

O'ZBEKISTAN RESPUBLIKASI'
XALI'Q BILIMLENDIRIW MINISTRLIGI

A'JINIYAZ ATI'NDAG'I' NO'KIS MA'MLEKETLIK
PEDAGOGIKALI'Q INSTITUTI'

J. Jan'abergenov, M. Jalelov, O. Yusupov, G. Kadirimbetova

ZATLAR DU'ZILISI TEORIYASI'
(Joqari' oqi'w ori'nlari'ni'n' fizika ha'm astronomiya ta'lim bag'dari'
talabalari' ushi'n)
METODIKALI'Q QOLLANBA

NO'KIS-2015

22.3 **Du'ziwshiler:** J. Janabergenov, M. Jalelov, O. Yusupov,
J-11 G. Kadirimbetova

Bul metodikali'q qollanbada «Zatlar du'zilisi teoriyasi'» fizika ha'm astronomiya bakalavriat ta'lim bag'dari' talabalari'na zatlar qurami', du'zilisi, strukturasi' ha'm qa'siyetlerin atom-molekulyar ta'liymatqa tayani'p u'yrenetug'i'n pa'n bolip, oni'n' fizikali'q – matematikali'q tiykari' kvant teoriyasi', kvant mexanikasi', kvant statistikasi' boli'p esaplanadi.

Onda qatti dene tu'rleri, kristalliq fizika tiykarlari', zatlardi'n' energetikali'q zonalari', tok tasi'wshi'lardi'n' bo'listiriliwi ha'm statistikasi', elektronni'n' shashi'li'w mexanizmleri, kinetikali'q qubi'li'slari', dielektrikler, ferromagnitikler, yarimo'tkizgishler, olarda payda bolatug'i'n qubi'li'slar ha'm tag'i' basqalar u'yreniledi.

Metodikali'q qollanbadan joqari' oqi'w ori'nlari' fizika-matematika fakulteti talabalari' paydalaniwlari' mu'mkin.

Juwapli' redaktor:

A. Kamalov – A'jiniyaz atindag'i No'kis ma'mleketlik pedagogikali'q instituti' «Uliwma fizika» kafedrası' basli'g'i, fizika - matematika ilimlerinin' doktori.

Pikir bildiriwshiler:

K. Turdanov - A'jiniyaz atindag'i No'kis ma'mleketlik pedagogikali'q instituti' «Uliwma fizika» kafedrası' docenti, fizika - matematika ilimlerinin' kandidati'.

S. Bekbergenov - Berdaq atindag'i' Qaraqalpaq ma'mleketlik universiteti «yarimo'tkizgishler fizikasi'» kafedrası' oqi'ti'wshi'si', fizika - matematika ilimlerinin' kandidati'.

A'jiniyaz ati'ndag'i' No'kis ma'mleketlik pedagogikali'q instituti'ni'n' woqi'w – metodikali'q ken'esinin' 2014 – ji'l 27-dekabr ku'ngi ma'jilisi qarari' menen baspag'a usi'ni's yetilgen (№ 3 sanli' bayanlama).

KIRISIW

«Zatlar du'zilisi teoriyasi'» («ZDT») pa'ninen talabalarg'a bilim beriwde zamanago'y ta'lim texnologiyalari'ni'n' a'hmiyeti haqqi'nda so'z barg'anda Prezidentimiz İ.A.Karimovti'n' «Woqi'w processine jan'a xabar ha'm pedagogikali'q texnologiyalardi' ken' qollaw, balalari'mi'zdi' jetik insanlar yetip ta'rbiyalawda ta'lim-ta'rbiya sistemasi'n si'pat jag'i'nan pu'tkilley jan'a basqi'shqa ko'teriw di'qqati'mi'z worayi'nda boli'wi' za'ru'r» [1] degen so'zlerin ayti'p wo'tiw wori'nli'.

Kirisiw bo'liminde da'slep «ZDT» pa'ninin' a'hmiyeti ha'm usi' woqi'w pa'ninin' du'zilisi usi'ni'ladi':

Ta'biyattag'i' zatlar gaz, suyi'qli'q, qatti' ha'm plazma hallari'nda boladi'. Bul hallar zatti'n' agregat hallari dep atali'p, bir-birinan fizikali'q qa'siyetleri menen parq etedi.

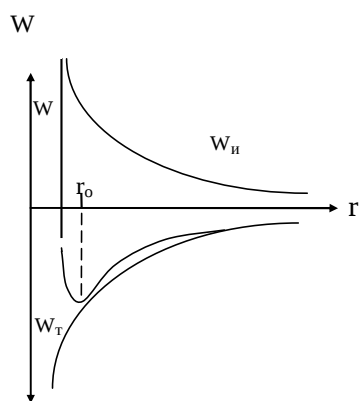
Qatti' deneler du'zilisine qaray amorf, kristall, shiyshe siyaqli' polimer qatti' denelerge bo'linedi.

Kristall qatti' denelerde olardi' qurawshi' atom ha'm molekulalar belgili ta'rtip penen jaylasadi'. Eger bul ta'rtip eki atom yamasa molekula arasindagi' arali'qtan bir qansha ma'rte u'lken bolg'an arali'qlarg'a shekem saqlansa oni' uzaq ta'rtip dep ataydi'. Kristallar ani'q eriw temperaturasina (noqati'na) iye boladi'.

Molekulalardi'n' payda boli'w mexanizmleri so'z etilgende, molekula payda etip ati'rg'an atomlarga' eki ku'sh ta'sir etiwsi ayti'p o'tilgen edi: u'lken arali'qlarda sezilerli bolg'an (uzaqtan ta'sir etiwshi) tarti'si'w ku'shleri ha'm kishi arali'qlarda payda boladi'tug'i'n ha'm de arali'qti'n' kemeyiw menen keskin artip ketetug'i'n (jaqi'nnan ta'sir etiwshi) iterisiw ku'shleri.

Iterisiw ha'm tarti'si'w ku'shleri menen baylani'sli' bolg'an W_i ha'm W_t potencial energiyalardi'n' atomlar arasindag'i arali'qqa baylani'sli' ha'm de sistemanin' toli'q energiyasi' sxemali'q ko'riniste 1.1-su'wrette suwretlengen.

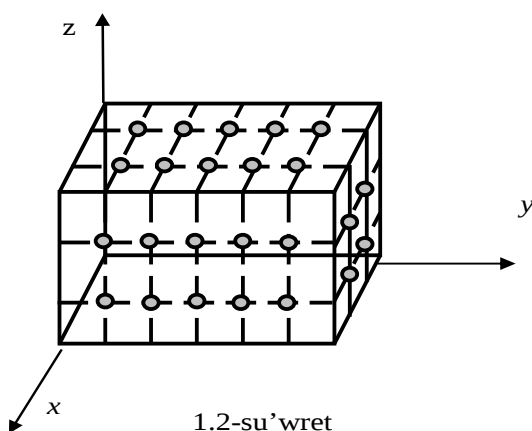
Atomlar arasindag'i arali'q r_0 bolg'anda tartisiw ha'm iterisiw ku'shleri ten'lesedi, yag'niy olardi'n' ten' ta'sir etiwshisi nolge, sistemani'n' potentsial energiyasi' minimal ma'niske iye boladi', na'tiyjede sistema ten'salmaqli'li'q halg'a erisedi.



1.1-su'wret

Bul sheshimdi ko'p sanli' atomlar sistemasina uli'wmalasti'rsa, ondag'i' atomlar bir-birinen birdey arali'qta jaylasi'p bekkem du'ziliske iye bolg'an ha'm kristall dep atalg'an deneni payda etedi. Kristalldi'n' ha'r bir atomi' (molekulasi') potentsial urada jaylasqani' ushi'n ol ten'salmaqli'liqtan erkin ji'lji'p kete almastan, tek g'ana ten'salmaqli'liq

a'tirapi'nda terbelis jasawi' mu'mkin. Atomlardi'n' ji'lli'li'q qozg'ali's energiyasi' baylani's energiyasi'nan arti'p ketkenshe bul hal saqlanadi'. Joqari'dagi' pikrlardi biz eki atom arasindag'i' o'z-ara ta'sir mexanizmine tiykarlani'p shi'g'ardi'q. U'sh o'lshemli kristallda ha'r bir atomg'a oni'n' a'tirapi'ndag'i' basqa atomlar ha'm ta'sir etiwsi sebepli na'tiyje bir qansha quramali' boladi'. Ha'r qi'yli' bag'darlarda atomlar arasindag'i' arali'qlar ha'r qi'yli' boladi'.



1.2-su'wret

Kristallardi'n ken'isliktegi du'zilisini tu'sindiriwde kristall reshetka tu'sinigini paydalanami'z. Kristall reshetka tu'yinlerinde atomlar jaylasqan ken'islikten ibarat. Oni' to'mendegishe ko'riw mu'mkin: x, y, z ko'sherlerden ibarat koordinatalar sistemasini'n' (tuwri' mu'yeshli boli'wi' sha'rt emes) basi'na berilgen

zatti'n' bir atomi'n jaylasti'ri'p, ko'sherler boyi'nsha o'lshemleri atomlardi'n' ten'salmaqli'li'q hali'na sa'ykes, bazali'q vektorlar dep atalg'an $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ vektorlardi' jaylasti'rami'z. x - ko'sheri boyi'nsha $a, 2a, 3a, \dots$ arali'qlarg'a, y - ko'sheri boyi'nsha $b, 2b, 3b, \dots$ arali'qlarg'a ha'm z - ko'sheri boyi'nsha $c, 2c, 3c, \dots$ arali'qlarg'a atomlardi' jaylasti'ri'p kristall reshetkani'n' x, y, z ko'sherleri boyi'nsha ji'nji'ri'n du'zimiz.

Tu'yinlerdegi atomlardi' ku'shiriw (translyatsiya) vektori' dep atalg'an vektor $\vec{T} = n\vec{a} + m\vec{b} + k\vec{c}$ ja'rdeminde (1.2- su'wret) ko'sherler boyi'nsha ko'shirip kristall reshetkani' du'zedi. $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ vektorlari'na quri'lg'an en' kishi uyashani' Brave reshetkasi' yamasa elementar uyasha dep ataydi'. Ko'sherler arasindag'i' α, β, γ mu'yeshler iqtiyariy boli'wi' mu'mkin.

Tu'yinlerinde atom jaylasqan elementar uyashalardi' a'piwayi' uyashalar dep ataladi'.

Ta'biyatta ushi'raytug'i'n barli'q kristallardi' 14 tu'rli Brave elementar uyashalari' ja'rdeminde ko'riw mu'mkin.

Kristallardi'n' ishki du'zilisini qanday u'yreniw mu'mkin?. Kristallardi'n' du'zilisini ani'qlaw usi'llari' olardi'n' atomlari' kristall reshetka payda etip jaylasqanli'g'i'na tiykarlang'an. Ha'r qanday kristall deneni ko'lemlik difrakcion reshetkadan ibarat dep qaraw *mu'mkin. Bunda difrakcion reshetkani'n' da'wiri kristall reshetkani'n' turaqli'si'na ten' boladi'*.

Kristall, qatti' ha'm amorf zatlar, zat du'zilisini u'yreniwde klassikali'q ha'm kvant ko'z-qaras, shekli ha'm sheksiz figuralar simmetriya, simmetriyalı'q operaciylar ha'm elementleri, operaciylar ha'm element tu'rleri, simmetriya gruppalari' ha'm wolardi'n' payda boli'wi', Eyler formulasi', noqatli'q ha'm ken'islik gruppalari', atomlar ha'm molekulalar simmetriyasi', kristall toparlari' (kategoriyalari'), kristall sistemalari' (singoniyalari'), kristall klasslari', kristallardag'i' nuqsanlar, kristallardi'n' ji'lli'li'q si'yi'mli'li'g'i', tordi'n' ji'lli'li'q wo'tkizgishligi, fononlardi'n' ko'si'w processi, qatti' denelerdin' elektr wo'tkizgishligi, metallardag'i' elektr wo'tkizgishlik, yari'm wo'tkizgishler, yari'm wo'tkizgishlerdin' qa'siyetleri, yari'm wo'tkizgishlerdin' elektr wo'tkizgishliktin' yeki mexanizmi, yari'm wo'tkizgishlerdin' qosi'mtali' elektr wo'tkizgishligi.

Bo'leksheleri kvant mexanika ni'zamlari'na bo'ysunatug'i'n sistema-kvant sistema dep ataladi'. Kvant sistemanin' qa'siyetlerin u'yrenetug'i'n statistika fizikanin' bo'limi - kvant statistika bo'li'p esaplanadi'.

Ko'p bo'leksheli kvant sistemanin' qa'siyetlerin uli'wma jag'dayda ani'q qaraw bir qansha printsiplial qi'yi'nshi'li'qlarg'a dus keltiredi.

Sistemani payda etken bo'leksheler jeterli da' rejede siyrek bo'lg'anda, ma'seleni qaraw a'piwayi'lasadi'. Bul jag'dayda bir bo'lekshenin' jag'daylarin kvant mexanikasi' tiykari'nda ani'qlap, son' bul jag'daylar boyi'nsha bo'lekshelerdin' bo'listiriliwin ko'riw mu'mkin. Ma'seleni bunday apiwayi'lasti'ri'p qarawdi' kvant statistikada bir bo'lekshelik metod dep ataladi'. Bir bo'lekshelik metod penen ma'selelerdi kvant statistika tiykari'nda qargalg'anda bo'lekshelerdin' o'z-ara ta'siri itibarg'a ali'nbaydi', tek g'ana ha'r-bir jag'daydag'i' bo'leksheler ushi'n almasi'w effekt itibarg'a ali'nadi'.

Almasi'w effekt - birdey bo'lekshelerdin' ori'n almasti'ri'wlari'nda payda bo'latug'i'n, sistemanin' simmetriyasi' qa'siyetlerin an'latatug'i'n, klassikali'q uqsasli'g'i' bo'lmag'an, kvant korrelyacion qubi'li'si'.

Temperatura kemeyip $p \sim \sqrt{T}$ de Broyl tolqi'n uzi'nli'gi' $\lambda = h / p$ bo'leksheler arasindag'i' arali'q ta'rtibinde yamasa onnan u'lken bola baslag'anda, bo'leksheler arasi'ndag'i' o'z-ara ta'sir potentsiali'nan basqa, kvant korrelyaciya'si'na tiyisli almasi'w o'z-ara ta'siri payda bo'ladi.

Bul kvant korrelyaciya bo'leksheler ha'reketine, olardi'n' sistemasi' qa'siyetine belgili bir ta'sir ko'rsetedi. Bul ta'sir temperatura kemeyiwi menen arti'p baradi'. Kvant korrelyaciya bo'leksheler ha'reketi ni'zamlari'n uyrenip qoymay, klassikali'q statistikani' ha'm qayta qaraw za'ru'rigin keltirip shi'g'ardi'.

I. KRISTALL, QATTI' HA'M AMORF ZATLAR

1.1. Zat du'zilisini u'yreniwde klassikali'q ha'm kvant ko'z-qaras

Zatlardi'n' suyi'q hali' to'mengi ta'repinen qatti', al joqarg'i' ta'repinen gaz hallari'na wo'tiw temperaturalari' menen shegaralang'an. Sonli'qtanda, suyi'q haldag'i' zatlar du'zilisinde ha'm fizikali'q qa'siyetlerinde qatti' ha'm gaz hallari'ni'n' wo'zgeshelikleri belgili mug'darlarda saqlanadi'.

Qatti' deneler kristalli'q ha'm amorfli'q tu'rlerge iye. Wolar jaqi'n ha'm uzaq arali'qlarda atom, ion yamasa molekulalardi'n' ta'rtpi jaylasi'w da'rejelerine qarap toparlarga bo'linedi. Jaqi'n arali'qtag'i' ta'rtpi jaylasi'w degende, biz tan'lap ali'ng'an atom, ion yamasa molekulani' qorshag'an belgili sandag'i' atom, ion yamasa molekulalar arasi'ndag'i' jaylasi'w ta'rtibin tu'sinemiz. Uzaq arali'qtag'i' ta'rtpi jaylasi'w bolsa, bo'lekshelerdin' belgili ta'rtpi penen u'sh wo'lshemli ken'islikti u'zliksiz tolti'ri'wi' boli'p yesaplanadi'. Uzaq arali'qtag'i' ta'rtpi jaylasi'w wornag'an waqi'tta qa'legen arali'qta jaylasqan atomga shekemgi arali'q kristalli'q tor turaqli'lari' arqali' $\vec{R}_i = m_i \vec{a} + n_i \vec{b} + p_i \vec{c}$ ten'lemesi arqali' an'lati'ladi'. Bunda m_i, n_i, p_i - i - shi atomni'n' koordinatalari'. Yeriw temperaturasi'nan ko'p to'men bolg'an temperaturalarda atomlardi'n' ji'lli'li'q qozg'ali'si' wolardi'n' ten' salmaqli'q hallari' a'tirapi'ndag'i' kollektivlik terbelislerinen ibarat. Yeriw temperaturasi'nda kristalli'q tor buzi'ladi', uzaq arali'qlardag'i' ta'rtpi jaylasi'w jog'ala baslaydi'. Bull halda bo'lekshelerdin' translyaciya ko'shiwi itimalli'g'i' artadi', na'tiyjede jaqi'n arali'qtag'i' ta'rtpi jaylasi'w da'rejeside wo'zgeriske ushi'raydi'.

Suyi'q ha'm amorf hallardag'i' zatlar du'zilisini' sanli'q si'patlamalari'n an'lati'w atomlar arali'q qashi'qli'qlardi'n' radialli'q bo'listiriliw funkciyasi', atomli'q ha'm molekulali'q ti'g'i'zli'qlar funkciyalari' arqali' an'lati'ladi'.

Bir atomli' zat du'zilisini radialli'q bo'listiriliw funkciyasi' ja'rdeminde an'lati'wdi'n' matematikali'q tiykari'n qi'ssa qarap o'teyik. Meyli N birtekli atomnan ibarat sistema V ko'lemde iyelesin. Usi' ko'lemde koordinata basi' si'pati'nda tan'lap ali'ng'an noqattan R_1 ha'm R_2 arali'qlarda jaylasqan yeki

dV_1 ha'm dV_2 elementar ko'lemlerdi tan'lap alayi'q. Yegerde atomlardi'n' wo'z-ara jaylasi'wi' yerikli desek, 1-shi atomni'n' dV_1 , al 2-shi atomni'n' dV_2 elementar ko'lemlerde jaylasi'w itimalli'g'i'

$$dP(\vec{R}_1, \vec{R}_2) = \frac{dV_1}{V} \cdot \frac{dV_2}{V} \quad (1.1.1)$$

Atomlardi'n' jaqi'n arali'qlarda yerikli jaylasi'wi' tek g'ana gazlar ushi'n ta'n qa'siyet bolg'anli'qtan, suyiqli'qlarda ha'm amorf denelerde tan'lap ali'ng'an atomni'n' V ko'lemnin' qa'legen noqati'nda jaylasi'w itimalli'g'i' basqa atomlardi'n' koordinatalari'na baylani'sli' ani'qlanadi'. Atomlardi'n' wo'z-ara belgili arali'qta jaylasi'wi' itimalli'qlari' $W(\vec{R}_1, \vec{R}_2)$ -korrelyasiyalig' funkciyasi' arqali' an'latiladi'. Wonda (1.1) ten'lemesin

$$dP(\vec{R}_1, \vec{R}_2) = W(\vec{R}_1, \vec{R}_2) \frac{dV_1}{V} \cdot \frac{dV_2}{V} \quad (1.1.2)$$

tu'rinde jazi'wg'a boladi'. Suyiqli'qlar izotropli'q si'patqa iye bolg'anli'qtan W funkciyasi' tek g'ana qarali'p atirg'an jup atomlar arasi'ndag'i' qashiqli'qlarg'a baylani'sli', yag'ni'y

$$W(\vec{R}_1, \vec{R}_2) = W(|\vec{R}_1 - \vec{R}_2|) = W(|\vec{R}_{12}|) = W(R) \quad (1.1.3)$$

(1.1.2) ten'lemeni basqasha ko'riniste jazi'wg'a boladi'. Woni'n' ushi'n 1-shi atomdi' koordinata basi'na jaylastirami'z ha'm woni'n' a'tirapi'nda radiuslari' $R, R+dR$ bolg'an yeki sfera ju'rgizemiz. Yendi 2-shi atomni'n' $4\pi R^2 dR$ sferali'q ko'lemde tabi'li'w itimalli'g'i'

$$dP(R) = W(R) \frac{4\pi R^2 dR}{V} \quad (1.1.4)$$

$W(R)$ funkciyasi' to'mendegi normirovkali'q sha'rtti qanaatlandiradi':

$$\frac{1}{V} \int_0^\infty W(R) 4\pi R^2 dR = 1. \quad (1.1.5)$$

Bul qa'legen atomni'n' tan'lap ali'ng'an atomnan mu'mkin bolg'an barli'q arali'qlarda jaylasi'w itimalli'qlari'ni'n' qosi'ndisi' birge ten' degendi an'latadi'. $W(R)$ -atom yamasa molekulalardi'n' radial bo'listiriliw funkciyasi' dep ataladi'. Atomlardi'n' wo'z-ara iytirisiw ku'shi wolardi'n' birinin' yekinshisine jaqinlasi'w arali'g'i'n shekleydi. Wonda $0 \leq R < 2r$ arali'g'i'nda $W(R)=0$. Bunda r -atomni'n' radiusi'. $R \rightarrow \infty$ umtilg'anda $W(R) \rightarrow 1$.

Aytayi'q, $4\pi R^2 dR$ ko'leminde dn atom jaylasqan bolsi'n. Ha'r qi'yli' sferali'q qatlamlarda atomlar sani' birdey yemes deyik. Wonda ρ arali'q R -

din' funkciyasi' boladi'. Birlik ko'lemdegi atomlar sani'n $\rho = \frac{dn}{4\pi R^2 dR}$ desek, baqlaw waqti'nda aji'rati'p ali'ng'an ko'lemde tabi'lg'an atomlar sani' $dn = \rho(R) 4\pi R^2 dR$. Ten'lemeni $0-R_v$ arali'g'i'nda integrallap V ko'lemde jaylasqan atomlar sani' N -di ani'qlaymi'z. Yegerde ko'lem birligindagi atomlar sani' baqlani'w waqti' ishinde turaqli' bolsa

$$\int_0^{R_v} 4\pi R^2 \rho(R) dR = N - 1, \quad (1.1.6)$$

al wo'zgermeli bolsa
$$\int_0^{R_v} 4\pi R^2 \rho(R) dR = \frac{\langle N^2 \rangle}{\langle N \rangle} - 1. \quad (1.1.7)$$

(1.1.6) atomli'q ti'g'i'zli'q funkciyasi' $\rho(R)$ -din' kristallar, al (1.1.7) suyi'q deneler ushi'n normirovkalawshi' ten'lemeler boli'p yesaplanadi'. Wonda (1.1.5), (1.1.6) ten'lemelerden

$$W(R) = \frac{V}{N} \rho(R) = \frac{1}{\rho_a} \rho(R) \quad (1.1.8)$$

Bunda ρ_a -birlik ko'lemdegi atomlardi'n' wortasha sani'. Bul ten'leme birlik ko'lemdegi atomlardi'n' haqi'yqi'y sani'ni'n' wortasha atomli'q ti'g'i'zli'qqa qatnasi' boli'p, sali'sti'rmali' radial bo'listiriliw funkciyasi' dep ataladi'.

Mi'sallar ko'reyik. Kristallar. Ji'lli'li'q terbelislerin yesapqa almag'anda kristallarda atomlar turaqli' arali'qlarda jaylasadi'. Qaptaldan woraylasqan kubli'q kristallda 12 atom $6r$, 6 atom $2r\sqrt{2}$, 24 atom $2r\sqrt{3}$, 12 atom $4r$ ha'm t.b. arali'qlarda jaylasadi'. Atomni'n' ko'rsetilgen qashi'qlar aralari'nda jaylasi'w itimalli'qlari' nolge ten'. Usi' kristalldi' qa'legen bir atom a'tirapi'nda aylandi'rg'anda basqa atomlar woraylari' radiuslari' ko'rsetilgen arali'qlarg'a ten' bolg'an sferalar betlerinde jaylasadi'. Bul $W(R)$ radial funkciyasi' diskret ma'nislerge iye degen so'z. (1.1.5) normirovkalaw sha'rtin yesapqa alg'an halda atomlardi'n' sferalarda bo'listiriliwin

$$W(R) = \frac{1}{\rho_a} \sum_k \frac{N_h}{4\pi R_k^2} \delta(R - R_k), \quad (1.1.9)$$

tu'rinde an'lati'wg'a boladi'. Bunda $\rho = (R - R_k) - \text{Dirak del'ta-funkciyasi'}$. Woni'n' san ma'nisleri to'mendegi sha'rtlerden ani'qlanadi':

$$\delta(R - R_k) = \begin{cases} 0 & \text{npu } R \neq R_k \\ \infty & \text{npu } R = R_k \end{cases}; \quad \int \delta(R - R_k) d(R - R_k) = 1. \quad (1.1.10)$$

Suyi'qli'qlar. Suyi'qli'qlarda atomlardi'n' ji'lli'li'q terbelisleri amplitudalari' qatti' denedegige qarag'anda ko'p u'lken. Sonli'qtanda suyi'qli'qlarda atomlardi'n' ji'lli'li'q terbelisleri na'tiyjesinde qon'si' atomlar menen wori'n almasi'wi' ju'zege keledi. Tan'lap ali'ng'an bir yerikli atomni'n' ji'lli'li'q qozg'ali'si'n baqlaw mu'mkinshiligine iye bolg'ani'mi'zda, biz woni' baqlaw dawami'nda qozg'almaytug'i'n yekinshi atomnan qa'legen arali'qlarda bolatug'i'nli'g'i'na gu'wa bolar yedik. Demek, $W(R)$ funkciyasi' u'zliksiz. Wol $2r < R < R_0$ arali'g'i'nda kemiwshi amplitudag'a iye oscillyaciyali'q tu'rde wo'zgeredi. Ossillyasiya maksimumlari'na atomlardi'n' jaylasi'w itimalli'qlari' u'lken bolg'an arali'qlar, al minimumlari'na atomlar kishi itimalli'qlar menen bolatug'i'n arali'qlar sa'ykes keledi. $W(R)$ funkciyasi'ndag'i' maksimumlar izbe-izligi ten'salmaqli'li'qtag'i' suyi'qli'qti'n' atomlari'ni'n' jaylasi'w arali'qlari' bolg'anli'qtan, wol atomlardi'n' jaqi'n arali'qlardag'i' ta'rtpi'li jaylasi'w ni'zamli'li'g'i'n an'latadi'. Joqari'da ayti'lg'anlar atomlardi'n' ti'g'i'z ji'ynali'wi' ushi'n wori'nli'. Yegerde atomlar ti'g'i'z ji'ynalmag'an bolsa, bo'listiriliw funkciyasi' wo'zgeshe ko'riniske iye boladi'. Real jag'daylarda ten'salmaqli'li'q hallari'nda jaylasqan atomlar arasi'ndag'i' qashi'qli'qlardi'n' wo'zgeriwshen'ligi ha'm atomlardi'n' translyaciyali'q arali'qlarg'a ko'shiw itimalli'qlari'ni'n' joqari'li'g'i' saldari'nan ha'tteki $W(R)$ funkciyasi'ni'n' oscillyaciyali'q maksimumlari'ni'n' birinshi maksimumi'n baqlaw mu'mkin bolmaydi'. Bul jag'dayda $W(R)$ funkciyasi'n ani'qlaw strukturali'q analiz arqali' a'melge asi'ri'ladi'.

II. SHEKLI HA'M SHEKSIZ FIGURALAR SIMMETRIYASI'

2.1. Shekli ha'm sheksiz figuralar simmetriyasi'

Rome de İl'ya wo'zinin' «Kristallografiya» atamasi'ndag'i' miynetin ja'riyalag'annan son' woni'n' watanlasi' Gayui bul kitap materiallari'n qayta islew na'tiyjesinde geometriyalı'q kristallografiyani'n' tiykarg'i' ni'zami' parametrlerdin' racionalli'q ni'zami'n ashi'wg'a yeristi. Bir waqi'tti'n' wo'zinde wol kristallar simmetriyalı' materiallar yekenligine di'qqat awdardi'. Simmetriya tu'sinigi ju'da' ken' tu'sinik boli'p, ku'ndelikli turmi'stada qollani'ladi'. Mi'sali', qandayda jaydi'n' aldi'ng'i' betine qarap turi'p, fasadti'n' wortasi'nan tik tu'sirilgen si'zi'qqa sali'sti'rg'anda shep ha'm won' ta'repleri wo'z-ara birdey bolsa, bul jay simmetriyalı' yeken deymiz. «Simmetriya» grek so'zi boli'p wo'lshemler boyi'nsha birdeylik degendi an'latadi'. Uli'wma simmetriyalı' figura dep simmetriyalı'q tu'rlendiriw (simmetriyalı'q operaciya) na'tiyjesinde wo'zi menen wo'zi betlesetug'i'n figurag'a ayti'ladi'. Bul jerde wo'zi menen wo'zi betlesedi degen so'z-figurani'n' simmetriyalı' tu'rlendiriwden keyingi ahwali' da'slepki hali'nan hesh qanday pari'q qi'lmaydi' degendi an'latadi'. Mi'sali', bes juldi'zdi' wo'zinin' tegisligine perpendikulyar ha'm worayi'nan wo'tetug'i'n ko'sher a'tirapi'nda 72^0 qa bursaq (tu'rlendiriw jasaladi') da'slepki hali'nan hesh qanday wo'zgeris bolmaydi'.

2.2. Simmetriya operaciyalari' ha'm elementleri

Simmetriya operaciyalari'

Simmetriyalı' tu'rlendiriw dep figurani' wo'zin wo'zi menen betlestiriw ushi'n islenetug'i'n operaciyalarg'a ayti'ladi'. Bunday operaciyalarg'a qandayda noqatta, yamasa tegislikte shag'i'li'sti'ri'w, ko'sher a'tirapi'nda aylandi'ri'wlar jatadi'. Zatlardi'n' fizikalı'q qa'siyetleri wo'zgermey qalatug'i'n simmetriya operaciyalari' to'mende keltirilgen:

Ken'islikte ko'shiriw;

Waqi't dawami'nda wori'n awi'sti'ri'w;

Belgili mu'yeshke buri'w;

Tuwri' si'zi'q boylap turaqli' tezlik penen qozg'ali's (Lorens almasti'ri'wlari');

Waqi'tti' qaytari'w;

Ken'islikte shag'i'li'si'w;

Birdey atom yamasa bo'lekshelerdi almasti'ri'w;

Kvant-mexanikali'q faza almasi'w;

Zatti' - antizat penen almasti'ri'w (zaryadi' boyi'nsha).

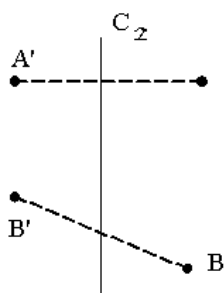
Usi' shag'i'li'sti'ri'w wori'nlanatug'i'n noqatqa, tegislikke ha'm a'tirapi'nda aylandi'ri'wlar wori'nlanatug'i'n ko'sherge simmetriya elementleri dep ayti'ladi'.

Simmetriyani'n to'mendegi elementleri bizge belgili.

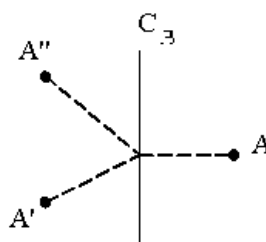
2.3. Simmetriya elementleri

1. Simmetriya ko'sheri.

Yeger molekula atomlari' qandayda ko'sher a'tirapi'nda $\frac{2\pi}{n}$ mu'yeshke buri'lg'anda wo'z-wo'zi menen betlesse, wonda wol n - ta'rtpi simmetriya ko'sherine iye deymiz ha'm woni' C_n (bull jerde $n = 2, 3, 4 \dots n$ pu'tin san) dep belgileymiz. Mi'sali' yeger molekula atomi'n ko'sher a'tirapi'nda 180° qa burg'anda wo'zi menen yeki ret betlesedi ha'm wol yekinshi ta'rtpi C_2 simmetriya ko'sherine iye boladi' (2.3.1-su'wret).



2.3.1-su'wret



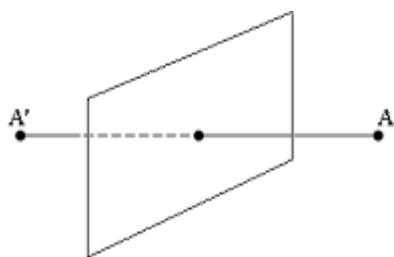
2.3.2-su'wret

Yeger molekula 3-ta'rtpi (C_3) simmetriya ko'sherine iye bolsa, wonda wol wo'z-wo'zi menen 1200 ha'm 2400 qa burg'anda betlesedi, demek

molekulada A atomi' menen birlikte 2.3.2-su'wrette ko'rsetilgenindey jaylasqan A' ha'm A'' atomlari'da bar.

2. Simmetriya tegisligi

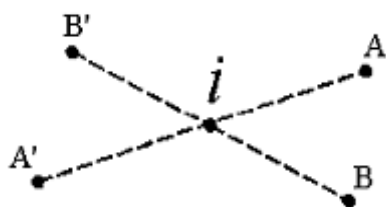
Yeger tegislikte shag'i'li'si'wda wo'z-wo'zi menen betlesse, wonda bul tegislik simmetriya tegisligi dep ataladi' ha'm wol σ ha'ribi menen belgilenedi. Demek molekuladag'i' ha'r bir atomg'a A noqati'nan tegislikke ju'rgizilgen perpendikulyar dawami'nda tap sonday arali'qta jaylasqan A' noqati' sa'ykes keledi (2.3.3-su'wret).



2.3.3-su'wret

Tegislikte shag'i'li'si'w menen bir qatarda noqatta shag'i'li'si'w tu'sinigin kiritiw mu'mkin boli'p, wol ja'ne bir simmetriya elementi - simmetriya worayi' (yamasa inversiya worayi') payda boli'wi'na ali'p keledi ha'm bul element i ha'ribi menen belgilenedi.

Yeger molekula qandayda i noqati'nda simmetriya worayi'na iye bolsa, wonda ha'rqanday A atomi'na A noqattan i noqati'na qaray ju'rgizilgen tuwri' dawami'nda jaylasqan A' atomi' sa'ykes keledi, bunda A' i ha'm A i arali'qlari' wo'z-ara ten' (2.3.4-su'wret).



2.3.4-su'wret

Simmetriya elementinin' son'g'i'si' aynali'q p -ta'rtpi aylanaw ko'sheri (bul ko'sher C_n ha'ribi menen belgilenedi).

Molekula bunday simmetriyag'a iye boli'wi' ushi'n qanday da ko'sher a'tirapi'nda $\frac{2\pi}{n}$ mu'yeshke buri'li'p usi' ko'sherge

perpendikulyar tegislikte sa'wleleniwi tiyis.

Simmetriya elementlerin belgilewde sha'rtli belgilerden (simvollar) paydalani'ladi'. Bulardan ha'zirgi waqi'tta ko'birek qollanatug'i'nlari': xali'qarali'q simvol, simmetriya formulasi'nda qollani'latug'i'n simvollar (1-keste).

Kristallar wo'zlerinin' si'rtqi' formasi'ni'n' simmetriyali'li'g'i' menen yag'ni'y wolardi'n' betlerinin' belgili bir ta'rtpi penen jaylasi'wi' ko'zge

tu'sedi. Kristall ko'pjaqli'li'qti'n' qansha da'rejede simmetriyalig'i bundag'i bar bolg'an simmetriya elementlerinin' tu'ri menen, ha'm wolardi'n' sani' menen ani'qlanadi'.

1- keste

Atlari'			Xali'q arali'q simvoli'	Su'wret tegisligine sali'sti'rg'anda	
				Perpendi Kulyar	Parallel`
Simmetriya tegisligi			M		
Simmetriya worayi'			1		
Simmetriya ko'sheri	buri'li'w	Yekinshi ta'rtpili	2		
		U'shinshi ta'rtpili	3		
		To'rtinshi ta'rtpili	4		
		Alti'nshi' ta'rtpili	6		
	inversiyali'q	U'shinshi ta'rtpili	3		
		To'rtinshi ta'rtpili	4		
		Alti'nshi' ta'rtpili	6		

2.4. Kristallar haqqi'nda tu'sinik

Kristallar atomlardan a'piwayi', al geypara jag'daylarda quramali' jol menen du'ziledi. Geypara kristallar kristalldi'n' ishki baylani's ku'shleri ta'sirinde azg'ana deformaciyalang'an neytral atomlardan turadi'. Wolarg'a inert gazlari'ni'n' qatti' haldag'i' kristallari' jatadi'. Ko'pshilik kristallar won' ha'm teris elektr zaryadlari'na iye bolg'an ionlardan turadi'. Mi'sali', as duzi' kristalli' NaCl Na⁺ ha'm Cl⁻ ionlari'nan turadi'. Siltali metallardi'n' kristallari' kishkene razmerdegi won' zaryadlang'an ionlar bati'ri'lg'an tok tasi'wshi' elektron gazi'nan turadi'. Neytral atomlardan turg'an kristallarda atomni'n' elektron qatlami' qon'si' atomlar arasi'nda kovalentlik baylani'sti' du'zedi.

Kristallardi'n' du'zilisini qaraw ushi'n ayri'qsha usi'l (til) islep shi'g'i'lg'an. Bul tildin' simvollari'n bilgen Adam kristalldi'n' du'zilisini an'sat ani'qlay aladi'. Ideal kristalldi' birdey bolg'an du'zilis elementlerin sheksiz qaytalaw joli' menen ali'ng'an dene dep qaraw mu'mkin.

Biz ideal kristalldi' ken'islik tori'na jaylasqan atomlardan du'zilgen dene dep qaraymi'z. Demek elementar awi'si'wdi'n' (translyaciyanin') u'sh vektori' $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ bar. Bul vektorlar sonday qa'siyetke iye, qa'legen $\vec{r}$ noqattan yamasa

$$\vec{r}' = \vec{r} + n_1 \vec{a} + n_2 \vec{b} + n_3 \vec{c} \quad (2.4.1)$$

noqatlari'nan qarag'anda atomlardi'n' jaylasi'wi' birdey tu'rge iye boladi'. Bundag'i' n_1, n_2, n_3 ler qa'legen pu'tin sanlar. Yegerde qa'legen yeki noqatti'n' vektorlari' $\vec{r}$ ha'm $\vec{r}'$ qa salisti'rg'anda atomlardi'n' jaylasi'wi' birdey tu'rge iye bolsa awi'si'w vektorlari' $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ lar tiykarg'i' vektorlar dep ataladi'. Wolar qa'legen pu'tin sanlar n_1, n_2, n_3 ushi'n (2.1) ten'likni qanaatlandi'radi'. Tiykarg'i' awi'si'w vektorlari' $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ lardi' kristallografiyalig' ko'sherler menen baylani'sli' koordinata sistemasi'ni'n' wort'i (birlik vektori') retinde saylap alami'z.

$$\vec{T} = n_1 \vec{a} + n_2 \vec{b} + n_3 \vec{c} \quad (2.4.2)$$

Vektorlari' menen yesaplanatug'i'n kristalldi' wo'z-wo'zine parallel ko'shiriw operaciyasi' translyaciya dep ataladi'. Pu'tin sanlar n_1, n_2, n_3 lerdin'

barli'q ma'nisleri ushi'n bunday operaciyani'n' toli'q nabori' kristalldi'n' translyaciya topari' dep ataladi'. Kristalli'q strukturani'n' en' a'hmiyetli si'patlamasi' boli'p simmetriya operaciyasi' tabi'ladi'. Bunday operaciyada kristall wo'z-wo'zine wo'tedi. Translyasiya T birden-bir mu'mkin bolg'an simmetriya operaciyasi' yemes. Kristalldi'n' strukturali'q elementinin' ha'r qi'yli' noqati' ushi'n woni' (kristalldi') wo'z-wo'zine wo'tkeretug'i'n buri'w, shag'i'li'sti'ri'w simmetriya operaciyalari' bar. Bunday operaciyalar noqatli'q simmetriya operaciyalari' dep ataladi'.

Yen' a'piwayi' kristalli'q du'ziliste tordi'n' ha'r bir noqati'na tek bir atom baylani'sqan. Bunday jag'dayda strukturani' (du'zilisti) toli'q si'patlaw ushi'n tek kristallografiyalı'q ko'sherler $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ larli'n' beriliwi jetkilikli. Basqa, qolayli' du'zilgen struktura ushi'n reshetkani'n' ha'r bir noqati'na bazis dep atalatug'i'n atomlardi'n' elementar gruppasi'n baylani'sti'ri'wi'mi'z kerek. Kristalldi'n' bunday gruppalar qurami' boyi'nsha, sali'sti'rmali' jaylasi'wi' ha'm bag'i'tlani'wi' birdey boli'wi' kerek.

Elementar awi'si'w vektorlari' $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ vektorlari'nan du'zilgen parallelepedin' ko'lemi

$$V_c = \vec{a} \times \vec{b} \cdot \vec{c}$$

formulasi' menen ani'qlanadi'.

Kristalli'q torlar ha'm kristalli'q du'zilisler translyaciya T g'a qarata simmetriyag'a g'ana yemes, al basqa operaciyalarg'a qarata da simmetriyag'a iye boladi'. Bunday operaciyalardi'n' biri tor noqatlari'ni'n' birewinen wo'tiwshi ko'sher do'gereginde buri'w operaciyasi'. Birinshi, yekinshi, u'shinshi, to'rtinshi ha'm alti'nshi' ta'rtpili ko'sherge iye bolg'an torlar bar. Birinshi ta'rtpili ko'sher 360° qa, yekinshi ta'rtpili ko'sher 180° qa, u'shinshi ta'rtpili ko'sher 120° qa, to'rtinshi ta'rtpili ko'sher 90° qa ha'm alti'nshi' ta'rtpili ko'sher 60° qa buri'wg'a sa'ykes keledi. Basqa ta'rtpili ko'sherler bolmaydi'.

2.5. Kristalli'q tor tu'yinlari, bag'i'tlari' ha'm tegisliklari indekslari

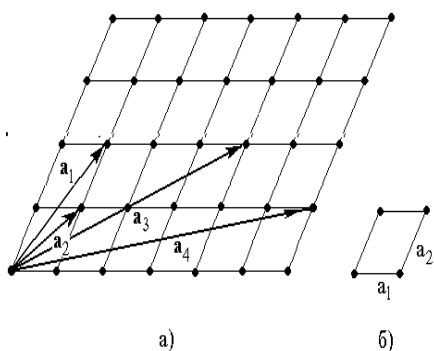
Elementar translyaciylardi' (elementar quti'sha qabi'rg'alari'n) a , b ha'm c yamasa a_1 , a_2 , a_3 ha'ripleri menen, al wolar arasi'ndag'i' mu'yeshlerdi α , β , γ grek ha'ripleri menen belgilew qabi'l yetilgen (2.5.1-su'wret). a , b , c , α , β , γ shamalari' (kristal parametrleri) ha'r bir kristalli'q zatti'n' materialli'q konstantalari' boli'p tabi'ladi'. Uli'wma jag'dayda $a \neq b \neq c$, $\alpha \neq \beta \neq \gamma$, yag'ni'y tiykarg'i' translyaciylar bir birine ten' yemes ha'm ortogonal yemes.

Yeger a_1 , a_2 , a_3 tiykarg'i' u'sh translyaciylari' belgili bolsa tordag'i' qa'legen tu'yinnin' jaylasqan worni' $R = ma_1 + na_2 + ra_3$ vektori' menen ani'qlanadi'. m , n , r lar pu'tin sanlar.

Qos kvadrat qawsi'rmag'a ali'ng'an $[[m,n,r]]$ sanlari' tu'yinnin' simvoli' dep ataladi'.

Kristallografiyalı'q bag'i't dep, keminde yeki tu'yin arqali' wo'tetug'i'n tuwri' si'zi'q bag'i'ti'na aytami'z. A'dette bul tuwri' boyi'nda tordi'n' sheksiz ko'p tu'yinlari jati'wi' kerek. Usi' tu'yinlerdin' birin $[[000]]$ dep belgilep, woni' koordinata basi' retinde qabi'l yetsek, tu'yinli tuwri'g'a sa'ykes keliwshi kristallografiyalı'q bag'i't koordinata basi'na yen' jaqi'n jaylasqan tu'yin indeksi arqali' ani'qlanadi'.

Kristallografiyalı'q bag'i'tti'n' indekslerin sha'rtli tu'rde $[mnr]$ bir kvadrat qawsi'rmag'a ali'ni'p jazami'z. m , n , r sanlari' berilgen kristallografiyalı'q bag'i'tti'n' ha'm usi' bag'i'tqa parallel bolg'an barli'q bag'i'tlardin' Miller indeksleri dep ataladi'. Kvadrat qawsi'rmada jazi'lg'an u'sh san qatar ushi'n Miller indeksleri dep ataladi'.



2.5.1-su'wret. Simmetriyalı' sheksiz tegis tor fragmenti

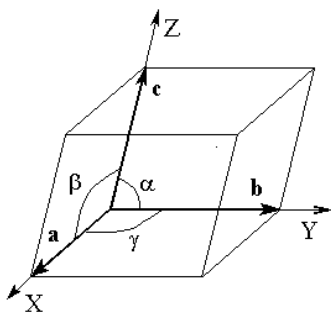
- elementar translyaciylar bolg'an a_1 , a_2 , a_3 ha'm a_4 lerdi saylap ali'wdi'n' ha'r qi'yli' usi'llari'
- tordi'n' simmetriyasi'na sa'ykes keletug'i'n yen' kishi translyaciylarda du'zilgen elementar quti'sha.

Ken'islik torlari' kristallografiyalı'q koordinatalar sistemalari'ni'n' birden bir tiykari' boli'p tabi'ladi'. Koordinata basi' retinde qa'legen bir tu'yin

qabi'l yetiledi. Al usi' tu'yinde kesilisetug'i'n $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3$, elementar translyaciylar vektorlari' koordinata ko'sherleri si'pati'nda qabi'l yetiledi. $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3$, vektorlari' won' u'shlik vektordi' payda yetedi. Sonli'qtan XYZ kristallografiyalig' koordinatalar sistemasi' barqulla tuwri' si'ziqli' ha'm won'. Kristallografiyalig' koordinatalar ko'sherleri wolar arasi'ndag'i' mu'yeshlerdin' ma'nislerine g'a'rezsiz X [100], U [010], Z [001] Miller indekslerine iye boladi'.

Biz joqari'da kristallig' tor tu'yinlerinin', kristallografiyalig' bag'i'tlardi'n' simvollari' menen tani'sqan yedik. Yendi tegisliklerge (qaptal betlerge) simvollar qoyi'w (tegisliklerdi yamasa qaptallardi' indekslew) ma'selesini menen shug'i'llanami'z.

Ken'isliktegi tordag'i' tegis torlar ha'm usi' torlarga parallel` bolg'an kristallardi'n' qaptal betleri berilgen koordinatalar sistemasi'na sali'sti'rg'anda belgili bir qi'yali'qta jaylasadi'. Kristaldi'n' qa'legen qaptal beti qanday da bir tegis torga parallel` (yag'ni'y sheksiz ko'p sanli' tegis torlarga parallel`).



2.5.2-su'wret. Elementar parallelepiped
(standart belgilewler qollani'lg'an)

Meyli tordi'n' bazi' bir tegisligi barli'q koordinata ko'sherlerin ma, nb, rc kesindilerinde kesip wo'tetug'i'n bolsi'n. $m:n:r$ qatnasi' tegisliktin' koordinatalar ko'sherine qi'yali'g'i'n ta'riyipleydi. Usi' tegislikke parallel bolg'an barli'q tegislikler semeystvosi'ni'n' da

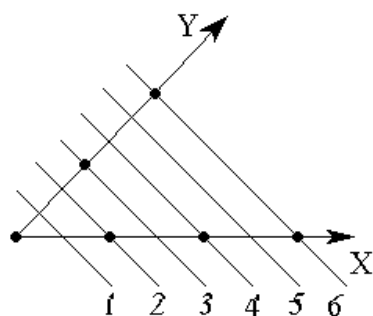
qi'yali'g'i' usi' qatnas penen ani'qlanadi'.

2.5.2-su'wrette ko'rsetilgen tegislikler semeystvosi' ushi'n to'mendegi kesteni alami'z

Tegisliktin' qatar sani'	Ko'sherler boyi'nsha kesindiler			m:n:r
	X	Y	Z	
1	$a/2$	$b/3$	∞	$1/2:1/3:\infty = 3:2:\infty$
2	a	$2b/3$	∞	$1:2/3:\infty = 3:2:\infty$

3	$3a/2$	b	∞	$3/2:1:\infty = 3:2:\infty$
4	$2a$	$4b/3$	∞	$2:4/3:\infty = 3:2:\infty$

Barli'q wo'z-ara parallel tegisliklar ushi'n racional sanlardi'n' m:n:r qatnasi'n pu'tin a'piwayi' r:q:r sanlari'ni'n' qatnasi'nday yetip ko'rsetiw mu'mkin yeken. Bul sanlardi' Veyss parametrleri dep ataymi'z. Keltirilgen mi'salda $1/2:1/3:\infty = 1:2/3:\infty = 3/2:1:\infty = 2:4/3:\infty = 3:2:\infty$.



2.5.3-su'wret. Parallel bolg'an tegisliklar semeystvosi' ushi'n simvollardi' aniqlaw

Kristallografiyada tegisliklerdi (yamasa usi' tegislikke tu'sirilgen normallardi') parametrlar menen yemes, al Miller indeksleri menen beriw qabi'l yetilgen. Miller indeksleri pu'tin sanlarga keltirilgen Veyss parametrlarinin' kerii shamalari' boli'p tabi'ladi'. Yeger tegisliklerdin' parametrleri r, q, r bolsa Miller indeksleri bi'layi'nsha aniqlanadi':

$$\frac{1}{p} \cdot \frac{1}{q} \cdot \frac{1}{r} = h : k : l.$$

Keltirilgen mi'salda $h:k:l = 2:3:0$. h,k,l sanlari' tegisliktin' indeksleri dep ataladi'. A'piwayi' qawsi'rmag'a ali'p jazi'lg'an (hkl) sanlari'n tegisliktin' simvoli' dep ataymi'z.

2.6. Keri tor

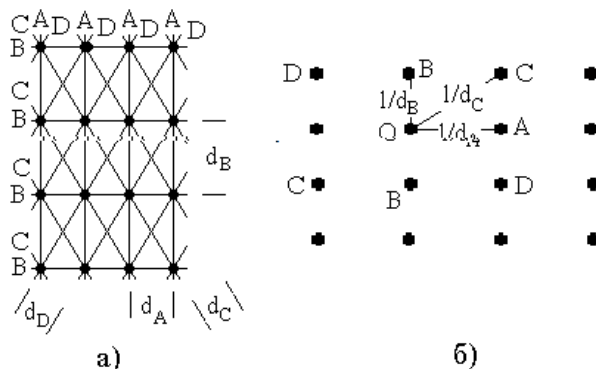
Qatti' deneler fizikasi'nda, atomli'q-kristalli'q quri'li'sti' difrakciyalig' usi'llar menen izertlegende keri tordan paydalani'w u'lken jen'illikti payda yetedi. Bunday tor bi'layi'nsha quri'ladi':

1) Yeger tuwri' tor a, b, c translyaciya vektorlari'nda quri'lg'an bolsa keri tor ko'sherleri a^0 , b^0 , c^0 vektorlari'nda quri'li'p, wolar to'mendegidey vektorli'q ko'beyme tu'rinde aniqlanadi':

$$a^0 = [b^0 c^0], \quad b^0 = [c^0 a^0], \quad c^0 = [a^0 b^0]. \quad (2.6.1)$$

2) keri tordii' ko'sherlik parametrleri a^0 , b^0 , c^0 keri tordag'i' usi' ko'sherlerge normal bag'i'tlang'an tuwri' torlari' arasi'ndag'i' tegisliklar arasi'ndag'i' qashi'qli'qti'n' keri shamalari'na ten'.

Tuwri' tordag'i' ha'r bir (hkl) tegisligine keru torde $[[hkl]]$ tu'yini sa'ykes keledi. Tuwri' tor aymag'i'ndag'i' wo'z-ara parallel bolg'an $\{hkl\}$ tegislikler semeystvosina keru torda usi' tegislikke perpendikulyar bolg'an tuwri'ni'n' boyi'nda jatqan sheksiz ko'p $[[hkl]]$ noqatlari' sa'ykes keledi. Koordinata basi' dep qabi'l yetilgen noqattan bul noqatlardi'n' qashi'qli'g'i' sa'ykes $1/d, 2/d, 3/d, \dots$ shamalari'na ten' boladi'. Bul jerde $d = d_{(hkl)}$ tuwri' tordag'i' $\{hkl\}$ tegislikleri arasi'ndag'i' qashi'qli'q (2.6.1-su'wret).



2.6.1-su'wret. Tuwri' (a) ha'm keru (b) torlar.

(2.6.1) an'latpasi'nan a^0 vektori'ni'n' b ha'm c vektorlari' jatqan tegislikke perpendikulyar yekenligi ko'rinip tur. a^0, b^0 ha'm c^0 vektorlari' a, b , ha'm c vektorlari' si'yaqli' won' u'shlik vektorlar si'pati'nda saylap ali'nadi'.

a^0, b^0 ha'm c^0 vektorlari' tuwri' tor tegislikleri koordinatalari'ndag'i' elementar parallelogrammalardi'n' maydanlari'n beredi, al absolyut shamalari' boyi'nsha wolar tuwri' tordi'n' tegislikleri arasi'ndag'i' qashi'qli'qlarg'a keru proporcional:

$$\begin{aligned} |a^0| &= [b * c] / (a^0[b * c]), \quad |b^0| = [c * a] / (b^0[c * a]), \\ |c^0| &= [a * b] / (c^0[a * b]). \end{aligned} \quad (2.6.2)$$

Tuwri' ha'm keru torlar wo'z-ara tu'yinles, yag'ni'y a, b, c ko'sherlerinde du'zilgen tor a^0, b^0, c^0 ko'sherlerinde du'zilgen torg'a qarata keru, al a^0, b^0, c^0 ko'sherlerinde du'zilgen tor a, b, c ko'sherlerinde du'zilgen torg'a qarata keru boli'p tabi'ladi'.

Keru tor to'mendegidey qa'siyetlerge iye boladi':

1. Keru tor vektori' $g_{(hkl)} = ha^0 + kb^0 + lc^0$ tuwri' tordi'n' (hkl) tegisligine perpendikulyar ha'm shamasi' jag'i'nan tuwri' tordi'n' $\{hkl\}$ tegislikleri arasi'ndag'i' qashi'qli'q d_{hkl} din' keru shamasina ten', yag'ni'y

$$|g_{hkl}| = |ha^0 + kb^0 + lc^0| = 1/d_{hkl}. \quad (2.6.3)$$

2. Keri tordi'n' elementar quti'shasi'ni'n' ko'lemi V^0 tuwri' tordi'n' elementar quti'shasi'ni'n' ko'lemi V ni'n' keri shamasina ten' (ha'm kerisinshe):

$$\begin{aligned} V^0 &= (a^0 [b^0 * c^0]) = 1/V, \\ V &= (a^0 [b * c]) = 1/V^0. \end{aligned} \quad (2.6.4)$$

(2.6.1), (2.6.2) ha'm (2.6.4) formulalardan paydalani'p tuwri' ha'm keri torlar parametrleri a, b, c, a^0, b^0, c^0 lar arasi'ndag'i' baylani'slardi' an'sat keltirip shi'g'ari'w mu'mkin:

$$\begin{aligned} a^0 &= \frac{1}{V} [b * c] = [b * c] / (a^0 [b * c]); \\ b^0 &= \frac{1}{V} [c * a] = [c * a] / (b^0 [c * a]); \\ c^0 &= \frac{1}{V} [a * b] = [a * b] / (c^0 [a * b]). \end{aligned}$$

Bunnan

$$\begin{aligned} |a^0| &= \frac{1}{V} bc \sin \alpha, \\ |b^0| &= \frac{1}{V} \sin \beta, \\ |c^0| &= \frac{1}{V} \sin \gamma. \end{aligned}$$

Soni'n' menen birge

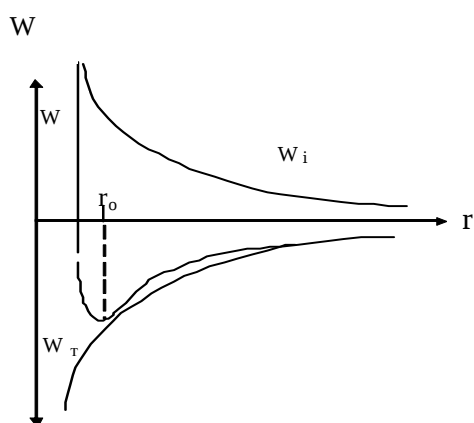
$$\begin{aligned} \cos \alpha^0 &= (\cos \beta^0 \cos \gamma - \cos \alpha) / (\sin \beta^0 \sin \gamma), \\ \cos \beta^0 &= (\cos \alpha^0 \cos \gamma - \cos \beta) / (\sin \alpha^0 \sin \gamma), \\ \cos \gamma^0 &= (\cos \alpha^0 \cos \beta - \cos \gamma) / (\sin \alpha^0 \sin \beta). \end{aligned}$$

Keri tor haqqi'ndag'i' tu'sinik tiykari'nan qi'sqa tolqi'nli' nurlar (tolqi'n uzi'nli'qlari' a, b, c parametrleri menen barabar bolg'an jag'daylar, yag'ni'y 0.05-0.1 angstromnen 50-100 angstromlarga shekemgi rentgen, elektron ha'm neytron tolqi'nlari') tu'skendegi kristallardi'n' shashi'ratiw (tolqi'nlardi'n' difrakciyasi'n) qa'siyetinin' da'wirliligini ta'riyiplew ushi'n paydalani'ladi'. Usi'nday nurlardi'n' kristallardag'i' kristallografiyali'q tegisliklerdegi difrakciyasi' Vul'f-Bregg ten'lemesi $2d_{(hkl)} \sin \theta = n\lambda$ menen ta'riyiplenedi. Bul jerde λ - tu'siwshi nurdi'n' tolqi'n uzi'nli'g'i', θ - difrakciyali'q mu'yesh, n - pu'tin san.

III. QATTI' DENELER FIZIKASI' ELEMENTLERI

3.1. Kristallardi'n' du'zilisi

Molekulalardi'n' payda boli'w mexanizmleri so'z yetilgende, baylani's ta'biyati'nan qa'tiy na'zer, molekula payda yetip ati'rg'an atomlarga yeki ku'sh ta'sir yetiwi ayti'lg'an yedi: u'lken arali'qlarda sezilerli bolg'an (uzaqtan ta'sir yetiwshi) tarti'si'wshi' ku'shleri ha'm kishi arali'qlarda payda bolatug'i'n ha'm arali'q kemeyiwi menen keskin arti'p ketetug'i'n (jaqi'nnan ta'sir yetiwshi) iyyerisiw ku'shleri.



3.1.1 - su'w ret

Iyyerisiw ha'm tarti'si'w ku'shleri menen baylani'sli' bolg'an W_i va W_t potencial energiyalardi'n' atomlar arasi'ndag'i' arali'qqa baylani'sli', ha'm de sistemani'n' toli'q energiyasi' sxemali'q ko'rinite 3.1.1-su'wrette su'wretlengen. Atomlar arasi'ndag'i' arali'q r_0 bolg'anda tarti'si'wshi' ha'm iyyerisiwshi ku'shleri ten'lesedi, yag'ni'y wolardi'n' ten' ta'sir

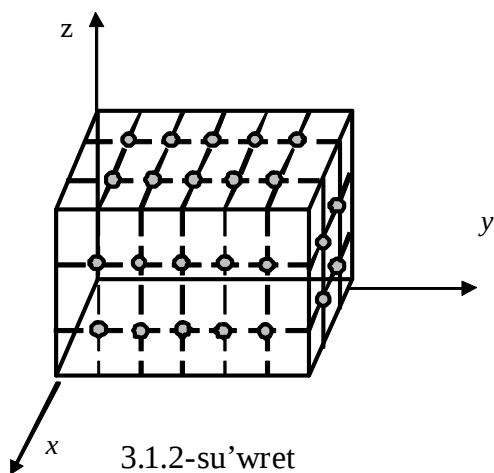
yetiwhisi nolge, sistemani'n' potencial energiyasi' minimal shamag'a iye boladi', na'tiyjede sistema ten' salmaqli'li'q jag'dayg'a yerisedi. Bunday sheshimdi ko'p sanli' atomlar sistemasina ha'm uli'wmalastirsaq, wondag'i' atomlar bir-birinen birdey arali'qta jaylasi'p bekkem du'ziliske iye bolg'an ha'm kristall dep atalg'an deneni payda yetedi. Kristalldi'n' ha'r-bir atomi' (molekulasi') potencial urada jaylasqani' ushi'n wol ten' salmaqli'li'q jag'daydan yerkin ji'lji'p kete almastan, tek ten' salmaqli'li'q jag'dayi' a'tirapi'nda terbelmeli ha'reket yetiwi mu'mkin. Atomlardi'n' ji'lli'li'q ha'reketi energiyasi' baylani's energiyasi'nan arti'p ketkenshe bul jag'day saqlanadi'.

Joqari'dag'i' pikirlerdi biz yeki atom arasi'ndag'i' wo'z-ara ta'sir mexanizmine tiykarlani'p shig'ardi'q. U'sh wo'lsheqli kristallda ha'r bir atomga woni'n' a'tirapi'ndag'i' basqa atomlar ha'm ta'sir yetiwi sebepli na'tiyje biraz qi'yi'n boladi'. Tu'rli bag'darlarda atomlar arasi'ndag'i' arali'qlar ha'r qi'yli' boladi'. Biraq so'z yetilgen ko'rini si'pat'i jag'i'nan

(-) wo'zgermeydi. (-) Kristall qurami'ndag'i' atomlar ken'islikte belgili ha'm ha'r bir zatti'n' wo'zine say ni'zamli'li'qlar menen joylasqan boladi'. Birdey zatti'n' kristallari' tu'rli du'ziliske de ha'm iye boli'wi' mu'mkin. Bul qubi'li'sti' polimorfizm dep ataydi'. Ma'selen: bor (V) elementinin' kristallari' to'rt qi'yli' ko'riniste, temirdiki u'sh qi'yli' ko'riniste h. t. b. ushi'raydi'.

Kristallardi'n' tegisliktegi du'zilisini su'wretlewde kristall tor tu'sinigini paydalani'ladi'. Kristall tor tuyinlerinde atomlar joylasqan ken'islik turidan ibarat. Woni' to'mendegishe ko'riw mu'mkin: x, y, z ko'sherlerden turg'an koordinatalar sistemasi'ni'n' (a'lbette, tek tuwri' mu'yeshli boli'wi' sha'rt yemes) basi'na berilgen zatti'n' bir atomi'n jaylasti'ri'p, ko'sherler boyi'nsha wo'lshe'mleri atomlardi'n' ten' salmaqli'li'q jag'daylari'na say, bazali'q vektorlar dep atalg'an $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ vektorlardi' jaylasti'rami'z. x - ko'sheri boyi'nsha $a, 2a, 3a, \dots$ arali'qlarg'a, y - ko'sheri boyi'nsha $b, 2b, 3b, \dots$ arali'qlarg'a ha'm z - ko'sheri boyi'nsha $c, 2c, 3c, \dots$

arali'qlarg'a atomlardi' jaylasti'ri'p kristall tordi'n' x, y, z ko'sherleri boyi'nsha shi'nji'ri'n payda qi'lami'z.

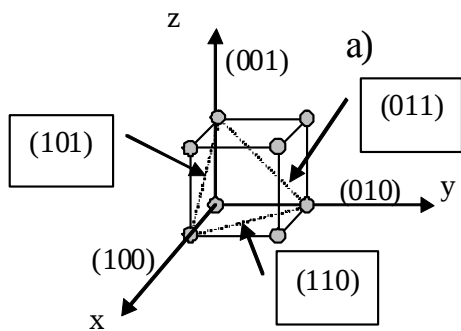


Tu'yinlerdegi atomlardi' ko'shiriw (translyaciya) vektori' dep atalg'an vektor $\mathbf{T} = na + mb + kc$ ja'rdeminde (3.1.2-su'wret) ko'sherler boyi'nsha ko'shirip kristall tor payda yetiledi. $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$ vektorlari'na quri'lg'an yen' kishi uyashani' Brave tori' yamasa elementar uyasha dep ataladi'. Ko'sherler

arasi'ndag'i' α, β, γ mu'yeshler i'qti'yari'y boli'wi' mu'mkin.

Tu'yinlerinde atom joylasqan elementar uyashalardi' a'piwayi' uyashalar dep ataydi'. Qabi'rg'alari'ni'n' yamasa ishinin' worayi'nda ha'm atomlar joylasqan bolsa, wolardi' qabi'rg'alari' yamasa ko'lemli woraylasqan uyashalar dep ataydi'. Ta'biyatta ushi'raytug'i'n barli'q kristallardi' (230 ken'islikli toparlarg'a bo'linedi ha'm 10^5 dan artiq ko'riniske iye) 14 tu'rli Brave elementar uyashalari' ja'rdeminde ko'riw mu'mkin.

Kristallardag'i' tu'yinlerdi, bag'darlardi' ha'm tegisliklerdi belgilew ushi'n Miller indeksleri dep atalg'an tutas sanlar toplami'nan paydalani'ladi' (3.1.3 - su'wret, a,b, c, d).

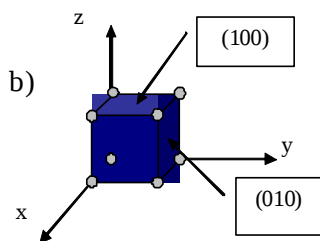


3.1.3-su'wret

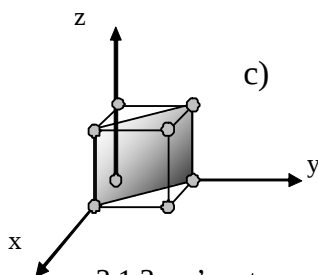
Koordinata ko'sherlerinin basi' si'pati'nda tu'yinlerden biri qabi'l yetilse, wog'an sali'sti'rg'anda basqa tu'yinlerdin' koordinatalari' $x=ma$, $y=nb$, $z=rc$ lar menen ani'qlanadi'. Yeger uzi'nli'q birligi yetip tor turaqli'lari' a, b, c lar qabi'l yetilse tu'yinlerdin' koordinatalari' m, n, k pu'tin sanlardan ibarat boladi'. A'dette, wolar yeki tuwri'

qawi'slar ishine jazi'ladi' $[[m, n, k]]$.

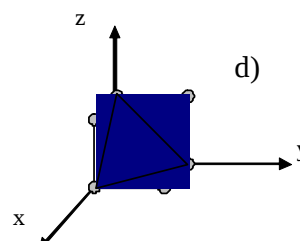
Kristallardag'i' bag'darlar koordinatalar basi'nan wo'tetug'i'n tuwri' si'zi'qlar menen belgilenedi ha'm wolar tuwri' si'zi'qli' qawi'slar ishine ali'p jazi'ladi' $[m, n, k]$ (3.1.3-su'wret, a). Kristall tordin'n' i'qti'yarli' u'sh noqatsi'nan wo'tkerilgen tegisliklerdi atom tegislikleri dep ataydi'.



3.1.3- su'wret



3.1.3- su'wret



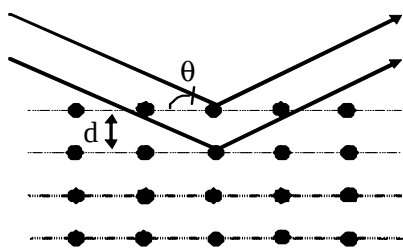
3.1.3- su'wret

Wolar 3.1.3-su'wrette (b, c, d) ko'rsetilgendey belgilenedi. Kristallardi'n' ishki du'zilisini qanday u'yreniw mu'mkin?. Kristallardi'n' du'zilisini ani'qlaw usi'llari' wolardi'n' atomlari' kristall tor payda yetip jaylasqanli'g'i'na tiykarlang'an. Ha'r qanday kristall deneni ko'lemli difrakcion tordan ibarat dep qaraw mu'mkin. Bunda difrakcion tordin'n' da'wiri kristall tordin'n' turaqli'si'na ten' boladi'.

Ko'lemli difrakcion tordan elektromagnit tolqi'nlardin'n' difrakciyalani'w ni'zami' menen rentgen nurlari' difrakciyasi'n baqlag'anda tani'sqan yedik.

Demek, kristalldin'n' tu'rli bag'darlardag'i' betine belgili θ si'rg'anaw mu'yeshi asti'nda rentgen nurlari'n, elektronlardi', neytronlardi' tu'sirip,

wolardi'n' difrakciyasi'n u'yreniw tiykari'nda kristall tordi'n' turaqli'lari'n Vulpf-Bregglar ni'zami' ja'rdeminde ani'qlaw mu'mkin (3.1.4-su'wret)



3.1.4-su'wret

$$2d\sin\theta = m\lambda. \quad (3.1.1)$$

Kristallardan rentgen nurlari'ni'n difrakciyasi'n baqlawg'a tiykarlani'p, wolardi'n' du'zilisini ani'qlaytug'i'n usi'ldi' rentgenografiya dep ataydi'. Elektron yamasa neytronlardi'n' difrakciyasi'na tiykarlang'an usi'llardi' bolsa,

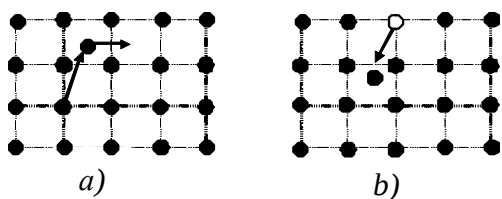
sa'ykes ra'wishte elektronografiya yamasa neytronografiya dep ataydi'.

3.2. Kristallardag'i' nuqsanlar

Yeger kristall torda atomlar barli'q kristall bag'darlari'nda qatesiz da'wirli ra'wishte joylasqan bolsa bunday kristalldi' ideal kristall dep ataydi'. Real kristallarda tu'rli sebeplerge ko're nuqsanlar ushi'rap turi'wi' joqari'da ayti'lg'an usi'llar menen da'lillenedi.

Kristall tordi'n' nuqsanlari' wolardi'n' mexanikal'i'q, ji'lli'li'q, elektr ha'm basqa fizikal'i'q, ximiyali'q qa'siyetlerine u'lken ta'sir ko'rsetedi. Soni'n' ushi'n nuqsanlardi'n' tiykarg'i' tu'rleri ha'm payda boli'w mexanizmleri menen qi'sqasha tani'si'p wo'temiz.

Kristall ishindegi toplani'w jayi'na qarap nuqsanlar noqatli'q, si'zi'qli' ha'm ko'lemli nuqsanlarga bo'linedi.

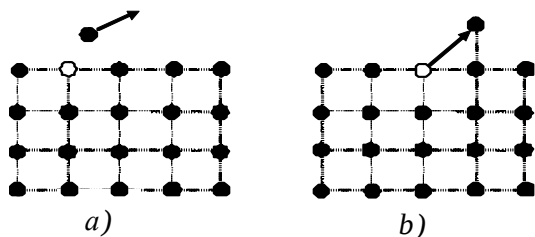


3.2.1- su'wret

Ji'lli'li'q ha'reketi sebepli kristall tor tu'yinlerindeki atomlar wo'z joylari'n taslap ketip (3.2.1-su'wret) tu'yinler arasi'na wo'tip alsa, bunday nuqsandi' noqatli'q yamasa Frenkler nuqsanlari' dep ataydi'.

Atom ketip qalg'an jaydi' "vacant" ori'n dep ataladi'. "Vakant" ori'nlar qon'si' tu'yindegi atomlar tamani'nan iyeleniwi ha'm na'tiyjede atomlardi'n' (tu'yinlerdin') kristall boylap estafetali' ha'reketi payda boli'wi' mu'mkin. Noqatli'q nuqsanlar bet qatlami'ndag'i' atomlardi'n' birewin pu'tinley baylani'si'p ketiwi yamasa baylani'sqan atom kristall betinde jan'a qatlam tu'yinin payda yetiwi sebepli

ha'm payda boli'wi' mu'mkin (3.2.2-su'wret). Bunday nuqsanlardi' Shottki nuqsanlari' dep ataydi'.

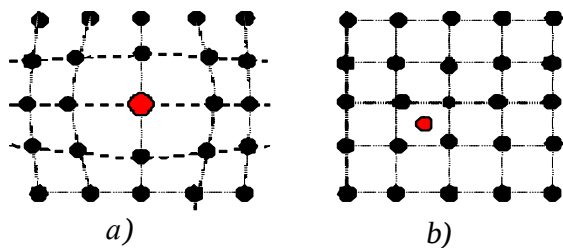


3.2.2- su'wret

Wo'z jayi'n jog'altqan atomlar "vakant" jaylarg'a jaqi'nlasqanda wolarda uslani'p qali'wi' na'tiyjesinde "vakant" jaydi' tolti'ri'wi' mu'mkin. Bul qubi'li'sti' nuqsanlardi'n' rekombinaciyasi' dep

ataydi'. Nuqsanlardi'n' payda boli'wi'nan rekombinaciyalang'ansha wo'tken waqi'tti' nuqsanlardi'n' jasaw waqti' dep ataydi'.

Noqatli'q nuqsanlar kristall torg'a basqa element atomlari' kirip qalg'anda da payda boladi'. Bunda basqa atom tu'yinlerdin' birine yamasa

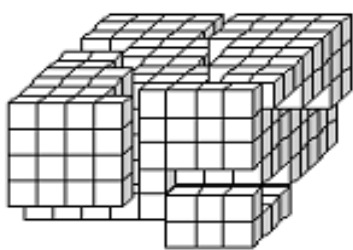


3.2.3- su'wret

wolardi'n' arali'g'i'na jaylasi'wi' mu'mkin. Na'tiyjede kristalldi'n' sol jayi' deformaciyalanadi' (3.2.3-su'wret).

Shegarali'q yamasa vintli dep atalg'an dislokaciyalardi' si'ziqli' nuqsanlar dep ataydi'. Wolar kristallarda

si'rtqi' ku'shler ta'sirinde serpinsiz ji'li'w deformaciyasi' payda bolg'anda baqlanadi' (3.2.4-su'wret).



3.2.4- su'wret

Bet nuqsanlari'na to'mendegilerdi kiritiw mu'mkin:

a) si'rtqi' wortali'q penen ta'sirlesiw na'tiyjesinde kristall betine basqa element atomlari'ni'n' wo'tip qali'wi' ha'm de sol sebepli bette oksid qatlamlardi'n' payda boli'wi';

b) kristall tordi'n' ayi'ri'm jaylari'nda ken'islikli bag'-darlardi'n' wo'zgerip qali'wi' sebepli ishki nuqsanlar payda boladi'.

Kristall ishinde toplani'p qalg'an noqatli'q nuqsanlar, shi'tnag'an joylar, bosli'qlar, stexiometriyani'n' buzi'li'wi' (qatti' yeritpelerde) ko'lemli nuqsanlardi' payda yetedi.

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

Kristall tordi'n' ishki energiyasi' woni' qurawshi' atom ha'm molekulalar energiyalari'ni'n' qosi'ndi'si'nan ibarat. Kristall atomlari'

terbelme ha'rekette boli'p fononlar payda yetip turatug'i'n bolg'anli'qtan, kristalldi'n' toli'q energiyasi' wondag'i' fononlar energiyalari'ni'n' qosi'ndi'si'na ten'.

Kristall tordi'n' ji'lli'li'q si'yi'mli'li'g'i' woni'n' temperaturasi'n 1 gradusqa artti'ri'w ushi'n kerek bolg'an ji'lli'li'q mug'dari'n bildiredi

$$C = \frac{dQ}{dT} \quad (3.3.1)$$

Dene yamasa deneler sistemasi'na ji'lli'li'q berilse, termodinamikanin' 1 - ni'zami' boyi'nsha $dQ=dU+rdV=dU$, sebebi kristalldi'n' ko'lemi sezilerli da'rejede wo'zgermeydi. Bul jag'dayda

$$C = \frac{dU}{dT}, \quad (3.3.2)$$

bul jerde dU - kristall ishki energiyasi'ni'n' wo'zgeriwi. Bug'an itibar bersek kristalldi'n' ji'lli'li'q si'yi'mli'li'g'i' woni'n' temperaturasi'n 1 gradusqa artti'rg'anda kristalldi'n' ishki energiyasi' qanshag'a wo'zgeretug'i'nli'g'i'n ko'rsetedi.

Demek, kristalldi'n' ji'lli'li'q si'yi'mli'li'g'i'n ani'qlaw ushi'n woni'n' ishki energiyasi'nin' temperaturag'a g'a'rezliligin biliwimiz kerek. Kristall kvantli'q sistema bolg'ani' ushi'n woni'n' ishki energiyasi'n kvant statistikasi' ja'rdeminde ani'qlaymi'z.

$$dU = \hbar \omega dN \quad (3.3.3)$$

bul jerde dN jiyilikleri 2 va $2+d2$ arali'g'i'nda bolg'an kristalldag'i' fononlardi'n' sani'

$$dN = v \cdot f \cdot dg \quad (3.3.4)$$

bundag'i' $v=3$, sebebi birdey jiyiliktegi 3 tu'r fononlar bir bag'i'tta tarqali'wi' (yekewi ko'ldenen' ha'm bir boylama fononlar) mu'mkin;

$dg = \frac{4\pi V p^2 dp}{h^3}$ – impul'sleri r ha'm $r+dr$ intervali'nda bolg'an kvant jag'daylar ti'g'i'zli'g'i';

$f = \frac{1}{e^{E/kT} - 1}$ Boze - Eynshteyn bo'listiriw funkciyasi, sebebi fononlardi'n' spini pu'tin san yamasa 0 ge ten' ha'm wolar ushi'n $\mu=0$.

Yendi fononni'n' energiya ha'm impul'sleri menen jiyiligi arasi'ndag'i' ma'lim baylani'slardi' $E = \hbar \omega$ ha'm $r = \hbar \omega / v$ (v - fononni'n' tezligi) yesapqa ali'p, (3.3.4) ni' to'mendegishe jazami'z

$$dN = \frac{3V}{2\pi^2 v^3} \cdot \frac{\omega^2 d\omega}{e^{\hbar\omega/kT} - 1} \quad (3.3.5)$$

Wonda kristalldag'i' jiyilikleri r ha'm $r+dr$ arali'g'i'nda bolg'an fononlardi'n' energiyasi'

$$dU = \frac{3V\hbar}{2\pi^2 v^3} \frac{\omega^3 d\omega}{e^{\hbar\omega/kT} - 1}.$$

Bunnan

$$U = U_0 + \frac{3V\hbar}{2\pi^2 v^3} \int_0^{\omega_m} \frac{\omega^3 d\omega}{e^{\hbar\omega/kT} - 1}, \quad (3.3.6)$$

bul jerde $\omega_m = \omega_m = v \left(\frac{6\pi^2 N}{V} \right)^{\frac{1}{3}}$ - fononlardi'n' maksimal jiyiligi.

(3.3.6) den T boyi'nsha tuwi'ndi' ali'p, kristall tor ji'lli'li'q si'yi'mli'li'g'i'ni'n' uli'wma ten'lemesin tabi'w mu'mkin. A'piwayi'li'q ushi'n to'men ha'm joqari' temperaturalar dag'i' ji'lli'li'q si'yi'mli'li'g'i'n ani'qlaymi'z:

1-hal. Joqari' temperaturalar intervali'nda $\hbar \omega \ll kT$ bolg'anli'g'i' ushi'n

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

dep ali'w mu'mkin.

Wonda

$$U = U_0 + \frac{3V\hbar}{2\pi^2 v^3} \int_0^{\omega_m} \frac{\omega^3 d\omega}{\frac{\hbar\omega}{kT}} = U_0 + \frac{3V}{2\pi^2 v^3} \int_0^{\omega_m} \omega^2 d\omega = U_0 + 3kTN$$

yamasa

$$U = U_0 + 3kTN \quad (3.3.7)$$

bul jerde U_0 - kristall tordi'n' $T = 0$ dag'i' ishki energiyasi'.

Bir mol' kristallda $N = N_A$ bolg'ani' ushi'n $U_\mu = 3N_A kT$.

Wonda joqari' temperaturalarda kristalldi'n' molyar ji'lli'li'q si'yi'mli'li'g'i'

$$C = dU/dT = 3kN_A = 3R \quad (3.3.8)$$

(3.3.8) haqi'yqati'ndada Dyulong ha'm Ptiler ta'jiriybede ani'qlag'an na'tiyje menen birdey.

2 -hal. To'men temperaturalar intervali' $\hbar \omega \gg kT$.

(3.3.6) da wo'zgeriwshilerdi to'mendegishe almasti'rami'z:

$$x = \hbar \omega / kT, \quad x_m = \hbar \omega_m / kT \text{ va } \hbar \omega_m = k\theta \quad (3.3.9)$$

bul jerde 1 - *Depaydi'n' xarakteristikali'q temperaturasi' delinedi*. Woni'n' ma'nisi to'mendegishe: temperatura 0 den 1 g'a shekem wo'zgergende kristallda jiyiliklerinin' ma'nisleri 0 den 2_m ge bolg'an fononlar payda boladi'. 1 den baslap kristallda 2_m nen u'lken jiyilikli fononlar payda bolmaydi'.

(3.3.9) nan

$$\omega = \frac{kT}{\hbar} \cdot x, \quad d\omega = \frac{kT}{\hbar} dx, \quad \omega = \frac{k}{\hbar} \theta \quad (3.3.10)$$

(3.3.10) di (3.3.6) ge qoysaq

$$U = \frac{3Vk^4T^4}{2\pi^2v^3\hbar^3} \int_0^{x_m} \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = \frac{3\hbar V}{2\pi^2v^3} \left(\frac{kT}{\hbar} \right)^4 \cdot \frac{\pi^4}{15}$$

bunda

$$\omega_m^3 = v^3 \frac{6\pi^2 N}{V}$$

yekenligin yesapqa alsaq,

$$U = \frac{3}{5} \frac{\pi^4 kN}{\theta^3} T^4$$

yamasa

$$U_\mu = \frac{3}{5} \pi^4 kN_A \frac{T^4}{\theta^3}$$

Wonda ji'lli'li'q si'yi'mli'li'q

$$C = \frac{dU}{dT} = \frac{12}{5} \pi^4 kN \left(\frac{T}{\theta} \right)^3$$

yamasa

$$C_\mu = \frac{12}{5} \pi^4 kN_A \frac{T^3}{\theta^3} = \frac{12}{5} \pi^4 R \left(\frac{T}{\theta} \right)^3$$

Demek, to'men temperaturalarda ji'lli'li'q si'yi'mli'li'g'i' temperaturani'n' kubi'na proporcional yeken

$$C \sim T^3$$

Buni'n' sebebi, temperaturani'n' arti'wi' menen fononlardi'n' konsentratsiyasi' T^3 boyi'nsha artadi'.

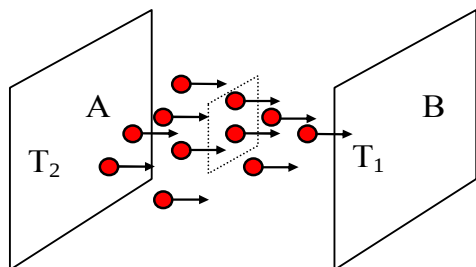
Temperaturani'n' arali'q intervali'nda ishki energiya ha'm ji'lli'li'q si'yi'mli'li'g'i' quramali' tu'rde wo'zgeredi. Uli'wma jag'dayda (3.3.6) den T boyi'nsha tuwi'ndi' ali'p C ni' tabi'w mu'mkin. Temperatura 1 ge jaqi'nlasqan sayi'n fononlar konsentratsiyasi'ni'n' arti'wi'da a'steleydi.

3.4. Tordi'n' ji'lli'li'q wo'tkizgishligi

1. Kristallarda ji'lli'li'q wo'tkizgishlik.

Qatti' denelerdin' terbelisi menen baylani'sli' qubi'li'slarnan biri ji'lli'li'q wo'tkizgishlik. Denenin' ko'birek qi'zg'an bo'liminen woni'n' kemirek qi'zg'an bo'limine ji'lli'li'qti'n' ko'shiw processi deneni ji'lli'li'q wo'tkizgishligi dep ataladi'. Usi' qubi'li'sti' tu'siniw ushi'n gazlardi'n' ji'lli'li'q wo'tkizgishligin yeske tu'siremiz.

A ha'm B plastinalari'n bir-birinen, gaz molekulalari'ni'n' yerkin juwi'ri'w joli' λ_α dan a'dewir u'lken bolg'an arali'qqa jaylasti'rami'z(3.4.1-su'wret). A plastinasi'ni'n' temperaturasi' T_2 , B niki T_1 ha'm $T_2 > T_1$ bolsi'n.



3.4.1-su'wret

Wonda A plastinag'a jaqi'n jerde gaz molekulalari'ni'n' tezligi B plastinag'a jaqi'n jaylasqanlari'nikinen joqari' boladi'. Wolar wo'z-ara soqli'g'i'sqanda bir-birine impul's beredi ha'm belgili waqi't wo'tiwi menen A ha'm B plastinalari'ni'n' temperaturalari' ten'leskenge shekem bul process dawam

yetedi. Temperaturalar parqi' saqlani'p turi'lsa birlik waqi't ishinde birlik bet arqali' A plastinadan B plastinag'a qaray to'mendegi ji'lli'li'q mug'dari' wo'tedi.

$$q = -\chi \frac{dT}{dx} \quad (3.4.1)$$

q - sali'sti'rmali' ji'lli'li'q ag'i'mi',

χ - sali'sti'rmali' ji'lli'li'q wo'tkizgishlik koefficienti,

dT/dx - temperatura gradienti.

Molekulyar kinetik teoriya ko'z qarasi'nan gazlardi'n' sali'sti'rmali' ji'lli'li'q wo'tkizgishlik koefficienti woni'n' parametrlari menen to'mendegishe baylani'sqan:

$$\chi = \frac{1}{3} \rho < v > \lambda > c_v \quad (3.4.2)$$

bul jerde ρ - gazdi'n' ti'g'i'zli'g'i'; $< \rho >$ ha'm $< \lambda >$ sa'ykes tu'rde gaz atomlari'ni'n' wortasha ji'lli'li'q ha'reket tezligi ha'm yerkin juwi'ri'w joli', c_v - turaqli' ko'lemdegi gazdi'n' sali'sti'rmali' ji'lli'li'q si'yi'mli'li'g'i'.

Gaz ti'g'i'zli'g'i' ρ woni'n' basi'mi'na tuwra proporcional tu'rde artadi', λ - bolsa kemeyedi. Basi'mni'n' u'lken ma'nislerinde ($\lambda \ll 1$) $\rho \lambda = \text{sonst}$ boli'wi', yag'ni'y gazlarda ji'lli'li'q wo'tkizgishlik basi'mg'a baylani'sli' bolmay qali'wi' mu'mkin. Basi'mni'n' kemeyiwi menen bolsa λ arti'p baradi'. Basi'm belgili ma'nisine jetkende $\lambda = 1$ dan baslap λ artpay qaladi'. Bul qubi'li's a'dette basi'mni'n' 0.1 ÷ 50 Pa arali'g'i'nda baqlanadi'. Basi'mni'n' kemeyiwi χ de kemeyedi, sebebi ρ kemiydi. Basi'm ja'nede kemeyse $A \rightarrow B$ g'a ha'm $B \rightarrow A$ g'a atomlar wo'z-ara soqli'g'i'spstan ushi'p wo'te baslaydi'. Bul jag'dayda ji'lli'li'q ag'i'mi' $A \rightarrow B$ g'a ha'm $B \rightarrow A$ g'a bag'darlang'an ag'i'mlar ayi'rmasi'na ten' boladi':

$$q = \frac{1}{2} k n < v > (T_2 - T_1) \quad (3.4.3)$$

bul jerde k - Bolgsman turaqli'si', n -plastinalar arasi'ndag'i' gazdi'n' konsentratsiyasi'.

Wortasha tezlik ha'm konsentratsiyani'n' molekulyar kinetikali'q teoriyada ani'qlang'an to'mendegi an'latpalari'n

$$< v > = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \quad n = \frac{p}{kT}$$

Yesapqa alsaq, sali'sti'rmali' ji'lli'li'q ag'i'mi' (3.4.3)

$$q = \sqrt{\frac{2R}{\pi M}} \frac{(T_2 - T_1)}{\sqrt{T}} p \quad (3.4.4)$$

Ko'rinisine iye boladi'. Bul jerde T - plastinalar arasi'ndag'i' wortasha temperatura, M -gazdi'n' molyar massasi', R - universal gaz turaqli'si'.

Demek, to'men temperaturalarda ji'lli'li'q ag'i'mi' gaz basi'mi'na proporcional tu'rde artadi'.

A'dette gazlarda neytral molekulalardan ti'sqari' zaryadlang'an won' ha'm teris ionlar ha'm yerkin elektronlarda boladi'. Wolardi'n' konsentrაციyalari' neytral atomlardikinen 2 - 3 ta'rtipke kishi boladi'. Soni'n' ushi'n wolar ji'lli'li'q wo'tkizgishlikke sezilerli ta'sir ko'rsetpeydi.

Qatti' denelerde bolsa kerisinshe, ma'selen metallardi'n' yerkin elektronlari', kristall tordi'n' terbelisi sebepli payda bolatug'i'n ha'm kristalldi'n' barli'q bag'darlari' boyi'nsha tarqalatug'i'n serpimli tolqi'nlr menen birlikte ji'lli'li'q wo'tkizgishlikke u'lken u'les qosadi'. Soni'n' ushi'n uli'wma halda qatti' denelerdin' ji'lli'li'q wo'tkizgishligi yeki du'ziwshiden ibarat boladi':

$$\chi = \chi_p + \chi_{el} \quad (3.4.5)$$

bul jerde: χ_p - kristall tordi'n' terbelisleri, yag'ni'y fononlar menen baylani'sli' ji'lli'li'q wo'tkizgishligi; χ_{el} - kristalldag'i' yerkin elektronlar menen baylani'sli' ji'lli'li'q wo'tkizgishlik.

Metallarda yerkin elektronlardi'n' konsentrაციyasi' metall atomlari'ni'n' konsentrაციasi' menen bir ta'rtipte boladi', soni'n' ushi'n metallardi'n' ji'lli'li'q wo'tkizgishligi u'lken ha'm tiykari'nan χ_{el} dan ibarat boladi'.

Dielektriklerde bolsa yerkin elektronlar bolmaydi' ha'm wolarde $\chi = \chi_p$, sonli'qtan ji'lli'li'q wo'tkizgishligi to'men boladi'.

Yari'm wo'tkizgishlerdin' ji'lli'li'q wo'tkizgishligide tiykari'nan tordi'n' ji'lli'li'q wo'tkizgishliginen ibarat, temperatura yamasa aralaspalardi'n' konsentrაციasi' arti'wi' menen χ_{el} arti'p χ_p ge jaqi'nlasadi' ha'm uli'wma ji'lli'li'q wo'tkizgishlikte sezilerli da'rejede artadi'.

Qatti' dene qurami'ndag'i' yerkin elektronlar wo'zin ideal gaz atom ha'm molekulalari' si'yaqli' tutadi'. Soni'n' ushi'n qatti' denenin' elektronlar menen baylani'sli' ji'lli'li'q wo'tkizgishligin to'mendegishe ko'rsetiw mu'mkin:

$$\chi = \frac{1}{3} n < v > \lambda > c_{ev} \quad (3.4.6)$$

bunda c_{ev} - elektron gazinin' birlik ko'leminin' ji'lli'li'q si'yi'mli'li'g'i'. Kristallardi'n' sali'sti'rmali' elektr wo'tkizgishligi, ji'lli'li'q wo'tkizgishligi yerkin elektronlardi'n' konsentrაციasi' ha'm wortasha yerkin juwi'ri'w joli'na proporcional bolg'ani' ushi'n

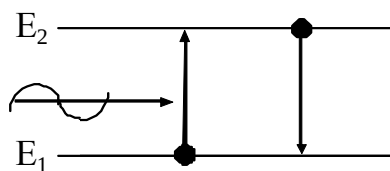
$$\frac{\chi}{\sigma} = \frac{k}{e^e} m < v >^2 = \frac{2k}{e^2} \frac{m < v >^2}{2} = 3 \left(\frac{k}{e} \right)^2 T$$

Yag'ni'y T g'a si'ziqli' baylani'sta boladi'. Bul an'latpa Videman-Frans ni'zami' delinedi.

2. Myossbauer effekti

1904 ji'lda Vud natriy (Na) puwlarina sari' tolqi'n uzi'nli'g'i'ndag'i' nur tu'sirgende bul puwlar tap sonday tolqi'n uzi'nli'g'i'ndag'i' nurlar shi'g'ari'p nurlana baslani'wi'n ani'qladi'. Keyin si'nap (Hg) ha'm basqa elementlerde de sonday qubi'li'slar baqlandi'. Bul qubi'li's rezonans nurlani'w ha'm rezonans juti'li'w dep atala baslandi'.

Bunda atomlar tiykarg'i' jag'daydan yen' jaqi'n oyang'an jag'dayg'a wo'tkende ω jiyilikke iye bolg'an $\Delta E = \hbar \omega$ energiyali' nurdi' intensiv jutadi', son' tiykarg'i' jag'dayg'a qayti'wda sonday ω jiyilikli nurlardi' shi'g'aradi' (3.4.2- su'wret).



3.4.2-su'wret

Fluoressenciyanishu' zattan wo'tken jaqti'li'q, juti'li'wi' sebepli a'ste aqi'ri'n so'nedi. Sol sebepli rezonans fluoressenciya worni'na ko'binshe jaqti'li'qti'n rezonans juti'li'wi' dep ayti'ladi'.

Atom yadrolari' atomlardi'n' wo'zi si'yaqli' diskret energiya qa'ddilerine iye. Yadro qa'ddileri arasi'ndag'i' wo'tiwlerdi γ - nurlar payda yetedi. Atomlarga ko'rinetug'i'n nurlar tu'skende payda bolatug'i'n rezonans fluoressenciya'ga uqsas, yadrolarga γ - nurlari' tu'skende ha'm fluoressenciya boli'p ati'r dep woylaw mu'mkin. Lekin, γ - nurlarda rezonans fluoressenciya qubi'li'si'n baqlaw uzaq waqi'tqa shekem bolmadi'.

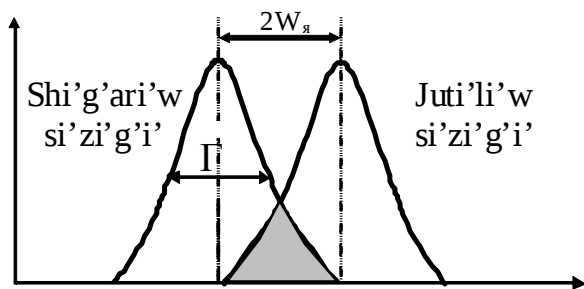
Ani'qsi'zli'q seyueplerine tiykari'nan yadroni'n' barli'q woyang'an energetikali'q qa'ddilerinin' ken'ligi to'mendegi energiya shamalari'na iye boladi':

$$\Delta E \approx \frac{\hbar}{\Delta t}$$

bul jerde Δt - yadroni'n' woyang'an jag'dayda boli'w waqti':

$\Delta t \Rightarrow \infty$ da $\Delta W = 0$, bul tiykarg'i' jag'dayg'a sa'ykes keledi. Yadro woyang'an jag'daydan tiykarg'i' jag'dayg'a wo'tiw ushi'n ketken waqi'tta monoxramatik

bolmag'an γ - nurlari'n shi'g'aradi'. Bul monoxromatikali'q yemes γ - nurlani'w si'zi'qti'n' ta'biyi'y ken'ligi dep, bug'an sa'ykes keliwshi ΔE energiyani' bolsa yadro qa'ddilerinin' ta'biyi'y (G) ken'ligi dep ataladi' (3.4.3-su'wret).



3.4.3-su'wret

Yadrolar tamani'nan γ -nurlari'ni'n' rezonans juti'li'wi' dep sonday γ - nurlari'na ayti'ladi', bul nurlardi'n' ω jiyiligi, tiykarg'i' jag'day tenen woyang'an jag'daylardan biri

arasi'ndag'i' energiya $\hbar \omega$ g'a ten' boladi'.

Yag'ni'y, bul rezonansti'n' ma'nisi sonday jiyilikli γ - fotonlar si'zi'g'i'nda boladi', bul γ fotonlar yadro woyang'an jag'daylardan normal jag'dayg'a wo'tkende payda boladi'. γ - nurlari'n nurlani'w ha'm juti'li'w procesinde yadro alg'an tepki energiya yesapqa ali'nadi'.

Yadro W woyang'an jag'daydan tiykarg'i' jag'dayg'a o'tkende

$$\hbar \omega_{\text{nur}} = W_f = W - W_{ya} < W,$$

energiyali' γ nurlar nurlanadi', bul jerde W_{ya} - yadro alg'an tepki energiya.

Kerisinshe, juti'li'wda bolsa

$$W_f = \hbar \omega_{\text{jut}} = W + W_{ya} > W$$

energiyali' γ nurlar juti'ladi'.

Juti'li'w ha'm nurlani'w si'zi'qlari'nda jiyilikler bir-birine sali'sti'rg'anda $\omega_{\text{jut}} - \omega_{\text{nur}} = \Delta \omega$ g'a ji'ljig'an boladi'. Demek, γ kvantti'n' juti'li'w ha'm nurlani'w procesinde yadro alg'an uli'wma tepki energiya:

$$\hbar \Delta \omega = 2W_{ya}.$$

Yadrog'a beriletug'i'n W_{ya} tepki energiya foton impul'si R_f menen ani'qlanadi', bunda juti'li'w ha'm nurlani'w waqti'nda yadro $R_{ya} = R_f$ tepki impul'sin aladi':

$$W_{ya} = \frac{P_{ya}^2}{2M_{ya}} = \frac{P_{\phi}^2}{2M_{ya}} = \left(\frac{\hbar \omega}{c} \right)^2 \frac{1}{2M_{ya}}$$

Bul jerde M_{ya} - yadro massasi'. Ma'selen $^{191}_{77}\text{Ir}$ iridiy yadrosi'ni'n' $W=129$ ke V jag'dayi' ushi'n $W_{ya} = 0,05$ eV, $\hbar \Delta \omega = 0,1$ eV boli'p, qa'ddinin' ta'biyiy

ken'liginen bir qansha u'lken. Sol sebepten bir yadro ushi'n rezonans juti'li'w qubi'li'si' baqlanbaydi'.

Yadro kristall torda turg'anda γ - nurlari'ni'n' juti'li'wi' yamasa nurlani'wi'da wog'an beriletug'i'n tepki energiya keskin kemeyedi, sebebi bul jag'dayda yadro alg'an impul's ha'm tepki energiya bir yadrog'a yemes pu'tin kristall torg'a beriledi. Kristalldi'n' massasi' yadro massasi'nan u'lken, juti'li'wda ha'm nurlani'wda joq boli'p ketiwshi energiya W_{ya} ju'da' kishi boladi'. Bunday jag'dayda γ - fotonlari'ni'n' rezonans juti'li'wi' ha'm nurlani'wi' baqlanadi', bul rezonans belgili ω jiyilikke say keledi ha'm woni'n' ken'ligi ta'biyiy ken'lik ta'rtibinde boladi'.

γ - nurlari'n (tepki) energiya jog'altpastan rezonans nurlani'wi'na (juti'li'wi'na) Myossbauer effekti dep ataydi'.

3.5. Fononlardi'n' ko'shiw procesi

Energiyani' jetkeriwshi bo'leksheler si'pati'nda fononlar ali'nsa ha'm ten'lemege fononlardi'n' konsentratsiyasi' ha'm wortasha juwi'ri'w joli' kiritilse, kristall tordi'n' ji'lli'li'q wo'tkizgishligin $\chi = \frac{1}{3}\rho < v > \lambda > c_v$ menen su'wretlew mu'mkin. Usi' ma'sele sheshimine toqtalmastan, qubi'li'sti'n' ayi'ri'm wori'nlari'n analiz yetemiz.

Wo'tkende ayti'p wo'tkenimizdey, kristall temperaturasi' arti'wi' menen fononlardi'n' tek g'ana konsentratsiyasi' wo'zgerip qalmastan, ba'lki wolardi'n' energetikali'q spektrleride, soni'n' menen birge ko'pshilik jag'daylarda shashi'raw mexanizmleride wo'zgeredi.

To'men temperaturalarda kristallarda tek kishi energiyali' $E = \hbar \omega$ (yag'ni'y uzi'n tolqi'nlardi' payda yetetug'i'n terbelisler) fononlar boladi'. Bunday fononlar tordi'n' nuqsanlari'nda ha'm mayda kristallshalari'-ni'n' shegaralari'nda shashi'raydi'.

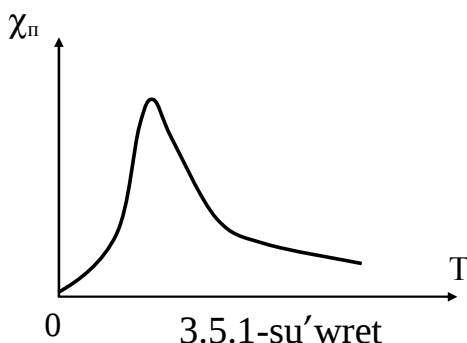
Kristall tordi'n' ji'lli'li'q si'yi'mli'li'g'i' to'men temperaturalarda T^3 ni'zam boyi'nsha artadi'. Demek, fononlardi'n' konsentratsiyasi'da berilgen temperaturalar arali'g'i'nda T^3 boyi'nsha artadi'. Fononlardi'n' wortasha

yerkin juwi'ri'w arali'g'i' bolsa temperaturaga baylani'sli' yemes. Soni'n ushi'n χ_p de T^3 ni'zam boyi'nsha artadi'.

Temperatura arti'wi' menen fononlar konsentratsiyasi'ni'n' wo'siwi to'menleydi.

Temperatura arti'wi' menen fononlar energiyasi'ni'n' spektrinde yerkin juwi'ri'w arali'g'i' kishi bolg'an joqari' jiyilikli (qi'sqa tolqi'nli') fononlardi'n' u'lesi arti'p baradi'. Bunnan ti'sqari' joqari' temperaturalarda fononlardi'n' wo'z-ara ta'sirlesiw processi ku'sheydi. Temperatura qansha joqari' bolsa process sonsha ku'sheydi, yag'ni'y fononlardi'n' yerkin juwi'ri'w arali'g'i' qi'sqaradi'. Sanap wo'tilgen processler sebepli joqari' temperaturalar intervali'nda tordi'n' ji'lli'li'q wo'tkizgishligi temperaturag'a keriproportional tu'rde wo'zgeredi.

Temperaturani'n' arali'q intervali'nda ji'lli'li'q wo'tkizgishlik koefitsientinin' temperaturag'a baylani'si' quramali' boladi' ha'm kristalldag'i' nuqsanlardi'n' sani' ha'm tu'rine qarap wo'zgeredi (3.5.1-su'wret).



Kristall torda nuqsanlar bolmasa tordi'n' terbelisi toli'g'i' menen da'wirli (garmonikali'q) boli'p ha'm wolar paydayetken tolqi'nlar bir-biri menen ushi'rasqanda wo'z-ara ta'sirlespesten biri yekinshisinin' arasi'nan wo'tip ketken bolar yedi.

Yeger usi' kristall boylap temperatura gradientin payda qil'saq kristalldi'n' i'ssi' ushi'ndag'i' u'lken amplituda menen terbeliwshi atomlar wo'z energiyalari'n atomlarga berip pu'tkil kristall boylap ji'lli'li'q tolqi'nleri' tarqalg'an bolar yedi.

Real kristallarda qon'si'las atomlardi'n' wo'z-ara ta'siri Gukni'zami'nan parq qiladi'.

$$F = -\frac{k\Delta x}{x_0} + \gamma \left(\frac{\Delta x}{x_0} \right)^2 + \dots \quad (3.5.1)$$

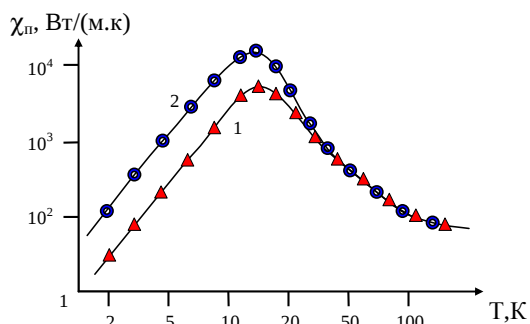
bul jerde γ - angarmonikalıq koefficient delinedi. (3.5.1) din' yekinshi ag'zasi'ni'n' ma'nisi 1 ge ha'm terbelis amplitudasi'na (temperaturag'a) baylani'sli' boladi' ha'm to'mendegi na'tiyjelerge ali'p keledi:

1) temperatura arti'wi' menen atomlar arasi'ndag'i' arali'qti'n' wo'zgeriwi kristalldi'n' ji'lli'li'qtan ken'eyiw koefficientine proporcional boladi';

2) terbelisler garmonikligi buzi'ladi' ha'm usi' sebepli payda bolg'an tolqi'nlar bir-birinen g'a'rezsiz tarqalmaydi', wolar bir-biri menen ushi'rasqanda shag'i'li'si'wi', yag'ni'y wo'z bag'darlari'n energiya almasi'w arqali' wo'zgertiwleri mu'mkin.

Ko'rsetilgen sebeplerge baylani'sli' kristallardi'n' ji'lli'li'q wo'tkizgishligi shekli boladi' ha'm woni'n' atomlari' arasi'ndag'i' arali'qqa baylani'sli'.

Ji'lli'li'q wo'tkizgishlik koefficienti χ zatti'n' agregat hali'na, woni'n' atom - molekulyar du'zilisine ha'm ximiyali'q qurami'na, temperatura, basi'm ha'm basqa parametrlerge baylani'sli'. Siyreklesken gazlarda molekulalardi'n' yerkin juwi'ri'w joli' λ i'di's diywallari' arasi'ndag'i' arali'q L ge sezilerli jaqi'nlasqanda gazdi'n' ji'lli'li'q wo'tkizgishligi keskin kemeyip ketedi. Bul jag'day Dyuar i'di'slari'n (termoslar) tayarlawda qollani'ladi'. Ji'lli'li'q ha'reket energiyasi'ni'n' ko'shiriliw processin wortali'q wo'lshemlerine baylani'sli' boli'p qali'wi' - "wo'lshemli effekt" kristall qatti' denelerde ha'm baqlanadi'. Taza kristallardi'n' to'men temperaturalar dag'i' torli'q ji'lli'li'q wo'tkizgishlik koefficienti wolardi'n' si'zi'qli' wo'lshemlerine baylani'sli' (χ_n/R) boli'p qali'wi'n birinshi ma'rte Kazimer G.V. (1939) tapqan. Payerlstin' teoriyali'q ko'rsetiwinshe joqari' temperaturalarda fonon-fonon



3.5.2-su'wret

shashi'li'w mexanizmi sebepli fononlardi'n' yerkin juwi'ri'w joli' temperaturag'a kerı proporcional ($\lambda_f \sim 1/T$), to'men temperaturalarda bolsa $\lambda_f \sim \exp(1/T)$, yag'ni'y temperatura pa'seyiwi menen tez arti'p baradi'. Suyiq geliy teperaturasi'nda (4,2K) λ_f kristall wo'lsheminen ha'm asi'p ketiwi mu'mkin. Bunday jag'daylarda

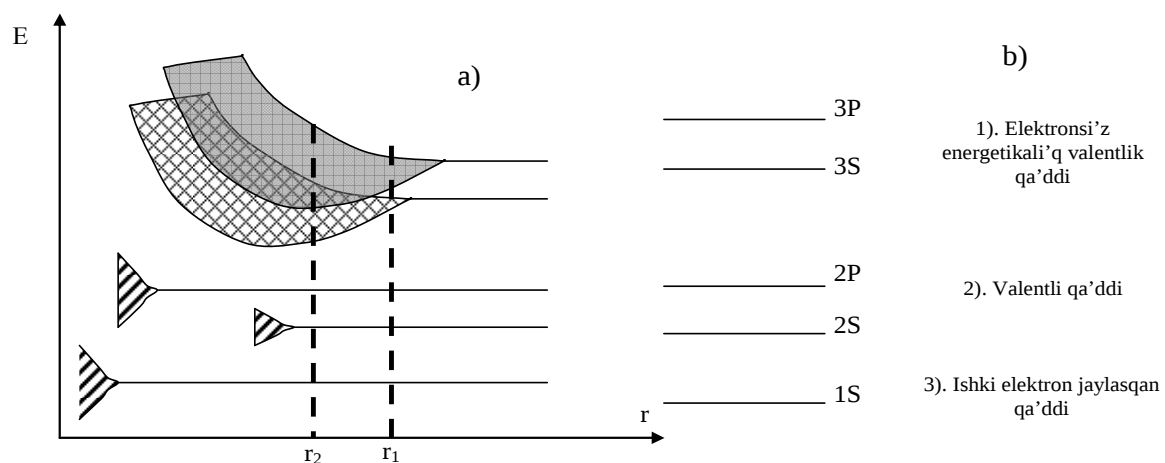
fononlardi' kristall boylap ko'shiriliw processi wolardi'n' kristall betinde ha'm basqa defektlerde shashi'li'wi' sebepli sheklenip qaladi'. Ji'lli'li'q wo'tkizgishliktin' "wo'lshemli effekti" R. Birman ta'repinen Li de ta'jreybede baqlang'an (3.5.2-su'wret, 1 - si'zi'q ushi'n sterjen kese-kesim maydani' $1,33 \cdot 0,91 \text{ m}^2$, 2 - si'zi'q ushi'n bolsa $7,55 \times 6,97 \text{ mm}^2$).

3.6. Qatti' denelerdin' elektr wo'tkizgishligi

1. Zonalar teoriyasi'nin' elementleri.

Elektronli'q teoriyani'n' rawajlani'wi' na'tiyjesinde qatti' denelerdin' zonalar teoriyasi' islep shi'g'i'ldi'. Bul teoriya boyi'nsha qatti' dene kristalli'q du'ziliske iye dep qarali'p, kristall torlar arasi'nda ha'reketleniwshi elektronlardi'n' jag'daylari' u'yreniledi. Kristall tordag'i' elektron ha'm yerkin elektronlar si'yaqli' tordi'n' da'wirli potencial maydani'nda ha'reket yetedi.

Pauli prinsipi boyi'nsha kristallardag'i' elektronlar belgili energetikali'q jag'daylarda tura aladi'. Bul energetikali'q jag'daylar energetikali'q zonalg'a birigedi. Energetikali'q zonalar bolsa bir - birinen qadag'an yetilgen zonalar menen aji'ralg'an boladi'. (3.6.1(a)- su'wret).



3.6.1-su'wret

Atomlardi'n' birlesiw na'tiyjesinde kristallda payda bolatug'i'n zonalar di'n' kelip shi'g'i'wi'n ani'qlayiq.

Buni'n' ushi'n da'slep N dana izolyaciyalang'an atomnan ibarat deneni qaraymiz. Izolyaciyalang'an atomdag'i' elektronlardi'n' jag'dayi'n' kvant sani'n, l , m_l , m_s menen si'patlani'wi' bizge belgili, yag'ni'y wolar qa'legen

energiyag'a iye bolmastan diskret ma'nisli energiyag'a iye boladi'. Bul atomda ha'r bir jag'day energetikali'q diagrammada bir energetikali'q jag'daydi' payda yetedi (3.6.1(b) –su'wret).

Yeger atomlar bir-birine jaqi'nlassa, wolar arasi'ndag'i' wo'z-ara ta'sir arti'p baradi', woldi'n' arasi'ndag'i' arali'q ju'da' jaqi'n bolsa, ha'r-bir atom qon'si'las atom payda yetken ju'da ku'shli elektr maydanda turi'p woni'n' menen wo'z maydani' arqali' ta'sirlesedi. Na'tiyjede, elektronlardi'n' energetikali'q jag'daylari' i'di'raydi', yag'ni'y N birdey energetikali'q jag'daylar worni'na N bir-birine jaqi'n, biraq sa'ykes kelmeytug'i'n jag'daylar payda boladi'. Solay yetip, izolyaciyalang'an atomdag'i' ha'r bir energetikali'q jag'day, kristallarda N ti'g'i'z jaylasqan zonalaridan ibarat bolg'an energetikali'q jag'daylar toplami'n payda etedi.

Demek, qatti' denede izolyaciyalang'an bo'lek energetikali'q jag'daylar worni'na energetikali'q zonalar payda bolar yeken.

I'di'raw da'rejesi barli'q jag'daylar ushi'n birdey yemes. Atomdag'i' si'rtqi' (valentli) elektronlar jaylasqan jag'daylar ku'shli ta'sirge ushi'rap, ishki elektronlar jaylasqan jag'daylar bolsa ku'shsiz wo'zgeredi.

- 1) elektronsi'z energetikali'q jag'daylar zonasi'.
- 2) valent elektronli'q energetikali'q jag'daylar zonasi'.
- 3) ishki elektronlar jaylasqan energetikali'q jag'daylar zonasi'.

Yeki energetikali'q zonani'n' energetikali'q jag'daylari' arasi'ndag'i' energiya parqi'; 10^{-22} eV boladi', demek energetikali'q zonalar a'melde u'zliksiz spektrdi beredi. Bul bolsa, wo'z na'wbetinde elektronni'n' bir zona menen shegaralang'an energetikali'q jag'daylarda ha'reket yete ali'wi'n ko'rsetedi, yag'ni'y berilgen zonadag'i' elektronlar bir atomnan yekinshi atomg'a wo'te alg'anli'g'i' sebepli, ha'mme atomlar ushi'n uli'wma boli'p qaladi'.

Energetikali'q zonadag'i' ha'mme jag'daylar elektronlar menen ba'nt bolsa, bunday zonani' tolti'ri'lg'an zona dep ataydi'.

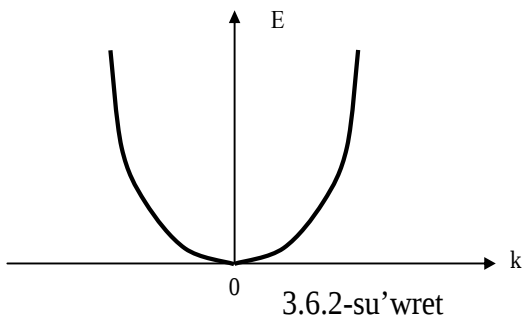
Elektronlar turi'wi' mu'mkin bolg'an zonalar ruxsat yetilgen zonalar dep ataladi'.

Kristallardag'i' atomlardi'n' qa'siyetlerine qarap ten'salmaqli jag'dayda atom arasi'ndag'i' arali'q r_1 ko'rinishinde yamasa r_2 ko'rinishinde boladi',

r_1 ko'riniside jag'daylar wortasi'nda qadag'an yetilgen zona payda boladi', r_2 arali'qta bolsa qon'si'las zonalar bir-birin bekitedi.

Kristallardag'i' energetikali'q zonalar, Shredinger ten'lemesin sheshiw menen ani'qlanadi'.

Kristalldag'i' elektronlar derlik yerkin elektronlar boli'p, wolar potencial maydanda ha'reketlenedi dep qaraymi'z. Bul maydandi' kristall tor payda yetip, wonda ha'reketleniwshi elektronni'n' jag'dayi' Shredinger ten'lemesi menen ani'qlanadi',



3.6.2-su'wret

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + U\psi = E\psi \quad (3.6.1)$$

bul jerde ∇ -elektronni'n' potencial energiyasi'.

Da'wirli potencial maydan ushi'n (3.6.1) ten'lemenin' sheshimi

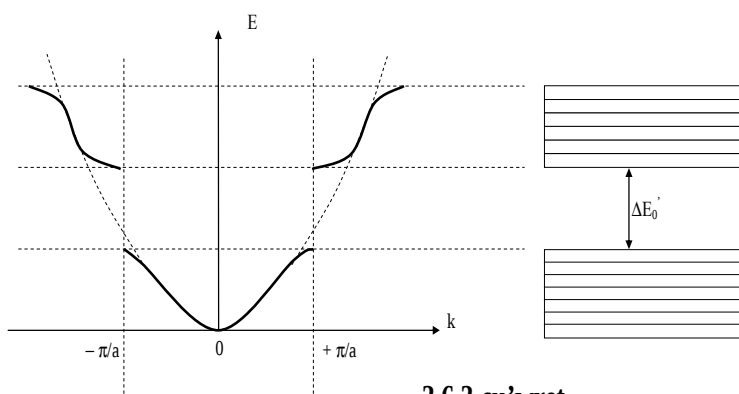
$$Y_k = u_k(r) e^{-ikr} \quad (3.6.2)$$

ko'riniside bolatug'i'nli'g'i'n Blox da'liyillegen. (2) *funkciya Blox funkciyasi dep ataladi'*, bul jerde $u_k(r)$ – tor da'wiri menen wo'zgeretug'i'n da'wirli funkciya.

Yerkin elektronlar energiyasi'ni'n' tolqi'n sani'na baylani'sli' grafigi

$$E = \frac{p^2}{2m} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} \quad (3.6.3)$$

3.6.3 – su'wrettegidey, biraq energiyani'n' ma'nisi u'zliksiz boli'p ko'ringeni menen $E(k)$ diskret noqatlar toplami'nan ibarat, biraq bul noqatlar sonday



3.6.3-su'wret

qali'n' jaylasqanli'qtan wolar tuwri' si'zi'q boli'p ko'rinedi.

Da'wirli wo'zgeriwshi maydan ushi'n bolsa $E(k)$ baylani's 3.6.3 -su'wrettegidey ko'riniske iye.

3.6.3 - su'wrette bir wo'lsheqli kristall ushi'n Brillyun zonasi'

keltirilgen. $k = \frac{\pi}{a} n$, bunda ($n = \pm 1, \pm 2, \dots$) noqatlarda $E(k)$ u'ziledi ha'm ΔE_0 , $\Delta E_0, \dots$ qadag'an yetilgen zonalar payda boladi'.

Yeger $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ - tolqi'n uzi'nli'g'i' arqali' an'ladi'q, E (k) u'zilip, qadag'an

yetilgen zonani'n' payda boli'w sha'rti

$$n\lambda = 2a \quad (3.6.4)$$

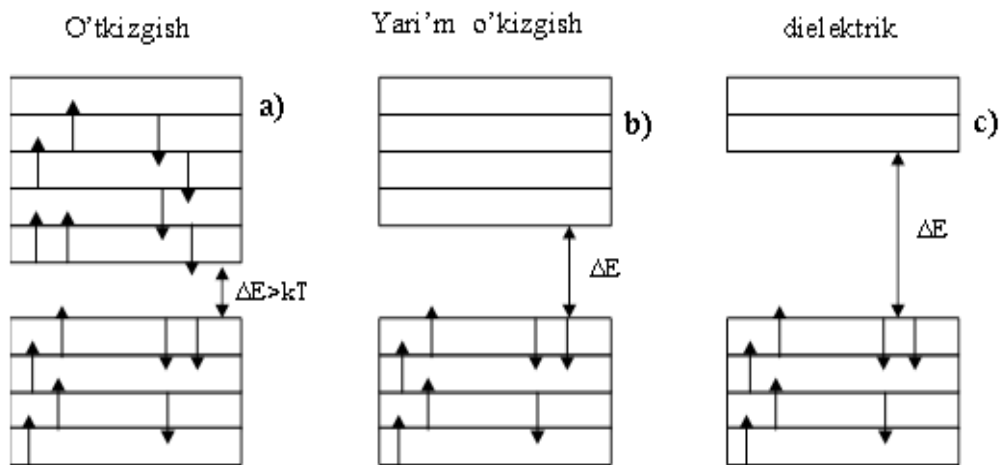
$2a \sin \alpha = n\lambda$ - bul bolsa Vul'f - Bregg ten'lemesi, yag'ni'y atomlar jaylasqan tegislikten qaytqan tolqi'nni'n' tolqi'n uzi'nli'g'i' λ ni ko'rsetedi.

Haqi'yqati'nda da elektronlar tolqi'n qa'siyetine iye boli'p, wolardi'n' kristalldag'i' ha'reketin elektronlar tolqi'nni'n' tarqali'wi' dep qaraw mu'mkin.

Solay yetip, kristallarda elektronlar energetikali'q zonalar boylap bo'listirilgen boladi'.

Elektronlar kristallda to'mengi energetikali'q zonadan baslap joqarg'i' zonalarg'a qaray toli'p baradi'.

Zonalardag'i' elektronlardi'n' bo'listiriliwi ha'm qadag'an yetilgen zonalardi'n' ken'ligine qarap qatti' deneler wo'tkizgish, yari'm wo'tkizgish ha'm izolyatorli'q qa'siyetlerine iye boladi' (3.6.4 - su'wret).



3.6.4-su'wret

2. Kristall tordag'i' elektronni'n' ha'reketi. Effektivlik massa

Tolqi'n sani' $\vec{k}$ elektronni'n' impul'si $\vec{P}$ menen

$$\vec{P} = \hbar \vec{k} \quad (3.6.5)$$

formula arqali' baylani'sqan. Ani'qsi'zli'q qatnaslari' boyi'nsha $\Delta x \cdot \Delta R \geq \hbar$ wonda

$$\Delta x \cdot \Delta k \geq 1 \quad (3.6.6)$$

k - ani'q bolg'anda ($\Delta k = 0$) elektronni'n' kristalldag'i' worni' ani'q bolmaydi'. Meyli ($\Delta k \neq 0$) bolsi'n, bul jag'dayda elektron $\Delta x = 1/\Delta k$ aralaqta jaylasqan boladi'.

Superpoziciya prinsipi boyi'nsha elektronni'n' jag'dayi'n ani'qlawshi' $\psi_k = U_k e^{-ikr}$ funkciya e^{-ikr} ko'rinisidagi tegis tolqi'nlardi'n' qosi'ndi'si'nan ibarat boladi', bul tolqi'nlar bolsa Δk arali'qta jatadi'.

Yeger Δk ju'da' u'lken bolmasa, wonda tegis tolqi'nlar superpozitsiyasi' tolqi'n paketin payda yetedi. Na'tiyjede tolqi'n amplitudasi'

$$\vec{v}_{gr} = \frac{d\omega}{dk} \quad (3.6.7)$$

gruppali'q tezligi menen ha'reketlenedi. Elektron usi' tolqi'n toplami'ni'n' worayi'nda dep qabi'l yetilse, $\vec{v}_{gr}$ elektronni'n' kristalldag'i' tezligin an'latadi'.

$E = \hbar \omega$ den paydalani'p,

$$\vec{v}_{gr} = \frac{1}{\hbar} \cdot \frac{d\varepsilon}{dk} \quad (3.6.8)$$

Yendi E elektr maydani' ta'sirinde kristalldag'i' elektron wo'zin qalay tutatug'i'nli'g'i'n ani'qlayi'q. Bunda tor payda yetken $\vec{F}_{kris}$ ku'shten ti'sqari' elektrong'a $\vec{F} = eE$ ku'shide ta'sir yetedi. dt waqi't arali'g'i'nda bul ku'shler elektron u'stinen

$$dA = \vec{F} \cdot \vec{v}_{gr} \cdot dt \quad (3.6.9)$$

jumi's atqaradi'. (3.6.8) ha'm (3.6.9) dan

$$dA = \vec{F} \frac{1}{\hbar} \frac{d\varepsilon}{dk} dt \quad (3.6.10)$$

Bul jumi's elektron energiyasi'n artti'ri'wg'a sari'planadi', yag'ni'y $\Delta A = \Delta E$.

$$\frac{d\varepsilon}{dk} dk = d\varepsilon$$

desek,

$$\frac{d\varepsilon}{dk} dk = \frac{\vec{F}}{\hbar} \frac{d\varepsilon}{dk} dt$$

bunnan

$$\frac{dk}{dt} = \frac{\vec{F}}{\hbar} \quad (3.6.11)$$

(3.6.8) di differenciallap

$$\frac{d\vec{v}_{gr}}{dt} = \frac{1}{\hbar} \frac{d}{dt} \left(\frac{d\varepsilon}{dk} \right) = \frac{1}{\hbar} \frac{d^2\varepsilon}{dk^2} \cdot \frac{dk}{dt}$$

(3.6.11) ge tiykarlani'p

$$\frac{d\vec{v}_{gr}}{dt} = \frac{1}{\hbar} \cdot \frac{d^2\varepsilon}{dk^2} \cdot \frac{\vec{F}}{\hbar}$$

yamasa

$$\vec{F} = \frac{\hbar^2}{d^2\varepsilon/dk^2} \frac{d\vec{v}_{gr}}{dt} \quad (3.6.12)$$

(3.6.12) ni N'yutonni'n' II ni'zami' $\vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt}$ menen sali'sti'rsaqlar,

$$m^* = \frac{\hbar^2}{d^2\varepsilon/dk^2} \quad (3.6.13)$$

Bul shama elektronni'n' effektiv massasi' dep ataladi'.

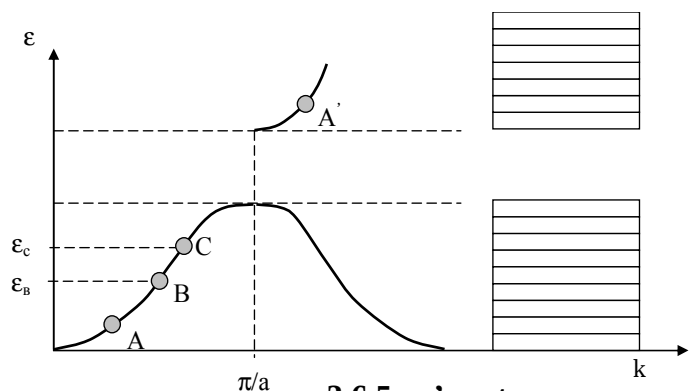
Yerkin elektronlar ushi'n $\varepsilon = \frac{\hbar^2}{2m} k^2$ ten'lemesindegi m di m^* g'a almasti'ri'p bul an'latpani'n' kristallar ushi'nda duri's yekenligin da'lillew mu'mkin.

$$\frac{d^2\varepsilon}{dk^2} = \frac{\hbar^2}{m^*}$$

Demek, ha'reket ten'lemesi $m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} + \vec{F}_{krist}$ nen elektronni'n' kristall tor boylap ha'reketin ani'qlawda tek $\vec{F} = e\vec{E}$ ku'shti ha'm m massa worni'na effektiv m^o massani' ali'wi'mi'z tiyis.

Yendi effektiv massa m^* elektronni'n' ruxsat yetilgen zonadag'i' jaylasqan worni'na qalay baylani'sli' bolatug'i'nli'g'i'n ko'reyik (3.6.5-su'wret).

Zonani'n' to'mengi bo'liminde (A va A¹) E(k) yerkin elektronlardikinen derlik parq qil'maydi', yag'ni'y $m^* G'$ m. Buri'li'w noqati'nda (V da) $d^2E/dk^2=0$, yag'ni'y $m^* \rightarrow \infty$. Bul jag'day elektronni'n' ha'reketine



3.6.5-su'wret

(E_v energiyag'a iye jag'dayi'nda turg'an) si'rtqi' maydan hesh qanday ta'sir yetpeytug'i'nli'g'i'n ko'rsetedi.

Ruxsat yetilgen zonani'n' C noqati' jaqi'ni'nda $\frac{d^2E}{dk^2} < 0$, yag'ni'y k arti'wi' menen $\frac{d^2E}{dk^2}$ kemeyedi. Bug'an sa'ykes tu'rde elektronni'n' effektiv massasi' m^* ruxsat yetilgen zonani'n' joqari'si'nda teris ma'niske iye boladi'. Haqi'yqati'nda da bul $\vec{F} = \vec{F}_{krist}$ ku'shi ta'siri asti'nda E_c energiyag'a iye jag'daydag'i' elektron $\vec{F} = e\vec{E}$ si'rtqi' ku'sh bag'i'ti'na qarama-qarsi' bag'i'tlang'an tezleniw alatug'i'nli'g'i'n ko'rsetedi.

3.7. Metallardag'i' elektr wo'tkizgishlik

Kvant mexanikasi' ko'z qarasi'nan qarag'anda ideal kristall tordag'i' elektronlar hesh qanday tosi'qqa ushi'ramastan ha'reket qi'ladi', buni'n' na'tiyjesinde metallardag'i' elektr wo'tkizgishlik sheksiz u'lken boli'wi' kerek, biraq kristall tor hesh waqi'tta ideal taza bolmaydi', sebebi torda ba'rhama belgili da'rejede nuqsanlar (qosi'mta ha'm vakanciya) boladi'. Bul nuqsanlar elektronlardi'n' shashi'rawi'na, yag'ni'y wolardi'n' ta'rtpili ha'reketine qarsi'li'q ko'rsetedi. Bunnan ti'sqari' tordi'n' atomlari'da ba'rhama ten'salmaqli'li'q hali' a'tirapi'nda terbelip (ji'lli'li'q terbelisi) turadi'.

Bular metallarda elektr qarsi'li'g'i'n payda yetedi. Yeger metall qansha taza ha'm temperaturasi' qansha to'men bolsa, elektr qarsi'li'g'i' sonsha kem boladi'.

Metallardi'n' sali'sti'rma elektr qarsi'li'g'i'n

$$r = r_{ter} + r_{qosi'mta} \quad (3.7.1)$$

ko'rinishinde an'lati'w mu'mkin.

r_{ter} - tordi'n' ji'lli'li'q terbelisi na'tiyjesinde payda bolatug'i'n qarsi'li'g'i', $r_{qosi'mta}$ - jat atomlarda elektronlardi'n' shashi'rawi' na'tiyjesinde payda bolg'an qarsi'li'q.

Yeger $T = 0$ K bolsa, $r_{ter} = 0$.

Metald'i'n' ko'lem birliginde n dana yerkin elektronlar bolsi'n. Bul elektronlardi'n' wortasha tezligi $\langle \vec{v} \rangle$ to'mendegishe ani'qlanadi'

$$\langle \vec{V} \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \vec{V}_i \quad (3.7.2)$$

Yeger $\vec{E}$ si'rtqi' elektr maydani' joq bolsa, yag'ni'y $\vec{E}=0$, $\langle \vec{V} \rangle=0$ boladi'. Yeger $\vec{E} \neq 0$, bolsa $\langle \vec{V} \rangle \neq 0$ boladi' ha'm tok payda boladi'. Elektrong'a

$$\vec{F} = -e\vec{E} \quad (3.7.3)$$

elektr ku'shi ha'm

$$\vec{F}_{qarsi'li'q} = -r \langle \vec{V} \rangle \quad (3.7.4)$$

qarsi'li'q ku'shi ta'sir qi'ladi'.

Bunday jag'dayda elektronni'n' kristalldag'i' ha'reket ten'lemesi to'mendegishe an'latiladi'

$$m^* \frac{d \langle \vec{V} \rangle}{dt} = -e\vec{E} - r \langle \vec{V} \rangle \quad (3.7.5)$$

bunda m^* - elektronni'n' effektiv massasi' $m^* = \frac{\hbar^2}{d^2 E / dK^2}$. Bul ten'lemeni sheshiw menen elektronlardi'n' wortasha tezligin $\langle \vec{V} \rangle$ tabi'w mu'mkin. Ten'salmaqli'li'q hali' tiklengennen keyin, $\langle \vec{V} \rangle = const$ boladi'. Yeger si'rtqi' maydandi' ($\vec{E}=0$) joq, $\langle \vec{V} \rangle$ tezlik kemeyip baslaydi' ha'm elektronlar menen tor arasi'nda ten' salmaqli'li'q tiklengennen keyin $\langle \vec{V} \rangle=0$ ge aylanadi'. $\langle \vec{V} \rangle$ kemeyiw ni'zamli'g'i' (3.7.5) ten'lemeden kelip shi'g'adi', yag'ni'y $\vec{E}=0$ de,

$$m^* \frac{d \langle \vec{V} \rangle}{dt} + r \langle \vec{V} \rangle = 0 \quad (3.7.6)$$

$$\frac{d \langle \vec{V} \rangle}{dt} + \frac{r}{m^*} \langle \vec{V} \rangle = 0 \quad \text{ni'}$$

sheship

$$\langle V(t) \rangle = \langle V(0) \rangle \exp\left(-\frac{r}{m^*} \cdot t\right) \quad (3.7.7)$$

ni' tabami'z. Bunnan ko'rinip turg'ani'nday,

$$\tau = \frac{m^*}{r} \quad (3.7.8)$$

waqi'tta $\langle \vec{V} \rangle$ tezlik 3 yese kemeyedi.

t - waqi'tti' relaksasiya waqti' delinedi ha'm tezliktin' e yese kemeyiwi ushi'n ketken waqi'tti' ko'rsetedi.

$$\vec{F}_{\text{qarsi}} = -\frac{m^*}{\tau} \langle \vec{V} \rangle \quad (3.7.9)$$

Ten' salmaqli'q wornag'annan son' si'rtqi' maydandi' wo'shirip elektronni'n' $\langle \vec{V} \rangle$ tezligin (3.7.5) tin' shep ta'repin nol'ge ten'lep tabi'w mu'mkin,

$$\begin{aligned} -e\vec{E} - \frac{m^*}{\tau} \langle \vec{V} \rangle &= 0 \\ \langle \vec{V} \rangle &= -\frac{e\tau}{m^*} \vec{E} \end{aligned} \quad (3.7.10)$$

Bunday waqi'ttag'i' tok ti'g'i'zli'g'i'

$$\vec{j} = -en \langle \vec{V} \rangle = -en - \frac{e\tau}{m^*} \vec{E} = \frac{ne^2\tau}{m^*} \vec{E} \quad (3.7.11)$$

Om ni'zami'ni'n' differencial ko'rinisi $\vec{j} = \sigma \vec{E}$ ge tiykarlani'p

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m^*} \quad (3.7.12)$$

koefficient elektr wo'tkizgishlikti an'latadi'.

Klassikali'q mexanika ko'z qarasi'nan

$$\sigma = \frac{ne^2\tau'}{2m} \quad (3.7.13)$$

(3.7.13) formuladag'i' $\tau' = \frac{\langle \lambda \rangle}{\langle V \rangle}$ - yerkin juwi'ri'w waqti'.

(3.7.12) menen (3.7.13) ti sali'sti'rsa, τ din' $\tau'/2$ menen sa'ykes keliwin ko'remiz. (3.7.12) degi σ ta'jiriybe na'tiyjesine jaqsi' sa'ykes keledi, sebebi, σ , E , $1/t$, klassikali'q elektronli'q teoriya boyi'nsha $\sigma_{\text{klas}} \geq \frac{1}{\sqrt{T}}$ yedi.

Klassikali'q ko'z qarastan $\vec{E}$ elektr maydani', barli'q elektronlardi' ha'reketke keltiredi.

Kvant mexanikasi' ko'z qarasi'nan qarag'anda elektr maydani' tek Fermi hali' jaqi'ni'ndag'i' elektronlardi'n' ha'reketin wo'zgerte aladi'. To'menirek jag'daydag'i' (valent) elektronlardi'n' ha'reketin wo'zgertpeydi ha'm wolardi'n' (3.7.13) formulada u'lesi bolmaydi'. Bunnan ti'sqari' (3.7.13) formulada m^* effektiv massa turi'pti'.

IV. YARI'M WO'TKIZGISHLER

4.1. Yari'm wo'tkizgishlerdegi elektr togi'

(1-10⁻²) om·mm² /m -sali'sti'rmali' qarsi'li'qqa iye metallar ha'm (10¹⁴ - 10²²) om·mm²/m -sali'sti'rmali' qarsi'li'g'i'na iye dielektrikler menen birlikte, (1-10¹⁴) om·mm²/m -sali'sti'rmali' qarsi'li'g'i'na iye zatlar klassi'nda bar. Wolar yari'm wo'tkizgishler dep atali'p, birqansha a'hmiyetli qa'siyetlerge iye boladi'.

Yari'm wo'tkizgishlerde metallar si'yaqli' wo'tkizgishler boli'p yesaplani'p, wolar da tokti' elektronlar tasi'ydi' ha'm tok wo'tiw waqi'ti'nda wo'tkizgish ishinde ximiyali'q wo'zgeris ju'z bermeydi. Sonday bolsada, yari'm wo'tkizgishler metallarg'a sali'sti'rg'anda birqansha ayi'rmashi'li'qqa iye. Metallarda yerkin elektronlar konsentratsiyasi' temperaturag'a baylani'sli' bolmaydi', al yari'm wo'tkizgishlerde temperaturani'n' arti'wi' menen yerkin elektronlar konsentratsiyasi' artadi' ha'm temperaturani'n' kemeyiwi menen yerkin elektronlar konsentratsiyasi'da kemeyedi. Al absolyut temperaturada bolsa, yari'm wo'tkizgishler ideal dielektriklerge aynaladi'.

Solay yetip, metallardan pari'qli' tu'rde elektronlardi'n' yerkin jag'dayg'a wo'tiwi, woldi'n' qon'si' atomlari'nin' ta'siri na'tiyjesinde boladi', al yari'm wo'tkizgishlerde bolsa, bul process ji'lli'li'q qozg'ali'si' ta'sirinde boladi'. Ha'r bir elektronni'n' bo'linip shi'g'i'wi' ha'm yerkin halg'a wo'tiwi, bul jag'dayda yari'm wo'tkizgishti xarakterleytug'i'n aktivatsiya energiyasi'n talap yetedi. Elektronni'n' baylani'sli' jag'dayg'a qayti'p tu'siwinde bolsa, bul energiya qaytadan ji'lli'li'q terbelisi energiyasi'na aynaladi'.

Elektronlardi'n' aji'rali'p shi'g'i'wi' barqulla elektronlardi'n' yerkin jag'daydan baylani'sli' jag'dayg'a qayti'p wo'tiwi na'tiyjesinde iske asi'ri'ladi'. Turaqli' bir temperaturada bul yeki process bir-birin kompensatsiyalaydi' ha'm yerkin elektronlardi'n' konsentratsiyasi' turaqli' boli'p qaladi'. Biraq yegerde temperaturani' asirsaq, wonda elektronlardi'n' aji'rali'p shi'g'i'wi' artadi' ha'm aji'rali'p shi'g'i'wshi' elektronlardi'n' arti'p

bari'wi' bul yeki process arasi'nda termodinamikali'q ten' salmaqli'li'q wornag'ansha dawam yetedi.

4.2. Yari'm wo'tkizgishlerdegi elektr ha'diyseleri.

Yari'm wo'tkizgishlerdin' qa'siyetleri

Yari'm wo'tkizgishlerde yerkin elektronlardi'n' konsentratsiyasi', wondag'i' qosi'mtalarg'a ku'shli baylani'sqan boladi'. Yari'm wo'tkizgishlerdegi qosi'mtalardi'n' mug'dari' woni'n' wo'tkizgishligin millionlag'an ma'rte artti'ri'p jiberiwi mu'mkin. Bul qosi'mtali' atomlarda elektronlar, kristall tor atomlari'na qarag'anda an'sat aji'rali'p shi'g'adi'. Sonli'qtanda yari'm wo'tkizgishler menshikli ha'm qosi'mtali' wo'tkizgish boli'p bo'linedi. Bulardi'n' ishinde qosi'mtali' yari'm wo'tkizgish u'lken a'hmiyetke iye boladi'.

Yari'm wo'tkizgishlerde werkin elektronlar konsentratsiyasi' elektromagnitlik nurlani'wlar (mi'sali': infraqi'zi'l nurlar, ul'trafiolet ha'm rentgen nurlar, γ -nurlari') ta'sirinde keskin wo'zgeriske ushi'raydi'. Bul nurlar baylani'sli' elektronlarg'a aktivatsiya energiyasi'n beredi ha'm yerkin jag'dayg'a wo'tiwine mu'mkinshilik jarati'p beredi.

Metallardag'i' yerkin elektronlardan parqli' tu'rde, yari'm wo'tkizgishlerde atomlardan aji'rali'p shi'qqan elektronlardi'n' tezlikleri gaz molekulalari'na uqsas temperaturani'n' arti'wi' menen artadi'.

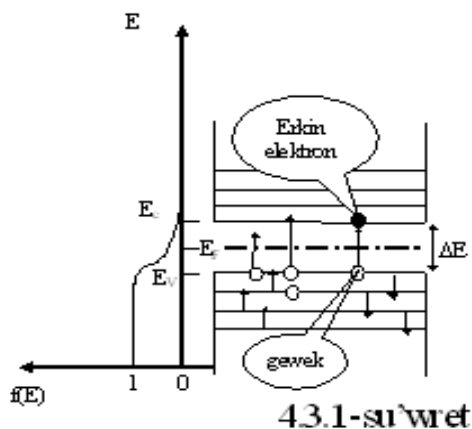
Yari'm wo'tkizgishlerge tiykari'nan Mendeleevtin' ximiyali'q tablisasi'ndag'i' 4-, 5- ha'm 6- gruppasi'nda joylasqan elementler (*B, C, Si, Se, Sn, P, S, Ge, As, Tl*) ha'm ko'plegen minerallar, ha'r qi'yli' okisler, sul'fidler, telluridlar, h.t.basqalar kiredi. Bul zatlardi'n' geyparalari' tek belgili bir jag'daylarda ha'm ayri'qsha usi'l menen ali'ng'an jag'daylarda g'ana yari'm wo'tkizgishlar xi'zmetin atqaradi'. Mi'sal ushi'n, uglerod almaz jag'dayi'nda dielektrikke aylanadi', al grafit jag'dayi'nda bolsa, wo'tkizgish yamasa yari'm wo'tkizgishke aylani'wi' mu'mkin. Yari'm wo'tkizgishli materiallardin' ishinde kremniy, germaniy ha'm tellur elementleri u'lken a'hmiyetke iye boli'p yesaplanadi'. Kremniy elementi jer shari'nda yen' ko'p taralg'an elementlerdin' biri boli'p, wol jer qori'ni'n' 28 payi'zi'n quraydi'.

Soni'n' menen birge germaniy elementinin' menshikli wo'tkizgishligin u'yrenenimizde, wondag'i' qosi'mtalardi'n' u'lesi procenttin' won millionnan bir u'lesindey boli'w kerekligine u'lken itibar beriw kerek. Ha'zirgi waqi'tta bunday tazali'qtag'i' zatlardi' ali'w mu'mkinshiligine yerisilmekte.

4.3. Yari'm wo'tkizgishlerdin' elektr wo'tkizgishliktin' yeki mexanizmi

Yari'm wo'tkizgishler menshikli ha'm qosi'mtali' yari'm wo'tkizgishlerge bo'linedi.

Yeger temperatura $T \neq 0$ K bolsa, valent zonani'n' joqarg'i' jag'daylari'ndag'i' elektronlardi'n' bir bo'limi wo'tkizgishlik zonasi'ni'n' to'mengi jag'daylari'na wo'tedi



(4.3.1-su'wret). Bul halda elektr maydani' ta'sirinde wo'tkizgishlik zonasi'ndag'i' elektronlardi'n' jag'dayi' wo'zgeredi. Bunnan ti'sqari' valentlik zonada payda bolg'an bos wori'nlr yesabi'nanda elektronlar wo'z tezliklerin wo'zgertedi. Na'tiyjede yari'm wo'tkizgishtin' elektr wo'tkizgishligi

nol'den wo'zgeshe boladi', yag'ni'y taza yari'm wo'tkizgishte yerkin elektron ha'm gewekler payda boladi'.

Elektr maydani' ta'sirinde pu'tkil kristall boylap elektronlar maydang'a qarama-qarsi' bag'darda, gewekler bolsa maydan bag'i'ti'nda ha'reketke keledi. Bunday elektr wo'tkizgishlik tek taza yari'm wo'tkizgishlerge ta'n boli'p, wol menshikli elektr wo'tkizgishlik dep ataladi'.

Wo'tkizgishlik zonasi'ndag'i' elektronlar ha'm valent zonasi'ndag'i' gewekler, yag'ni'y elektroni jog'alg'an bos wori'nlr, Fermi-Dirak bo'listiriw ni'zami'na boysi'nadi':

$$f_3(E) = \frac{1}{e^{(E-E_F)/kT} + 1} \quad (4.3.1)$$

$$f_k(E) = 1 - f_v(E) = \frac{1}{e^{-(E-E_F)/kT} + 1} \quad (4.3.2)$$

Menshikli yari'm wo'tkizgishler ushi'n wo'tkizgishlik zonasi'ndag'i elektronlardi'n konsentratsiyasi' valent zonadag'i geweklerdin konsentratsiyasi'na ten', yag'ni'y $n = r$. Konsentratsiyalardi' yesaplaw ushi'n E energiyani' wo'tkizgishlik zonasi'ni'n' tu'bine sali'sti'ri'p wo'lsheymiz ($E_s = 0$).

Wo'tkizgishlik zonasi' tu'binen ΔE energiya intervali'n ajratayi'q ($E, E+\Delta E$). Bul arali'qta joylasqan elektronlar Fermi-Dirak statistikasi'na boysi'nadi' ha'm wolardi'n energiyalari' boyi'nsha bo'listiriliwi to'mendegi ko'riniste jazi'ladi',

$$dn = 4\pi \frac{(2m^*)^{3/2}}{(2\pi\hbar)^3} E^{1/2} \cdot \frac{1}{e^{E-E_F/kT} + 1} dE \quad (4.3.3)$$

A'dette menshikli yari'm wo'tkizgishler ushi'n $e^{E-E_F/kT} \gg 1$ ha'm (4.3.3) formulani'n bo'limindagi 1 di yesapqa almasaqa boladi'. Bul jag'dayda

$$dn = 4\pi \frac{(2m^*)^{3/2}}{(2\pi\hbar)^3} E^{1/2} e^{-(E-E_F)/kT} dE \quad (4.3.4)$$

Bul an'latpani' $0 \div \infty$ arali'g'i'nda integrallap to'mendegilerdi payda yetemiz

$$n = \frac{2(2\pi m^* kT)^{3/2}}{(2\pi\hbar)^3} e^{-(\Delta E - E_F)/kT} \quad (4.3.5)$$

Usi'g'an uqsas a'mellerdi wori'nlap valent zonasi'ndag'i' gewekler konsentratsiyasi' ushi'n

$$p = \frac{2(2\pi m_k^* kT)^{3/2}}{(2\pi\hbar)^3} e^{-E_F/kT} \quad (4.3.6)$$

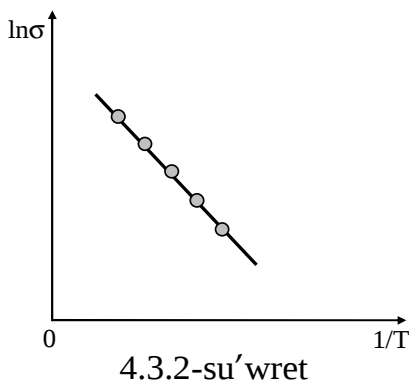
an'latpasina iye bolami'z.

(4.3.5) ha'm (4.3.6) lardan, $n=r$ yekenligin yesapqa ali'p, Fermi hali' energiyasi'ni'n' ma'nisin tabami'z:

$$E_F = \frac{\Delta E}{2} + \frac{3}{4} kT \ln\left(\frac{m_k^*}{m_v^*}\right) \quad (4.3.7)$$

(4.3.7) nin' yekinshi ag'zasi', birinshisine sali'sti'rg'anda juda kishi bolg'anli'g'i' ushi'n $E_F = \frac{\Delta E}{2}$ dep ali'w mu'mkin.

Demek, menshikli yari'm wo'tkizgishlerde Fermi hali' (E_G) qadag'an yetilgen zonani'n' wortasi'nda jaylasadi'.



Yari'm wo'tkizgishtin' wo'tkizgishlik ha'm valent zonalarindag'i' elektron ha'm gewekler zaryad tasi'wshi'lari' xi'zmetin atqaradi'. Elektr wo'tkizgishlik zaryad tasi'wshi'lar konsentratsiyasi'na proporsional boli'p, bul jag'dayda menshikli yari'm wo'tkizgishlardi'n' elektr wo'tkizgishligi s temperatura artiw menen

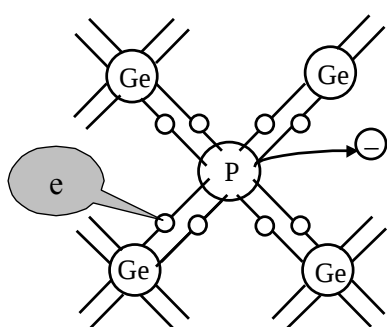
wo'sedi ha'm to'mendegi nizamli'li'q boyi'nsha wo'zgeredi (4.3.2-su'wret)

$$S = S_e + S_k \text{ yamasa } S = S_0 \exp(-\Delta E / 2kT). \quad (4.3.8)$$

4.4. Yari'm wo'tkizgishlerdin' qosi'mtali' elektr wo'tkizgishligi

Ta'biyatta yari'm wo'tkizgishler taza hali'nda ushi'raspaydi', yag'ni'y az mug'darda bolsada wolardi'n' atomlari' arasi'na jat element atomlari' aralasqan boladi'.

Bul qosi'mtalar yari'm wo'tkizgishlerde qanday wo'zgerisler payda yetiwi mu'mkin. To'rt valentli kremniy yamasa germaniy atomlari'nan ibarat kristall tordi'n' ayi'ri'm tu'yinlerinde bes valentli atomlar, mi'sali' P (fosfor) yamasa As (mishyak) atomlari' wornalasqan bolsi'n (4.4.1-su'wret). Bunday



4.4.1-su'wret

halda qosi'mta atomlari'nan ibarat to'rt elektron germaniy (kremniy) atomlari' menen kovalent baylani'sta boladi'. Besinshi elektron bolsa atom menen ju'da' ku'shsiz baylani'sqan, sonli'qtan ji'lli'li'q ha'reket energiyasi' bul elektrondi' atomnan aji'ratip, yerkin elektrong'a aylandi'ri'w ushi'n jeterli. Bul elektronlar tok tasi'wshi' wazi'ypasi'n atqaradi'.

Bunday yari'm wo'tkizgish elektronli' yari'm wo'tkizgish, P ha'm Ge

atomlari' bolsa donorlar yamasa n - tu'r (latinsha n -negativ so'zinen) beriwshi qosi'mta delinedi.

Barli'q yari'm wo'tkizgishlerde zaryad tasi'wshi'lar elektronlar bolg'anli'qtan, yeki mexanizmi bar boladi' ha'm usi'g'an sa'ykes tu'rde yari'm wo'tkizgishler yeki klassqa bo'linedi.

Bul ayti'lg'anlardi' tasti'yi'qlaw maqsetinde kishkene ta'jiriybeni qarap wo'temiz. Yari'm wo'tkizgishtin' bir ushi'n suwi'q halda uslap turi'p, yekinshi ushi'n qi'zdi'rami'z. Ta'jiriybe, bul jag'dayda sterjennin' ushlari' ha'r qi'yli' zaryadqa iye bolatug'i'nli'g'i'n, biraq bir jag'daylarda sterjennin' qi'zdi'ri'lg'an ushi' won' zaryadqa, al suwi'ti'lg'an ushi' teris zaryadqa iye bolatug'i'nli'g'i'n ko'rsetedi. Ne ushi'n sterjennin' qi'zdi'ri'lg'an ushi' won' zaryadlanatug'i'nli'g'i'n tu'siniw qi'yi'n yemes. Temperaturani'n' arti'wi' menen sterjennin' qi'zdi'ri'lg'an ushi'ndag'i' yerkin elektronlar sani' artadi' ha'm usi' waqi'tti'n' wo'zinde sterjennin' qarama-qarsi' ta'repinde yerkin elektronlar konsentratsiyasi' azayi'p ketedi. Solay yetip elektron gaz ti'g'i'zli'g'i'ni'n' gradienti payda boladi' zaryad tasi'wg'a mu'mkinshilik jaratatug'i'n elektronlardi'n' diffuziya qubi'li'si' payda boladi'. Bul qubi'li'sti'n' ta'sirinde elektronlar suwi'q ta'repten i'ssi' ta'repke ko'shiwge qarag'anda, i'ssi' ta'repten suwi'q ta'repke ko'p mug'darda wo'te baslaydi'. Suwi'q ta'repte arti'qsha elektronlardi'n' mug'dari' ko'beyip ketedi ha'm bul ta'rep teris zaryadlanadi'. Bul jag'dayda yari'm wo'tkizgishte zaryad tasi'wshi'lar xi'zmetin elektronlar atqaratug'i'nli'g'i'n ta'jiriybe ja'ne bir ma'rte da'lilleydi.

Biraq, ne ushi'n yari'm wo'tkizgishlerde zaryad tasi'wshi'lar xi'zmetin elektronlardi'n' worni'na won' zaryad atqari'p ati'rg'an bolsa, sterjennin' i'ssi' ta'repinin' teris zaryadlanatug'i'n tu'sindiriwimiz kerek.

Kvant mexanikasi' bul qubi'li'sti' bi'layi'nsha tu'sindirip beredi, yari'm wo'tkizgishlerde elektronni'n' massasi'nday hesh qanday won' zaryad bolmaydi', biraq elektronlardi'n' bazi'-bir qozg'ali'slari'nda wolardi'n' wori'nleri'nda bo'lek bir won' zaryadlang'an bo'leksheler wornag'anday boladi'.

Bul jag'daydi' qosi'mtali' yari'm wo'tkizgishler mi'sali'nda tu'sindirip wo'temiz. Ju'da' kishi menshikke iye yari'm wo'tkizgishge qosi'mta

kirgizilgen dep qarasaq, wonda woni'n' atomlari' wo'zlerine arti'qsha bir elektronnan qosi'p ala woti'ri'p, teris iong'a aylanadi'. Yeger qosi'mtali' atom kristall tordi'n' atomlari'ni'n' birinen wo'zine arti'qsha bir elektrondi' qosi'p alsa, wonda woni'n' worni'nda qalg'an bos wori'ndi' qon'si' atomnan shi'qqan basqa bir elektron iyelewi mu'mkin. Yeger usi' jag'day boli'p wo'tse, wonda bos wori'n qon'si'las ja'ne bir tor tu'yininde payda boladi' ha'm wog'an basqa atomni'n' elektroni' kelip tu'siwi mu'mkin. Bunday bos wori'nlardi'n' wori'n awi'sti'ri'wlari' molekulalardi'n' ta'rtipsiz ji'lli'li'q qozg'ali'si'n yesletedi. Si'rtqi' elektr maydani' berilgen jag'dayi'nda, kristalldag'i' ha'r bir elektrong'a maydan ta'repinen elektromagnit ku'shi ta'sir yetedi ha'm elektronlardi'n' wori'n awi'sti'ri'wlari' maydan bag'i'ti'na qarama-qarsi' boladi', al usi' waqi'tlari' bos wori'nlardi'n' ko'shiwleri bolsa, maydan bag'i'ti'nda boli'p wo'tedi. Solay yetip, elektronlardi'n' quramali' estafetali' qozg'ali'si' saldari'nan payda boli'p ati'rg'an won' zaryadlang'an bo'lekshe *gewek* dep ataladi', yag'ni'y qaysi' jerde gewek jaylassa, sol jerde bir elektron kemis boladi', yag'ni'y bir arti'qsha won' zaryadqa iye boladi'.

Temperaturani'n' arti'wi' menen yari'm wo'tkizgishlerde qosi'mtali' atomlardi'n' elektronlardi tuti'p ali'w itimali'li'g'i' artadi' ha'm geweklerdin' konsentratsiyasi' wo'sedi. Geweklerdin' payda boli'wi' menen birge wog'an qarama-qarsi' processte boli'p wo'tedi. Arti'qsha elektrondi' uslap turg'an gewek qosi'mtali' atomni'n' qasinda jaylasqan bolsa, wonda bul elektron bos wori'ng'a wo'tiwi mu'mkin ha'm gewek jog'aladi', na'tiyjede bul atom neytral` boli'p qaladi'. Sonli'qtanda da gewekler yari'm wo'tkizgishte hesh waqi'tta ji'ynali'p qalmaydi', yag'ni'y ha'r bir temperaturag'a belgili bir mug'darda gewekler konsentratsiyasi' sa'ykes keledi.

Solay yetip, elektronlardi' bosati'p jiberiwshi ha'm elektronli' wo'tiwdi payda yetiwshi qosi'mtalar *donorlar*, al elektronlardi' wo'zine qosi'p ali'wshi ha'm gewekli wo'tiwdi payda yetiwshi qosi'mtalar *akseptorlar* dep ataladi'. Yegerde, biz kremniydin' bir yari'mi'na akseptorli' qosi'mtani' (mi'sali', bordi'), al yekinshi yari'mi'na donorli' qosi'mtani' (mi'sali', mish'yakti') kirgizsek, wonda yeki ha'r qi'yli' wo'tkizgishlikler oblasti'na iye bolami'z. Wolardi'n' shegarasi' elektron-gewekli wo'tiw yamasa a'piwayi' $p-n$ wo'tiw dep ataladi'.

4.5. Yari'm wo'tkizgishlerdin' texnikada qollani'wlari'

Yari'm wo'tkizgishler ha'r qi'yli' si'rtqi' ta'sirlerge g'a'rezli ha'm $p-n$ wo'tiwleri ayri'qsha qa'siyetke iye bolg'anli'qtan, wolar texnikada ju'da' ken'nen qollani'ladi'. Bul qollani'wlardi'n' geyparalari'n qarap wo'teyik.

1. *Temperaturani' wo'lshe'w*. Temperaturani'n' arti'wi' menen yari'm wo'tkizgishlerdin' wo'tkizgishligi keskin artadi', yag'ni'y geypara yari'm wo'tkizgishler 100°C -g'a shekem qi'zdi'ri'lg'anda, woni'n' wo'tkizgishligi 50 ma'rtege shekem artadi'. Yari'm wo'tkizgishlerdin' usi' qa'siyetin ha'm woni'n' u'lken sali'sti'rmali' qarsi'li'qqa iye yekenligin yesapqa alsaq, wonda biz yari'm wo'tkizgishlerdi ha'r qi'yli' temperaturalardi' wo'lshe'wde ken'nen qollani'wi'mizg'a boladi', yag'ni'y yari'm wo'tkizgishlerdin' qarsi'li'g'i'ni'n' wo'zgerisi, temperaturanin' wo'zgerisin ani'qlawg'a mu'mkinshilik beredi. Bunday temperaturag'a sezgir yari'm wo'tkizgishler *termistorlar* dep ataladi'. Termistorlardi'n' wo'lshe'mleri ju'da' kishkene boli'wi' (millimetrdin' u'leslerinde) mu'mkin, yag'ni'y kishkene mug'darda ji'lli'li'q wo'tiwshi denelerdin' (mi'sali': wo'simlik japi'raqlari'ni'n', adamni'n' terisinin') temperaturalari'n wo'lshe'w mu'mkinshiligine iye bolami'z. Soni'n' menen birge, tez wo'zgeriwshi temperaturalardi' da wo'lshe'wge boladi'.

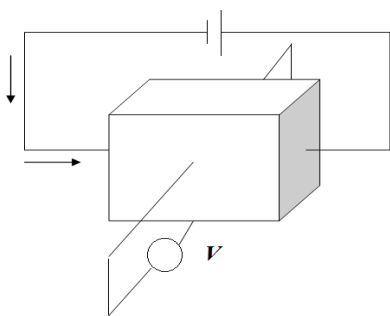
2. *Toqti' ha'm kernewdi basqari'w*. Yari'm wo'tkizgishlerden toq wo'tkende, wol qi'zadi' ha'm qarsi'li'g'i' azayadi', bul wo'z gezeginde toq ku'shinin' arti'p ketiwine ha'm temperaturani'n' arti'p ketiwine ali'p keledi. Na'tiyjede shi'nji'rdag'i' toq ku'shi, yari'm wo'tkizgishtin' betinen qorshag'an wortali'qqa ji'lli'li'q beriliwi, toq ta'repinen bo'lip shi'g'ari'p ati'rg'an ji'lli'li'q penen ten' salmaqli'li'qqa kelemen degenshe artadi'. Toq ku'shi maksimal' ma'niske jetiwge shekem, birneshe wonlag'an sekundtan, birneshe wonlag'an minut waqi't talap yetiledi. Yari'm wo'tkizgishler avtomat reostat rolinde atqari'wi' mu'mkin. Soni'n' menen birge, yari'm wo'tkizgishler shi'nji'r uchastkasi'nda turaqli' kernewdi uslap turi'w mu'mkinshiligin beredi.

3. *Yari'm wo'tkizgishli tuwri'lag'i'shlar*. Elektronli' ha'm gewekli ten, yag'ni'y $p-n$ wo'tiwden turatug'i'n shi'nji'r uchastkasi'n qaraymi'z. Yeger usi' shi'nji'r uchastkasi'nda gewekli yari'm wo'tkizgishten, elektronli' yari'm

wo'tkizgishke qaray bag'i'tlang'an elektr maydani'n bersek, wonda elektronlar ha'm gewekler bir-birine qaray qozg'ali'p ushi'rasadi' ha'm rekombinaciya qubi'li'si' (yag'ni'y, elektronlar geweklerdin' worni'n iyeleydi) ju'z beredi. Bul jag'dayda $p-n$ - wo'tiw oblasti' toqqa qarsi'li'q ko'rsetpeydi. Al shi'nji'rg'a joqari'dag'i'g'a qarama-qarsi' bag'i'tlang'an kernew bersek, wonda elektronlar ha'm gewekler bir-birinen uzaqlasadi' ha'm $p-n$ - wo'tiwdin' shegerasi'nda u'lken qarsi'li'qqa iye bolg'an qatlam payda boladi'. Wo'zgermeli toq shi'nji'ri'nda bunday uchastka tuwri'lag'i'sh xi'zmetin atqaradi', yag'ni'y wol toqti' tek bir bag'i'tta g'ana wo'tkeredi. Bunday tuwri'lag'i'shlar retinde yen' birinshilerden boli'p, selenli tuwri'lag'i'shlar ali'ng'an. Al ha'zirgi waqi'tlarda bolsa, kremniyli ha'm germaniyli tuwri'lag'i'shlar ali'nbaqta.

4.6. Xoll effekti

Bizge belgili, yeger togi' bar wo'tkizgish magnit maydani'nda, magnit si'zi'qlari'na perpendikulyar jaylasti'ri'lg'an bolsa, wonda ha'r bir elektrong'a woni ji'lji'ti'wshi' ku'sh ta'sir yetedi. Sonli'qtan, yeger wo'tkizgishti tuwri' mu'yeshlik kese-kesimge iye plastina formasi'nda ali'p, woni' magnit maydani'na jaylasti'rsaq, wonda Lorens ku'shinin' ta'sirinde elektronlar wo'tkizgishtin' joqarg'i' shegarasi'na ji'ynaladi' ha'm teris zaryadlaydi', soni'n' menen birge to'mengi shegarasi' won' zaryadlanadi'. Na'tiyjede joqarg'i' ha'm to'mengi shegarasi' arasi'nda potenciallar ayi'rmasi' payda boladi'. Bul qubi'li's 1879 - ji'li' Xoll ta'repinen tabi'ldi' ha'm *Xoll effekti* - dep ataladi'.



Payda bolg'an potenciallar ayi'rmasi'n U menen belgileymiz. Ha'r bir elektrong'a ta'sir yetiwshi Lorens ku'shi F_L , potenciallar ayi'rmasi'n payda yetken elektr ku'shi F penen ten'lesken waqi'tta, wo'tkizgishte ten' salmaqli'li'q jag'dayi' wornaydi'. Lorens ku'shi tiykari'nan to'mendegi formula

boyi'nsha ani'qlanatug'i'n yedi.

$$F_L = Bev, \quad (4.6.1)$$

bunda v - elektronlardi'n' bag'i'tlang'an qozg'ali'si'ni'n' tezligi. Elektrong'a ta'sir yetiwshi elektr ku'shi $F = eE$ ge ten', al maydan kernewliligi $E = U/L$ ge ten' (bunda L - plastinka yeni) boladi'. Bunnan:

$$F = \frac{eU}{L} \quad (4.6.2)$$

Demek, $F_L = F$ bolg'anli'qtan:

$$Bev = \frac{eU}{L} \text{ bunnan, } U = BvL \quad (4.6.3)$$

$I = ev_H S n_0$ - formulasi'nan elektronlardi'n' bag'i'tlang'an qozg'ali'si'ni'n' wortasha tezligin tabamiz.

$$v = \frac{1}{en_0 S} \quad (4.6.4)$$

Bunda $S = Ls$ - qali'n'li'g'i' s - bolg'an plastinani'n' kese-kesiminin' maydani', al n_0 -bolsa, ko'lem birligindagi erkin elektronlar sani'.

v - ma'nisin (4.6.3) formulasi'na qoyi'p to'mendegi formulag'a iye bolami'z.

$$U = \frac{BIL}{en_0 Lh} = \frac{BI}{en_0 h} \quad (4.6.5)$$

Bul formuladag'i' $\frac{1}{en_0}$ qatnasi' R menen belgilenedi ha'm wol *Xoll koefficienti* dep ataladi'. Solay yetip, to'mendegi formulag'a iye bolami'z.

$$U = R \frac{BI}{h} \quad (4.6.6)$$

yag'ni'y, Xoll effekti na'tiyjesinde payda bolg'an potenciallar ayi'rmasi' - maydan indukciyasi' menen plastina arqali' wo'tiwshi toq ku'shine tuwra proporcional, al plastina qali'n'li'g'i'na kerri proporcional boladi' yeken.

Xoll effektin yari'm wo'tkizgishlerge qollani'w, magnit maydani'ni'n' berilgen noqattag'i' indukciya vektori'ni'n' ma'nisin a'piwayi' usi'llar menen ani'qlawg'a mu'mkinshilik beredi.

A'DEBIYATLAR:

1. А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. Курс физики. М., 1989, § 41.8.
2. Т. И. Трофимова. Курс физики. М., 2000, стр. 237.
3. Г. Н. Епифанов. Физики твёрдого тела. М. 1985. Г. II, III.
4. И. В. Савельев. Курс общей физики. 5 кн. М. 1998. § 6.1-6.6.
5. О. Ахмаджанов. Физика курси. III к. Т. 1989, IX - bob, § 6.

MAZMUNI'

Kirisiw.....	3
I. KRISTALL, QATTI' HA'M AMORF ZATLAR	
1.1. Zat du'zilisın u'yreniwde klassikali'q ha'm kvant ko'z-qaras.....	7
II. SHEKLI HA'M SHEKSIZ FIGURALAR SIMMETRIYASI'	
2.1. Shekli ha'm sheksiz figuralar simmetriyasi'	11
2.2. Simmetriya operaciyalari' ha'm elementleri.	
Simmetriya operaciyalari'	11
2.3. Simmetriya elementleri	12
2.4. Kristallar haqqi'nda tu'sinik.....	15
2.5. Kristalli'q tor tu'yinleri, bag'i'tlari' ha'm tegislikleri indeksleri....	17
2.6. Keri tor.....	19
III. QATTI' DENELER FIZIKASI' ELEMENTLERI	
3.1. Kristallardi'n' du'zilisi.....	22
3.2. Kristallardag'i' nuqsanlar.....	25
3.3. Kristallardi'n' ji'lli'li'q si'yi'mli'li'g'i'	26
3.4. Tordi'n' ji'lli'li'q wo'tkizgishligi	30
3.5. Fononlardi'n' ko'shiw processi	35
3.6. Qatti' denelerdin' elektr wo'tkizgishligi	38
3.7. Metallardag'i' elektr wo'tkizgishlik.....	44
IV. YARI'M WO'TKIZGISHLER	
4.1. Yari'm wo'tkizgishlerdegi elektr togi'	47
4.2. Yari'm wo'tkizgishlerdin' qa'siyetleri	48
4.3. Yari'm wo'tkizgishlerdin' elektr wo'tkizgishliktin' yeki mexanizmi	49
4.4. Yari'm wo'tkizgishlerdin' qosi'mtali' elektr wo'tkizgishligi.....	51
4.5. Yari'm wo'tkizgishlerdin' texnikali'q qollaniwlari'	54
4.6. Xoll effekti.....	55
A`DEBIYATLAR	57

Du'ziwshiler:

<i>Janabergenov Jaqsili'q</i>	A'jiniyaz atindag'i' No'kis ma'mleketlik pedagogikali'q instituti'ni'n' Uli'wma fizika kafedrası'ni'n' docenti, fizika - matematika ilimlerinin' kandidati'
<i>Jalelov Moyatdin Asanovich</i>	A'jiniyaz atindag'i' No'kis ma'mleketlik pedagogikali'q instituti'ni'n' Uli'wma fizika kafedrası'ni'n' ag'a oqi'ti'wshi'si', fizika - matematika ilimlerinin' kandidati'
<i>Yusupov Oralbay Nawri'zbaevich</i>	A'jiniyaz atindag'i' No'kis ma'mleketlik pedagogikali'q instituti'ni'n' Uli'wma fizika kafedrası'ni'n' assistent oqi'ti'wshi'si'
<i>Kadirimbetova Gulmira Rambergenovna</i>	A'jiniyaz atindag'i' No'kis ma'mleketlik pedagogikali'q instituti'ni'n' Uli'wma fizika kafedrası'ni'n' assistent oqi'ti'wshi'si'

ZATLAR DU'ZILISI TEORIYASI'

(Joqari' oqi'w ori'nlari'ni'n' fizika ha'm astronomiya ta'lim bag'dari talabarlari' ushi'n)

METODIKALI'Q QOLLANBA

Oqi'w-metodikaliq qollanba A'jiniyaz atindag'i' No'kis ma'mleketlik pedagogikali'q instituti' ilimiy-metodikali'q ken'esinin' 27-dekabr` 2014-jilg'i' № 3 protokoli' menen baspadan shig'ari'wg'a usi'ni's etilgen.

Bas redaktor *K. M. Koshanov*

Tex.redaktor *Z. B. Baltabaeva*

Korrektor *A. Abdikarimova*

Operator *N. Reymov*

A'jiniyaz atindag'i' NMPİ redaktsiya-baspa bo'limi

A'jiniyaz atindag'i' NMPİ baspaxanası'nda 2015-jilg'i' basil'gan.

Buyirtpa №0098. Nusqasi' 100 dana. Formatı' 60x84. Ko'lemi 3,7 b.t. 230105, No'kis qalası', A. Dosnazarov ko'shesi-104. Reestr №11-3084.

