ .

$\beta$  - latun elementar öýjüginde iki sany atomdan ybarat bolan göwrümmerkezleşen gözenege eýedir. Göwrümmerkezleşen iki ýarygözenek bölüp aýyrmak bolar. Tertipleşende misiň atomlary ýarymgözenegiň birini, sinkiň bolsa – beýlekini eýeleýärler (70 - nji çyzgy). Şunlukda kubiki simmetriýa saklanýar.

Bölekleyin tertipleşen hal “S” uzak tertipleşme derejesi bilen häsiýetlenýär. Ol ýarymgözeneklerdäki atomlaryň ýerleşmeginiň ähtimallygyna proporsionaldyr.

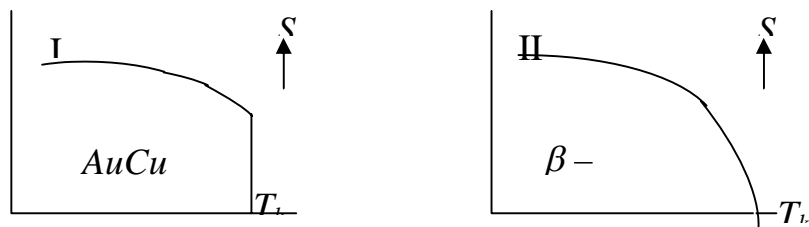


70-nji çyzgy

Uzak tertipleşme derejesi 1-den doly tertipleşen hal üçin O-a çenli doly tertipleşen hal üçin çäklerde üýtgeýär.

Erginleriň tertipleşen haly içki energiýanyň pes bahasyna degişlidir. Munuň ýaly hal deňagramly ýagdaýynda bolýar. Ýokary temperaturalarda atomlaryň tertipleşmesine atomlaryň ýylylyk hereketi we diffuziýa päsgel berýär. Ýylylyk hereketiniň intensiwligi temperaturanyň artmagy bilen artýar, şonuň üçin “S” uzakdaky tertipleşme derejesi garyndynyň temperaturasyna baglydyr. Tejribe ýol bilen uzak tertipleşme derejesini aşagurluşly çyzyklaryň intensiwliginden tapyp bolýar.

71 - nji çyzgyda  $AuCu_3$  we  $\beta - CuZn$  üçin uzak tertipleşme derejesiniň temperatura bagly üýtgemegi görkezilipdir.  $AuCu_3$  üçin  $T_k$  kritiki nokatda S böküp üýtgeýär (I-nji jynsly faza geçişi).



71 - nji çyzgy

15. Т.М.Юсупов., структура и физика-механические свойства механических свойств. Ашгабад.ТГУ., 1987 г.

16. Т.М.Юсупов., Магнитные и электрические свойства упорядочивающихся сплавов., Ашгабад.ТГУ.,1977 г.

17. Г.Мяликгулыев, Д.Ходжагулыев, М.Аннаоразов. Магнитные и электрические свойства пленок упорядочивающихся сплавов. Ашгабад "Ылым", 1985 г.

18.Ýusupow T.M. "Gaty jisimleriň fizikasyna giriş" umumy sapaklaryň yazgylary. Aşgabat, TDU, 2010

## EDEBIÝAT

1. Gurbanguly Berdimuhamedow. Ösüşin täze belentliklere tarap. Saýlanan eserler. 1 - nji tom. Aşgabat, 2008
2. Gurbanguly Berdimuhamedow. Ösüşin täze belentliklere tarap. Saýlanan eserler. 2 - nji tom. Aşgabat, 2009
3. П.В. Павлов и А.С. хохлов, "Физика твердого тела", М., Высшая школа, 2000 г.
4. Г.С.Жданов, А.Г.Хунджа. Лекции по физике твердого тела. М.МГУ., 1988 г.
5. Н. Ашкрофт, Н.Мермин. Физика твердого тела. Т1,2 М., Мир, 1979 г.
6. А.А.Абрикосов. основы теории металлов. М., Наука, 1987 г.
7. В.Л.Бонч-Бруевич, С.Г.Калашников. Физика Полупроводников. М., Наука, 1979 г.
8. Г.С.Кринчик. Физика магнитных явлений. М., МГУ, 1985 г.
9. Ч.Киттель. Введение в физику твердого тела. М., Наука, 1978 г.
10. В.В.Шмидт. Введение в физику сверхпроводимости. МЧ НМО., М., 2000г.
11. Дж.Займан. Принципы теории твердого тела. М., Мир., 1974 г.
12. Ч.Уэрт, Р.Томсон. Физика твердого тела. М., Мир., 1974 г.
13. С.В.Вонсовский. Магнетизм. М., Наука., 1974 г.
14. Р.Г.Аннаев. Магнетизм. Ашгабад "Ылым", 1977 г.

$\beta - CuZn$  üçin  $S$  temperatura bilen üznüksiz üýtgeýär (II-nji jynsly faza geçişi).

Eger garyndynyň düzümi stehiometrik düzüminden gyşarsa, onda doly tertipleşme ýagdaýyň döremegi mümkin däl. Netijede konsentrasion tertipleşmesi döreýär, ýagny stehiometrik düzüminde maksimal mümkin bolan görä gurluşyň uzak tertipleşme derejesiniň peselmegi.

### §25. Uzakdaky tertipleşmäniň nazaryýeti.

Ulgamyň tertipleşen ýagdaýyny ýazyp beýan edýän zerur bolan esasy ululyklary girizeliň.  $A-B$  çalşyрма goşa ergine seredeliň. Gaty erginiň kristallik gözeneginde iki ýarymgözenek emele getirýän  $\alpha$  we  $\beta$  düwünleriň iki sany toplumyny bölüp aýyralyň. Tertipsiz ýagdaýynda ýarymgözenekler belli sortly atomlar bilen deň ähtimallyk bilen doldurylýar, tertipli ýagdaýynda bolsa – esasan bir sortly atomlar bilen. Meselem,  $\alpha$  ýarymgözenek  $A$  komponentiň atomlary bilen doldurylýar.  $A$  we  $B$  atomlaryň konsentrasıýalaryny  $C_A$  we  $C_B$ ,  $\alpha$  we  $\beta$  düwünlerinki bolsa  $C_\alpha$  we  $C_\beta$  bilen belgiläliň. Onda

$$C_A + C_B = 1, \quad C_\alpha + C_\beta = 1 \quad (21.1)$$

Çalşyрма gaty erginde atomlaryň  $N$  umumy sany kristallik gözeneginiň düwünleriniň umumy sanyna deň:

$$N_A = C_A N, \quad N_B = C_B N \quad (21.2)$$

Düwünleriň  $\alpha$  we  $\beta$  sanlary:

$$N_\alpha = C_\alpha N, \quad N_\beta = C_\beta N \quad (21.3)$$

$AB$  we  $A_3B$  garyndylarda geçýän hususan iki halatlar wajypdyr:  $C_\alpha = 1/2$  we  $C_\beta = 1/4$ . Doly tertipleşme gurluş

atomlaryň sany düwünleriň sanyna deň bolan halatlarda mümkindir:

$N_A = N_\alpha$ ,  $N_B = N_\beta$ , bu bolsa konsentrasiýalaryň gatnaşygyna getirýär:

Bu bolsa konsentrasiýalaryň gatnaşygyna getirýär:

$$C_A = C_\alpha, \quad C_B = C_\beta$$

Bu gatnaşyklar tertipleşme garyndylaryň mümkin bolan stehiometrik düzümlerini anyklaýarlar.

Goşa garyndylarda tertipleşmäni doly ýazyp beýan etmek üçin atomlaryň ýarymgözenekler boýunça paýlalyşyny seretmek ýeterlikdir, mysal üçin A tipli atomlaryň.

Eger gaty erginiň kristallik gözenegi iki sany ýarymgözeneklerden ybarat bolsa, onda A atomlaryň paýlanlyşy olaryň ýarymgözenekdäki düwünlerinde bardygynyň “P” ähtimallylygyň berilmegi bilen kesgitlenýär. P ähtimallyk  $P_{\min.} = C_A = C_\alpha$  tertipleşilmedik garyndy üçin  $P_{\max.} = 1$  doly tertipleşen garyndy üçin aralykda üýtgeýär.

Tertipleşmäniň mukdar häsiýetnamasy üçin uzakdaky tertipleşme derejesini ulanýarlar:

$$S = \frac{P - P_{\min}}{P_{\max} - P_{\min}} = \frac{P - C_\alpha}{1 - C_\beta} \quad (21.4)$$

Uzadaky tertipleşmäniň derejesi goşa garyndylar üçin stehiometrik düzümine we kristallik gözenegiň görnüşine bagly bolan, 0-dan 1-e çenli üýtgeýär.

P ähtimallyk uzakdaky tertipleşmäniň derejesiniň üsti bilen aşakdaky formula bilen aňladylýar:

$$P = C_\alpha + S(1 - C_\alpha) \quad (26.5)$$

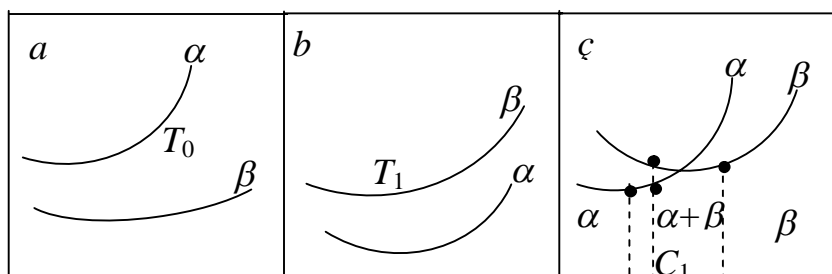
Adatça fazalaryň deňagramlylygyna golaý temperaturalarda diffuziýasyz öwrülmeler dänejikleriň döremeginiň we olaryň ösüşi bilen geçýärler, ýagny kiçi aş sowadylmalarda massiw öwrülmeler geçýär, uly aş sowadylmalarda martensit mehanizmi öz ornuny tapýar. Şonuň üçin arassa metallaryň köpüsünde taplamanyň üsti bilen ýokary temperaturaly gurluş halyny fiksirläp mümkin däl. Diňe galaýyda we marganesde olaryň çylşyrymly kristallik gurluşly bolandygy sebäpli martensit öwrülme mümkin däl.

Litiýde we natriýde allotropiki öwrülmäniň temperaturasy örän pes bolandygy sebäpli geçiş mydama martensitlidir.



$\beta_{\text{durn.}} \rightarrow \alpha_{\text{durn.}}$  (sur.27.3b) öwrülmesine getirýär.  $T_2$  aralyk temperaturada ( $T_0 > T_2 > T_1$ ) B elementiň kiçi konsentrasiýalar ýaýlasýnda  $\alpha$  –faza deňagramly bolýar, uly konsentrasiýalar ýaýlasýnda bolsa  $\beta$  –faza  $\alpha$  we  $\beta$  birlazaly ýaýlalar  $\alpha + \beta$  deňagramlylygyň ikifazaly ýaýlasy bilen bölünen.

$T_0$  –dan  $T_2$  –ä çenli sowadylanda  $C_1$  düzümlü gaty ergin iki fazaly  $\beta \rightarrow \beta_{\text{deň}} + \alpha_{\text{deň}}$  halyna geçmeli.



#### 74 - nji çyzgy

Çalt sowadylanda (diffuziýa geçmek ýaly sowadylanda)  $\beta$  doýgun gaty erginiň bölünmegi mümkin däl. Muňa garamazdan ulgam öz termodinamiki potensialyny

$\beta \rightarrow \alpha_{\text{met.}}$  geçişde peseldip bilýär.

Bu halatda metadurnukly  $\alpha$  –faza emele gelýär.

$\beta_{\text{durn.}} \rightarrow \alpha_{\text{durn.}}$  we  $\beta_{\text{durn.}} \rightarrow \alpha_{\text{met.}}$  gaty erginde durnukly we metadurnukly fazalaryň emele gelmeginde massiw öwrülmeleriniň mysaly bolup biler (atomlaryň kooperativ süýşmesi bolmadyk halatda).

$\alpha$  we  $\beta$  ýarymgözeneklerde ýerleşýän A we B atomlaryň sanyny tapalyň:

$$\begin{cases} N_{\alpha}^A = PN_{\alpha} = C_{\alpha} PN, \\ N_{\beta}^A = N_{\alpha} - N_{\alpha}^A = C_{\alpha} N - C_{\alpha} PN = C_{\alpha} (1 - P)N \\ N_{\alpha}^B = N_{\alpha} - N_{\alpha}^A = C_{\alpha} (1 - P)N \\ N_{\beta}^B = N_{\beta} - N_{\beta}^A = (1 - P)N - C_{\alpha} (1 - P)N = (1 - 2C_{\alpha} + C_{\alpha} P)N. \end{cases} \quad (21.6)$$

$N_{\alpha}^B = N_{\beta}^A$  deňligiň sebäbi: A atomyň  $\alpha$  düwünden  $\beta$  düwüne ornuny üýtgemegi B atomyň  $\beta$  düwünden  $\alpha$  düwüne ornuny üýtgemesi bilen birlikde geçýär. Netijede alarys:

$$N_{\alpha}^A + N_{\alpha}^B + N_{\beta}^A + N_{\beta}^B = N \quad (21.7)$$

Ulgamyň deňagramly ýagdaýy termodinamiki “g” potensialyň iň kiçi ululygy bilen kesgitlenýändigini sebäpli, temperaturaly tertipsizlenmegi düşündirmek üçin “g”-ni uzakdaky tertipleşme derejesiniň üsti bilen aňlatmaly we  $g = g(s)$  funksiýany derňäp, uzakdaky tertipleşme derejesiniň temperatura baglylygyny almaly.

Içki energiýanyň konfigurasion bölegi aşakdaky görnüşde ýazylýar:

$$E_k = n_{AA} E_{AA} + n_{BB} E_{BB} + n_{AB} E_{AB},$$

bu ýerde  $n_{AA}, n_{BB}, n_{AB}$  – atomlaryň deňgizlikdäki jübüt sanlary ýa-da A-A, B-B, A-B görnüşli baglanyşyklaryň sanlary.

Ähli baglylyklaryň doly sany

$$n = \frac{1}{2}NZ = n_{AA} + n_{BB} + n_{AB} \quad (21.8)$$

bu ýerde  $Z$  – koordinasion san,  $N$  – kristalldaky atomlaryň umumy sany. Baglanyşyklaryň sanyny hasaplamak üçin kristally atomlaryň üstünden kesip geçýän tekizliklere böleliň. Onda aýratyn baglanyşygyň her bir ujuna  $1/z$  atomyň bölegi düşer.  $A$  we  $B$  atomlaryň mukdarynyň saklanmak şertleri bize berýär:

$$N_A = C_A N = 2 \left( \frac{1}{z} \right) n_{AA} + \frac{1}{z} n_{AB} \quad (21.9)$$

$$N_B = C_B N = 2 \left( \frac{1}{z} \right) n_{BB} + \frac{1}{z} n_{AB}$$

$N$  – i (9.8) –den tapyp we (9.9)-da goýup, alarys:

$$n_{AA} = C_A n - \frac{1}{2} n_{AB}; \quad n_{BB} = C_B n - \frac{1}{2} n_{AB} \quad (21.10)$$

Soňky gatnaşygy nazara alyp, içki energiýanyň konfigurasion bölegi üçin aşadaky aňlatmany alarys:

$$E_k = C_A N E_{AA} + C_B N E_{BB} + n_{AB} E_{tert.} = E_A + E_B + n_{AB} E_{tert.} \quad (21.11)$$

bu ýerde  $E_{tert.} = E_{AB} - \frac{1}{2}(E_{AA} + E_{BB})$  – tertipleşmäniň energiýasy.

(26.11) aňlatmadaky birinji iki agza – hemişelik ululyklardyr. Olar ýarymgözeklerdäki atomlaryň paýlanylyşyna bagly däl. San boýunça olar gaty erginden bölünip çykýan arassa komponentleriň kristallarynyň energiýalaryna.

Üçünji agza ýarymgözeklerdäki atomlaryň paýlanylyşyna baglydyr, ýagny uzakdaky tertipleşme

ýagdaý amala aşyrylýar, täze fazanyň dänejikleri bolsa erkin görnüşli massiwlerdir.

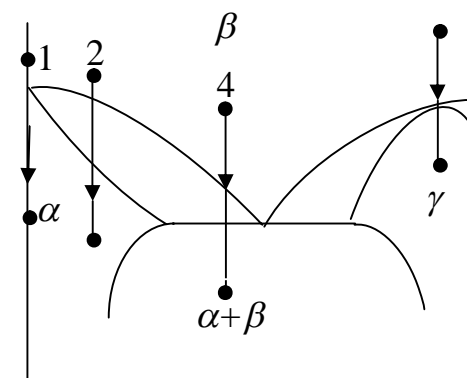
Massiw öwürlmeler arassa elementlerde, stehiometrik düzümlü birleşmelerde gaty erginlerde bolup bilýärler.

73 - nji çyzgyda durnukly (1,2,3) we metadurnukly (4) fazalaryň emele gelmeginde massiw wrülmeleriň shemasy görkezilen.

Termodinamikanyň nukdaý nazaryna görä täze fazanyň diffuziýa emele gelmegi ulgamyň diňe termodinamiki potensialynyň peselmek halatynda amala aşyrylýar. Geliň  $\alpha$  we  $\beta$  fazalara degişli Gibbsyň iki şahaly termodinamiki potensialy goşa ulgamyna seredeliň (74a - çyzgy).

Ýeterlik ýokary  $T_0$  temperaturada  $\alpha$  we  $\beta$  fazalaryň özara ýerleşmeginde ähli konsentrasiýa ýaýlasynada deňagramly  $\beta$  –faza bolup durýar (74b - çyzgy). Pes  $T_1$  temperaturada energetiki taýdan  $\alpha$  –faza amatlydyr.

Ulgamyň  $T_0$ -dan  $T_1$ -e çenli sowadylmagy



73 - nji çyzgy

1949-njy ýylda G.W.Kurdýumow we L.G.Handros **termomaýyşgak martensit** atly hadysany açdylar. Olaryň pikirlerine görä göni öwrülmede (austenit – martensit) dörän lokal deformasiýa doly aýrylýar, ters öwrülme prosesinde, sebäbi  $\gamma - \alpha$  täzedan gurma prosesi  $\alpha - \gamma$  öwrülmede (martensit – austenit) takyk gaýtalanýar.

Bu effekt tejribeçilikde örän möhüm effektdir, sebäbi onuň esasynda garyndylaryň täze görnüşi döredildi – **görnüşi ýatda saklaýyş effekte** eýe bolan garyndylar.

Eger garyndyny  $A_b$  martensit haldaky temperaturadan aşakgy temperaturalarda deformirlesek (egreltsek ýa-da towlasak), soňra  $A_b$  (ters martensit öwrülmeňiň başlanýan nokady), temperaturadan ýokary temperatura çenli gyzdysak, onda garyndy özüniň öňki görnüşine gelýär.

Tejribelikde görnüşi ýatda saklaýyş effekti 1961-nji ýylda amerikaly alymlar Ni – Ti (50at% Ni, 50 at% Ti) garyndysynda peýdalandylar. Soňky döwürde bu effekt başga-da köp sanly garyndylarda açyldy we derňeldi ( $Fe-Ni$ ,  $Cu-Al$ ,  $Cu-Mn$ ,  $Au-Cd$ ,  $Cu-Al-Ni$ ,  $Co-Ni$ ,  $Ni-Al$ ,  $Cu-Zn-Al$  we başg.).

#### b) Massiw öwrülmeler.

Öwrülmeňiň martensit mehanizmi diffuziýasyz geçýän faza haldaky **normal kinetiki** atly öwrülmeler, ýagny suwuklyklardaky ýaly kristallaşma prosesslere meňzeş wagty we temperatura bagly bolan dürli tizlik bilen geçýän öwrülmeler hem fazalaryň arasyndaky komponentleriň täzedan paýlanyşsyz geçip bilýärler. Munuň ýaly öwrülmeleriň görnüşi **massiw** öwrülme diýip atlandyrylýar. Massiw öwrülmeňiň netijesinde birfazaly

derejesiniň funksiýasy uzakdaky  $CuZn$  garyndy üçin  $n_{AB}$  baglanyşyklaryň sanynyň uzakdaky tertipleşme derejesinden baglylygyny tapalyň.  $CuZn$  garyndynyň gözeneginde  $\alpha$  düwüniň ähli iň golaý goňşulary  $\beta$  – düwünlerdir we tersine.  $P$  we  $1 - P$  ähtimallyklara proporsional bolan  $A$  we  $B$  atomlar bilen doldurylan  $\alpha$  – düwünler üçin goňşy  $\beta$  – düwünlerini doldurylan  $B$  atomlaryň sanyny hasaplamak gerek,  $B$  atomlar bilen doldurylan  $\alpha$  – düwünler üçin  $A$  goňşy atomlaryň sanyny hasaplamaly.

Bu iki sanlaryň jemi dürli hilli baglanyşyklaryň sanyny berýär:

$$n_{AB} = N_{\alpha} p Z_p + N_{\beta} (1-p) Z (1-p) = \frac{1}{2} N Z [p^2 + (1-p)^2] = \frac{1}{2} n (1+s^2)$$

Dürli hilli baglanyşyklaryň sany  $AuCu$  we  $AuCu_3$  garyndylar üçin deňişlilikde deňdir:

$$\frac{1}{6} [n(3+s^2)], \quad \frac{1}{8} [n(3+s^2)]$$

Hemme halatlarda  $n_{AB}$   $S$  – iň kwadratyna bagly.

Tertipleşme hadysasy ornaşdyрма gaty erginde hem bolup biler.

Kurnakowyň temperaturasyndan ýokarda uzak tertipleşme bolmaýar. Bu halatda atomlaryň paýlanyşyklarynyň esasy kanunçylygyny ýazyp beýan etmek üçin golaýdaky tertipleşme nazaryýetinden peýdalanmaly.

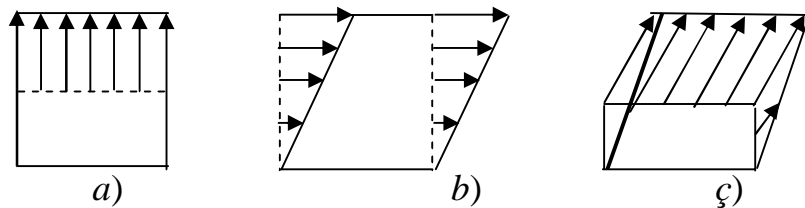
## §26. Martensit we massiw öwrülmeleri.

Gaty erginiň bölünmeginiň mehanizmi suwuk erginiň kristallaşmasyňa meňzeşdir: iki halatlara döreme we ösüş stadiýalar (döwürler) mahsusdyr hem-de fazalardaky komponentleriň konsentراسیasy üýtgeýär. Bu öwrülmelerden başga gaty halda agregat halyň üýtgemegi bilen bagly hiç hili meňzeşlik bolmadyk öwrülmeler hem mümkindir.

Munuň ýaly öwrülmelere **martensit** we **massiw** öwrülmeler degişlidirler. Olar diffuziýasyz geçýärler we fazalaryň arasynda komponentleriň täzeden paýlanmasyz kristallik gurluşyň üýtgemegine getirýärler.

### a) Martensit öwrülmeleri.

Martensit öwrülişiginde kristallik gurluşyň täzeden guramagy münlerçe atomlaryň atomlara aralyklara toparlaýyn süýşmeginiň esasynda amala aşyrylýar. Fazaara araçäkleriň kooperativ hereketiniň hökmany şerti martensit fazanyň we matrisanyň kristallik gözenekleriniň biri-birine baglylygyň kogerentligi bolup durýar. Martensit fazanyň emele gelmeginde gözenegiň täzeden guramagyny inwariantly tekizlikli deformasiýa ýaly göz önüne getirip bolar (72 -nji çyzgy). Fazaara araçäk şunlukda inwariant tekizlik bilen gabat gelýär.



72 -nji çyzgy. Inwariantly tekizlikli deformasiýa:

a) dilatasiýa   b) süýşme   c) süýşme we dilatasiýa

Martensit öwrülmäniň esasy aýratynlygy fazaara araçägiň hereket edýänliginiň temperaturadan gowşak baglylygy: käbir garyndylarda martensit öwrülme örän kiçi temperaturaly ýaýlada geçýär (100K we ondan kiçi). Fazaara araçägiň hereketiniň tizligi käbir halatlarda örän uly baha ýetýär ( $\sim 10^3 m/s$ ), bu bolsa gaty jisimlerde ses tolkunlarynyň tizligine golaýdyr.

Martensit öwrülmeler köp sanly ornaşdyrma garyndylarda (polatda) we çalşyrma garyndylarda (mis, kümüş, altyn, sirkoniý, titan we ş.m. garyndylaryň esasynda).

Martensit öwrülmeleriň sebäbi ýokary temperaturaly fazanyň kristallik gözeneginiň durnuklylygynyň ýitgisiniň belli görnüşli süýşme tolkunlara görä ýitgisi bolup durýar. Meselem, göwürüm merkezleşen gözenekli garyndylarda matrisa tolkun wektory  $K = \frac{1}{2}\{110\}, (\overline{110})$  bolan süýşme tolkuna görä durnuklylygyny ýitirýär.

Kristallik gurluşyň süýşme tolkunlara görä durnuksyzlygyň ýüze çykmagy martensit ýaýlasynyň ön ýanyndaky temperaturalarda duýulýar – martensit öwrülmäniň başlanýan nokadyndan ýokarda. Martensit ýaýla üçin fiziki häsiýetleriň we kristallik gurluşyň anatomiýalary mahsusdyr: elektrik garşylygyň temperatura baglylygynyň otrisatel koeffisiýenti; rentgen şöhleleriň we elektronlaryň diffuzly dargamagy; martensit kristallaryň döremeginiň merkezleri bolan aralyk gurluşly hallaryň emele gelmegi (süýşmäniň aralyk gurluşlary).

Kesgitleme. Amorflaryň häsiýetleriniň aýratynlygy. Suwuk kristallar we olara mahsus bolan häsiýetler. Nematiklar, smetiklar, holeristik suwuk kristallar. Maddalaryň faza geçişleriniň köpgörnüşligi.....156

## VIII BAP. GATY HALDAKY FAZA ÖWRÜLMELERI

§22. Fazalaryň durnuklygy. Faza geçişlerde fazaara araçäkleriň roly.....	164
§23. Diffuzly däl we diffuzly faza öwrülmeleri. Gaty erginiň bölünmegi.....	169
§24. Atom – kristallik gurluşyň tertipleşmegi.....	173
§25. Uzakdaky tertipleşmäniň nazaryýeti.....	179
§26. Martensit we massiw öwrülmeleri.....	184
Edebiýat .....	190

## MAZMUNY

Sözbaşy.....	7
Giriş.....	9

## I BAP. KONDENSIRLENEN HALLARYŇ GURLUŞY

§ Kristallik gözenek barada düşünje. Kristallik simmetriýasy.....	11
§2. Düwün tekizlikleriň we göni çyzyklaryň kristallografiki simwollary. Ters gözenek.....	19
§3. Gaty jisimlerdeki defektler. Defektrleriň klassifikasiýasy. Nokatlanç defektler (Frenkele görä defektler) Şottka görä defektler. Radiation defektler....	28
§4. Dislokasiýalar. Bürgersiň wektory. Kristallarda dislokasiýa emele gelmek üçin zerur bolan naprýaženiýeler.....	35

## II BAP. GATY JISIMLERDÄKI HIMIKI BAGLANYŞYGYŇ GÖRNÜŞLERI

§5. Gaty jisimleriň klassifikasiýasy. Baglanyşyk energiýasy.....	42
§6. Molekulýar kristallar. Ion kristallar.....	49
§7. Kowalent kristallary. Metallar.....	57

## III BAP. GATY JISIMLERIŇ MEHANIKI HÄSIÝETLERI.

§8. Gaty jisimleriň dartgynlygy we deformirli ýagdaýlary.....	65
---	----

§9. Maýyşgaklyk. Izotroply we anizotroply jisimler üçin Gukun kanuny. Kristallik jisimleriň süýgeşiklik häsiýetleri.....	71
§10. Kristallardaky maýyşgak tolkunlar. Kristallik gözenekdäki atomlaryň yrgyldymalary. Bir jynsly kirşiň bir ölçegli yrgyldymalary. Monokristallardaky maýyşgak tolkunlar. Bir atomly çyzykly zynjyrjagazyň yrgyldymalary.....	77

#### IV BAP. GATY JISIMLERIŇ ÝYLYLYK HÄSIÝETLERI.

§11. Gaty jisimleriň ýylylyk sygymy. Dülong we Ptiniň kanuny. Eýnşteýniň ýylylyk sygymynyň nazaryýeti. Debaýyň ýylylyk sygymynyň nazaryýeti.....	86
§12. Fononlar. Fononlaryň metallaryň ýylylyk sygymyna goşandy.....	94
§13. Gaty jisimleriň ýylylyk giňelmegi we geçirijiligi. Gaty jisimlerdäki diffuziýa.....	100

#### V BAP. GATY JISIMLERIŇ ELEKTRIK HÄSIÝETLERI

§14. Gaty jisimleriň elektrik geçirijiligi boýunça klassifikasiýasy. Metallar, dielektrikler, ýarymgeçirijiler. Gaty jisimleriň geçirijiliginiň zona nazaryýeti.....	109
§15. Ýarym geçirijileriň hususy geçirijiligi. Garyndy ýarym geçirijileriň geçirijiligi. Metallaryň elektrik geçirijiliginiň temperatura baglylygy. Aşageçirijilik....	115

#### VI BAP. GATY JISIMLERIŇ MAGNIT HÄSIÝETLERI

§16. Magnetikleriň klassifikasiýasy. Dia - we paramagnetikleriň tebigaty. Gaty jisimleriň diamagnet we paramagnet häsiýetleri.....	124
§17. Ferromagnetizm. Alyşma özara täsiri we onuň ferromagnetizmiň döremegindeki roly. Antiferromagnetizm we ferrimagnetizm.....	131

#### VII BAP. KONDENSIRLENEN HALLARYŇ UMUMY HÄSIÝETNAMASY

§18. Umumy häsiýetnama. Kondensirlenen hallaryň görnüşleri. Gaty jisimiň akyjylygy we suwuklyklaryň portlugy. Kondensirlenen hallaryň alnyşynyň esasy usullary.....	138
§19. Kristallaşma. 1. Birinji jynsly faza geçişiniň termodinamikasy. Kristallaşma düwünjiginiň (merkeziniň) emele gelmeginiň termodinamikasy. Düwünjikleriň öz - özünden döremegi.....	141
2. Kristallaşma prosessiň kinetikasy. Ýeňil we kyn kristallaşýan suwuklyklar. Kristallaşma prosessiň mehanizmi.....	147
§20. Erginleriň gatamagy. Kyn kristallaşýan suwuklyklaryň sowadylmagynda häsiýetleriň üýtgemegi. “Aýna” düşünjäniň kesgitlemesi. Aýnalaryň metastabilligi. Spin aýnalar.....	151
§21. Amorflaşma. Suwuk kristallar.	