Ý. Kadyrow, A. Hojamgulyýew, G. Kelow

UMUMY FIZIKA

Ýokary okuw mekdepleri üçin synag okuw kitaby

Türkmenistanyň Bilim ministrligi
tarapyndan hödürlenildi

Türkmen döwlet neşirýat gullugy
Aşgabat – 2011

UOK 53
K 13

Kadyrow Ý., HojamgulyýewA., Kelow G.
K 13 **Umumy fizika.** Ýokary okuw mekdepleri üçin synag okuw kitaby. – A.: Türkmen döwlet neşirýat gullugy, 2011.

Bu okuw kitaby ýokary okuw mekdepleriniň inžener-tehniki hünärleriniň maksatnamasynyň esasynda ýazyldy.

Kitap sekiz bölümden durýar. Olarda mehanikanyň we molekulýar fizikanyň esaslaryna, şeýle-de termodinamikanyň, elektrostatikanyň hem-de hemişelik toguň, magnit hadysalarynyň, optikanyň, kwant we gaty jisimleriň, ýadro we elementar bölejikleriň fizikasynyň teoriýasyna degişli maglumatlar beýan edilýär.

Kitap inžener-tehniki hünärleriniň talyplary üçin niýetlenendir. Şeýle-de bu kitap fizika bilen gyzyklanýan giň okyjylar köpçüligine hem peýdaly bolup biler.

TDKP №329, 2011 KBK 22.3 ýa 73

TÜRKMENISTANYŇ PREZIDENTI
GURBANGULY BERDIMUHAMEDOW

TÜRKMENISTANYŇ DÖWLET TUGRASY

TÜRKMENISTANYŇ DÖWLET BAÝDAGY

TÜRKMENISTANYŇ
DÖWLET SENASY

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

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

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

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

SÖZBAŞY

Türkmenistanda ylym-bilim ulgamyny belent derejelere ýetirmek üçin Hormatly Prezidentimiz Gurbanguly Berdimuhamedowyň taýsyz tagallalarynyň netijesinde bu ulgam ymykly ösüş ýoluna düşdi. Ulgamyň has kämilleşmegi üçin döwrebap okuw kitaplarynyň we gollanmalarynyň taýýarlanmagy wajyp mesele bolup durýar.

Bu kitap häzirki döwürde ýokary tehniki okuw mekdeplerinde okadylýan fizika dersiniň okuw maksatnamasy esasynda ýazyldy. Kitap sekiz bölümden ybarat bolup, olarda mehanikanyň fiziki esaslaryna, molekulýar fizika we termodinamika, elektrostatika we hemişelik toga, magnit hadysalaryna, optika, kwant fizikasyna we gaty jisimleriň fizikasyna, ýadro fizikasyna we elementar bölejiklere degişli teoretiki maglumatlar yzygiderli beýan edilýär.

Kitap üçin maglumatlar we olaryň beýan ediliş usullary saýlanyp alnanda taryhy däpler bilen bir hatarda, awtorlaryň ýokary okuw mekdeplerindäki okuwyň köp ýyllyk mugallymçylyk tejribeleri ulanyldy. Fiziki hadysalar, düşünjeler we formulalar beýan edilende olaryň manysyna zyýan ýetirmezden gysgarak beýan etmäge we matematikany okuwyň birinji ýylyň derejesinde ulanmaga synanyşyk edildi. Kitap taýýarlananda awtorlar fizikanyň häzirkizaman beýan edilişini ulanmaga çalyşdylar. Ölçeg birlikleri hökmünde Halkara sistemasy ulanyldy. Kitapda fizikanyň teoretiki maglumatlary bilen bir hatarda eksperimentleriň geçirilişi we netijeleri barada, leksiýalarda demonstrasiýalar bolup hyzmat edip biljek tejribeleriň geçirilişi barada maglumatlar berilýär.

Kitap inžener-tehniki hünärleriniň talyplary üçin niýetlenendir. Şeýle-de bu kitap fizika bilen gyzyklanýanlar üçin hem peýdaly bolup biler.

GIRIŞ

Fizika tebigat kanunlaryny öwrenýän tebigy ylymlaryň esasylarynyň biridir. Üznüksiz hereketde we özara täsirleşmede bolýan material jisimler hem-de meýdanlar tebigaty emele getirýärler. Jisimleriň hereketiniň, özara täsirleriniň we elektromagnit hadysalarynyň kanunlaryny ýerine ýetirmek hem-de seljermek fizika ylmynyň esasy meselesi bolup durýar.

Fiziki kanunlar tejribede alynýan maglumatlary jemlemek bilen beýan edilýär. Olar tebigatda bar bolan obýektiw kanunalaýyklyklary aňladýarlar. Diýmek, fizikanyň esasy agtaryş – gözleg usuly, tejribedir. **Tejribe** bu takyk barlap we gaýtalap bolýan şertlerde öwrenilýän hadysa gözegçilik etmekdir. Emeli şertlerde, adatça, tebigatda duşmaýan hadysalary hem ýüze çykarmak mümkin (näbelli himiki elementleriň tapylmagy we başgalar). Ýörite saýlanyp alnan şertlerde geçirilýän tejribä **eksperiment** diýilýär.

Eksperimentiň netijesini düşündirmek üçin çaklama alynýar. Käbir netijäni ýa-da hadysany düşündirmek üçin hödürlenen ylmy çaklama **gipoteza** diýilýär. Gipoteza ýörite tejribe arkaly barlanmaga degişlidir. Çaklamadan garaşylýan netijeler bilen tejribe arkaly alynýan netijeleriň ylalaşykdadygy aýdyňlaşdyrylsa, çaklama ylmy kanuna ýa-da teoriýa öwrülýär.

Tebigatyň obýektiw kanunalaýyklygyny aňladýan we tejribeleriň netijesini jemleýän esasy pikirleriň toplumyna **fiziki teoriýa** diýilýär. Fiziki teoriýa tebigy hadysalaryň uly tapgyryny, bir nukdaý nazardan düşündirýär we ol hadysalaryň belli şertlerde nähili geçjekdigini öňünden bilmäge mümkinçilik berýär. Ylmy – agtaryş usullarynyň has takyklanýanlygy sebäpli, fiziki kanunlar hadysalary diňe hil tarapdan düşündirmän, eýsem dürli fiziki ululyklaryň mukdar gatnaşyklaryny hem kesgitlemäge mümkinçilik döredýär.

Matematikanyň kömegi bilen has gysga görnüşde mukdarlaýyn fiziki kanunlar düzülýär. Şonuň üçin hem fizika takyk ylymlara girýär. Emma fiziki kanunlar absolýut takyklykda bolup bilmez. Her bir fiziki ululygyň ölçeniş takyklygy çäklidir. Emma bu çäkler ylmyň we tehnikanyň ösmegi bilen barha giňelýär. Bu ýerde baglanyşyk iki taraplaýyndyr. Fizikanyň ösmegi täze hadysalaryň, kanunlaryň açylmagy, tehnikanyň dürli pudaklarynda olaryň giňden ulanylmagyna getirýär. Tehnologiýanyň ösmegi öz gezeginde, fiziki agtaryşlaryň giňelmegine ýardam edýär.

Fizikanyň ösüş taryhynda örän wajyp etaplar bar. Klassyky fizika, esasan, XX asyryň başlarynda Nýutonyň taglymatlary esasynda kämilleşdi. Hatda, şol wagtlar fiziki hadysalaryň ählisi Nýutonyň kanunlary arkaly düşündirilip bilner, tebigatyň syrlarynyň bilip bolaýjaklarynyň hemmesi bilindi diýen ýaly bärden gaýtma pikirler hem döräpdi. Emma käbir alymlar klassyky fizikanyň gowşak ýerleriniň bardygyny, ony düzetmäge bolsa düýbünden täze garaýyşlaryň gerekdigini aňýardylar. Mysal üçin, iňlis fizigi Tomson (Lord Kelwin): «Klassyky fizikanyň dury asmanynyň gözýetiminde iki sany gara bulutjagaz bar. Birinjisi absolýut gara jisimiň şöhleleniş teoriýasyny döretmäge synanyşyklaryň puç bolmagy, ikinjisi bolsa, hamana ýagtylyk tolkunlarynyň ýaýramagyny üpjün edýän hyýaly sredanyň – efiriň häsiýetlerindäki gapma-garşylyklaryň bolmagy» diýip ýazypdy. Ine, şu meseleleri çözmäge klassyky fizikanyň mümkinçiligi bolmady. Gözlegler düýpden garaşylmadyk ýoly açdy. 1900-nji ýylda nemes fizigi Maks Plank ýagtylygyň aýry-aýry kwantlar görnüşinde şöhlelenýändigi barada üýtgeşik düşünje girizip, absolýut gara jisimiň şöhleleniş meselesini çözdi. Bu bolsa kwantlar baradaky düşünjäniň emele gelmegine getirdi. Şeýlelikde häzirkizaman fizikasynda aýratyn wajyp roly oýnaýan kwant mehanikasy döredi.

1905-nji ýylda Albert Eýnşteýn giňişlik we wagt baradaky klassyky düşünjeleri düýpli ösdürip, otnositellik teoriýasyny esaslandyrdy. Bu teoriýa laýyklykda, ýagtylygyň tizligi bilen deňeşdirerçe ýokary tizlikli jisimler üçin hereket deňlemeleri klassyky mehanikanyň deňlemelerinden düýpli tapawutlanýar.

1897-nji ýylda elektronyň açylmagy, onuň ähli himiki elementleriň atomlarynyň düzümine girýändiginiň subut edilmegi, atomyň çylşyrymlydygyny, onuň bölünmeýän iň kiçi zat däldigini görkezdi. Soňra bolsa atomyň gurluşy, onuň ýadrosynyň düzümi barada täze subutnamalar alyndy.

Fransuz fizigi Lui de Broýluň, nemes fizikleri Erwin Şredingeriň, Warner Geýzenbergiň we başgalaryň tagallalary bilen jisimiň tolkun we korpuskula (bölejik) häsiýetlerine eýedigi, ýagny dualizm (iki hillilik) häsiýeti doly esaslandyryldy. Şeýlelikde kwant mehanikasy ylmy peýda boldy.

Fiziki prosesleri, hadysalary öwrenmekde häzirki döwrüň serişdeleri örän gowy ýardam edýär. Mysal üçin, kompýuterleriň kömegi bilen ummasyz çylşyrymly prosesleri matematiki modelleşdirip, tiz hem-de az çykdajy bilen öwrenip bolýar. Gelejekde şeýle mümkinçilikler has-da artar.

Fizika dersi daş-töweregimizde bolup geçýän dürli prosesleri ylmy esasda, tebigatyň kanunlaryna laýyklykda giňden öwrenip, olary adamzadyň dürli talaplaryny kanagatlandyrmaga gönükdirmäge ýol açýar. Tehnikanyň dürli pudaklarynda täze-täze tehnologiki prosesleri girizip biljek, dürli mehanizmleri we maşynlary döredip biljek inženerleri taýýarlamakda fizikanyň roly iňňän uludyr.

Fizika kursy aýry-aýry bölümlerden (mehanikanyň fiziki esaslary, molekulýar fizika we termodinamika, elektrik we magnit hadysalary, optika we ş.m.) ybarat bolup, her bir hadysany üzňe öwrenýän ýaly bolsa-da, onuň esasy maksady tebigy hadysalar barada ylmy pikir ýöretmäni öwretmekdir. Bu bolsa her bir inžener üçin iň möhüm häsiýetleriň biridir.

Fiziki ululyklaryň ölçeg birlikleri:

a) esasy ölçeg birlikler: **metr, kilogram, sekunt, amper, kelwin, mol, kandela, radian, steradian.**

b) galan ähli fiziki ululyklar esasy ululyklar arkaly kesgitlenýär (tizlik, tizlenme, güýç, iş we ş.m.).

Metr (*m*) – kripton – 86 atomynyň $2p_{10}$ we $5d_5$ derejeleriniň arasyndaky geçişe degişli şöhlelenmesiniň wakuumdaky 1650 763,73 tolkun uzynlygyna deň.

Kilogram (*kg*) – halkara prototipiň asyl nusgasynyň massasyna deň (1 *kg* massaly platinoiridiý silindri Parižiň golaýyndaky Sewr şäherinde ölçegleriň halkara býurosynda saklanýar).

Sekunt (*s*) – seziý – 133 atomynyň esasy halynyň iki aşa ýuka derejeleriniň arasyndaky geçişe degişli şöhlelenmäniň 9 192 631 770 periodyna deň.

Amper (*A*) – wakuumda biri-birinden bir metr aralykda ýerleşen örän inçe, tükeniksiz uzyn parallel simlerden tok geçende, onuň her metrinde 2.10^{-7} *N* güýç döredip bilýän hemişelik toguň güýjüne deň.

Kelwin (*K*) – suwuň üçhal nokadynyň termodinamik temperaturasynyň 1/273,16 bahasyna deň.

Mol – uglerodyň C_{12} izotopynyň 0,012 kilogramyndaky atomlarynyň sanyna deň bölejiklerden durýan maddanyň mukdary.

Kandela (*kd*) – ýygylygy $540x10^{12}$ *Gs* monohromatik şöhle göýberýän çeşmäniň berlen ugurdaky ýagtylygynyň energetiki güýji (1/683) *Wt/sr* bolan halyndaky ýagtylyk güýji.

Radian (*rad*) – uzynlygy töweregiň radiusyna deň duganyň iki ujuna geçirilen radiuslarynyň arasyndaky burç.

Steradian (*sr*) – depesi sferanyň merkezinde ýerleşen we sferanyň üstünde onuň radiusynyň kwadratyna deň meýdany kesýän konusyň jisim burçuna deňdir.

I bölüm

MEHANIKANYŇ FIZIKI ESASLARY

I BAP. KINEMATIKA

1.1. Material nokadyň orta tizligi. Pursatlaýyn tizlik we tizlenme

Fiziki hadysalar ýönekeýleşdirilen modelleriň kömegi bilen öwrenilýär. Mehanika hereketi öwrenmekde hem modelleşdirmeden peýdalanylýar. Berlen şertlerde ölçeglerini hasaba almasaň-da bolýan, massasy bar bolan jisime **material nokat** diýilýär. Bilelikde seredilýän material nokatlaryň köplügine **material nokatlaryň sistemasy** diýilýär. Nokadyň hereketi haýsy bolsa-da bir jisime ýa-da jisimleriň sistemasyna görä öwrenilýär. Şol jisime (jisimleriň sistemasyna) **hasaplaýyş sistemasy** diýilýär. Bir nokatda (başlangyç nokat) kesişýän özara perpendikulýar üç göni çyzyk boýunça x, y, z ululyklary ýerleşdirmek bilen koordinatalaryň gönüburçly ýa-da ortoganal sistemasy alynýar. x, y, z koordinatalaryň bahalaryny aýry-aýrylykda üýtgedip, giňişligiň her bir nokadyny aňladyp bolýar.

Diýmek, material nokadyň islendik wagt pursatyndaky orny üç skalýar deňleme bilen kesgitlenýär:

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = z(t) \end{cases}$$

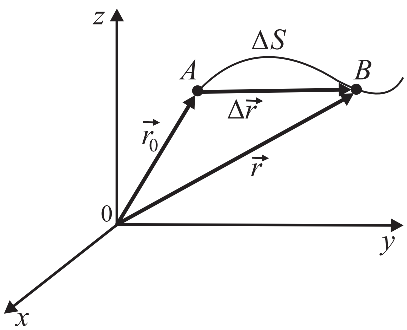
Emma bu ululyklaryň giňişlikdäki ugurlaryny göz öňünde tutup, olary wektorlaryň goşulyşy ýaly goşsak, onda jemleýji $\vec{r} = \vec{r}(t)$ wektory alarys. Bu wektor koordinatalar başlangyjy bilen material nokady birleşdirýän wektordyr. Oňa **radius-wektor** diýilýär.

Radius-wektor arkaly material nokadyň ornuny aňlatmak matematiki amallarda ep-esli ýeňillikleri döredýär.

Bir-birlerine görä ýerleşişleri hemişelik bolan we hiç bir täsir sebäpli aradaşlyklary üýtgemeýän material nokatlaryň toplumyna **absolýut gaty jisim** diýilýär. Absolýut gaty jisimleriň hereketi öwrenilende onuň düzümindäki material nokadyň haýsydyr biriniň hereketini öwrenip, galanlarynyň bolsa şoňa görä aýlaw hereketini öwrenmek ýeterlikdir.

Suwukluklaryň we gazlaryň mehanikasynda olary öz tutýan göwrümlerinde üznüksiz paýlanan birhilli ýaýran madda hasap etmek, galapyn, ýeterlikdir. Şeýle sistema **tutuş sreda** diýilýär.

Sebäplerine garamazdan, material nokadyň ýa-da gaty jisimiň wagtyň geçmegi bilen giňişlikde orun üýtgetmesini öwrenýän ylma **kinematika** diýilýär. Hereketiň kinematiki deňlemesini düzmek üçin material nokadyň koordinatalaryny we olaryň haýsy pursatlara degişlidigini bilip, olaryň özara baglylyk aňlatmasy $(\vec{r}(t))$ tapylýar.



1.1-nji çyzgy

Islendik iki pursata degişli radius-wektorlaryň tapawudy orun üýtgetmäni görkezýär (*1.1-nji çyzgy*): $\Delta\vec{r} = \vec{r} - \vec{r}_0$.

Material nokadyň giňişlikdäki ähli eýeleýän orunlarynyň yzygider geometriki ýerleşmesine **traýektoriýa** diýilýär.

Öwrenilýän iki wagt pursatyna degişli orunlaryň arasyndaky traýektoriýanyň uzynlygyna şol wagtdaky **geçilen ýol** (ΔS) diýilýär. Orun üýtgetme bilen geçilen ýol gönüçyzykly hereketde deňdir. Beýleki şertlerde, 1.1-nji çyzgydan görnüşi ýaly, wagt aralygy ulalanda onuň üýtgemegi bilen ýoluň tapawudy ulalýar. Öwrenilýän wagt aralygyndaky orun üýtgemäniň şol wagta bolan gatnaşygyna **orta tizlik** diýilýär:

$$\vec{\upsilon}_{orta} = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}. \tag{1.1}$$

Tizligiň ölçeg birligi *m/s*, $[LT^{-1}]$. Bu ýerde $\vec{r} = \vec{e}_x x(t) + \vec{e}_y y(t) + \vec{e}_z z(t)$, $|\vec{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, $\vec{e}_x x(t)$, $\vec{e}_y y(t)$, $\vec{e}_z z(t)$ – koordinata oklar boýunça wektoryň düzüjileri.

Hereket çaltlygy barada has takyk maglumat almak üçin synagyň wagtyny mümkin boldugyça azaltmaly.

Matematiki dilde aýdylanda Δt nola ymtylandaky orun üýtgetmäniň ahyrky çägini almaly:

$$\vec{\upsilon}_t = \lim_{t\to 0}\frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \dot{\vec{r}}, \tag{1.2}$$

bu ýerde $\dot{\vec{r}}$ – radius-wektoryň wagta görä birinji önümi. Bu tizlige **pursatlaýyn tizlik** diýilýär.

Görnüşi ýaly, pursatlaýyn tizlik wagtyň *t* pursatynyň golaýyndaky tizligi häsiýetlendirýär. Pursatlaýyn tizligiň wektory traýektoriýanyň *t* wagt pursatyna degişli nokadyna galtaşma boýunça gönükdirilendir.

Eger pursatlaýyn tizlik ugry hem-de ululygy (moduly) boýunça üýtgemän galsa, onda herekete **gönüçyzykly deňölçegli hereket** diýilýär. Eger tizlik wagtyň geçmegi bilen üýtgeýän bolsa, onda onuň nähili çaltlyk bilen üýtgeýändigini bilmeli:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{\upsilon}}{dt} = \dot{\vec{\upsilon}} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = \ddot{\vec{r}}, \tag{1.3}$$

bu ýerde $\ddot{\vec{r}}$ – radius-wektoryň wagta görä ikinji önümi.

Tizligiň üýtgeýşiniň çaltlygyny aňladýan bu ululyga material nokadyň **tizlenmesi** diýilýär. Ölçeg birligi – m/s^2, $[LT^{-2}]$.

1.2. Hereketiň dürli görnüşleri. Aýlanma hereket. Burç tizligi we tizlenmesi

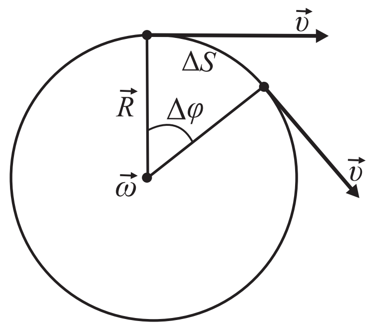
Nokadyň traýektoriýasy göni çyzyk bolsa, onda ol herekete **gönüçyzykly hereket** diýilýär. Eger tizlik wektory wagtyň geçmegi bilen ugruny we ululygyny üýtgetmeýän bolsa, onda oňa **gönüçyzykly deňölçegli hereket** diýilýär.

Material nokat töwerek boýunça hereket edende ol käbir hereketsiz nokatdan elmydama deň uzaklykda bolýar. Töweregiň merkezini hasaplaýyş başlangyjy hökmünde alyp bolýar. Bu ýagdaýda radius-wektoryň moduly üýtgemän, diňe onuň ugry üýtgeýär (*1.2-nji çyzgy*).

Şeýle hereket üçin radius-wektoryň aýlanma ýa-da burç tizligi barada düşünje girizilýär. Tükeniksiz kiçi wagtda radius-wektoryň aýlanma burçunyň ($\Delta\varphi$) degişli wagt aralygyna (Δt) gatnaşygyna **burç tizligi** (ω) diýilýär:

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}.$$

Ölçeg birligi $[\omega] = \frac{rad}{s}$, $[T^{-1}]$.



1.2-nji çyzgy

Burç tizligi wektor ululykdyr. Onuň ugry saglakaý burawjygyň düzgüni bilen tapylýar (eger burawjygyň tutawajy nokadyň hereket ugruna aýlansa, onda onuň süýşme ugry burç tizliginiň ugruny görkezýär).

Synag möhletini barha azaldyp differensial aňlatma alýarys:

$$\vec{\omega}_t = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{\varphi}}{\Delta t} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt}, \tag{1.4}$$

bu ýerde $\vec{\omega}_t$ – pursatlaýyn burç tizligi. Nokadyň çyzyk we burç tizliklerini baglanyşdyryp bolýar:

$$\upsilon = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta S}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{R\Delta\varphi}{\Delta t} = R \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = R\omega,$$

$$\upsilon = \omega R; \quad [\vec{\upsilon}] = [\vec{\omega}\,\vec{R}].$$

Aýlanyş ýygylygy

$$n = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$$

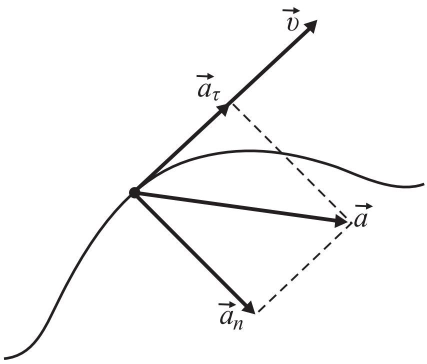
deňlik bilen kesgitlenýär (T – aýlanma periody).

Eger burç tizligi üýtgeýän bolsa, onda onuň birinji önümine deň bolan ululyga **burç tizlenmesi** diýilýär:

$$\vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}. \tag{1.5}$$

Ölçeg birligi $\frac{rad}{s^2}$, $[T^{-2}]$.

Burç tizliginiň wektory artanda burç tizlenme wektory onuň ugruna gabat gelýär. Burç tizligi kemelen mahaly bolsa, tizlenme onuň tersine ugrukdyrylandyr.



1.3-nji çyzgy

Egri çyzykly hereketde çyzyk tizligiň wektory islendik pursatda traýektoriýanyň degişli nokadyna galtaşma boýunça ugrukdyrylandyr (*1.3-nji çyzgy*).

Birlik wektoryň önümi onuň özüne perpendikulýar birlik wektor bolýar. Ony $\vec{n}$ bilen belläliň.

Onda

$$\vec{a} = \frac{d\vec{\upsilon}}{dt}\vec{\tau} + \upsilon\vec{n}\frac{d\varphi}{dt} = \vec{a}_\tau + \upsilon\omega\vec{n},$$

$$\vec{a} = \vec{a}_\tau + \upsilon\frac{\vec{\upsilon}}{R}\vec{n} = \vec{a}_\tau + \frac{\vec{\upsilon}^2}{R}\vec{n} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n, \tag{1.6}$$

bu ýerde $\vec{\tau}$ – tangensial ort ýa-da galtaşma çyzygyň birlik wektory, a_τ – **tizlenmäniň galtaşma ýa-da tangensial düzüjisi**. Ol tizligiň modulynyň nähili çaltlykda üýtgeýşini aňladýar:

$$a_\tau = \frac{d\upsilon}{dt}, \quad \upsilon = \omega R, \quad a_\tau = R\frac{d\omega}{dt} = R\varepsilon, \tag{1.7}$$

bu ýerde $\vec{a}_n$ – **tizlenmäniň normal düzüjisi**. Ol tizligiň ugrunyň üýtgeýiş çaltlygyny görkezýär:

$$a_n = \frac{\upsilon^2}{R} = \omega^2 R. \tag{1.8}$$

Şeýlelikde, hereketiň dürli görnüşlerini tizlenmäniň düzüjileriniň üýtgeýşi arkaly häsiýetlendirip bolýar:

1. $a_\tau = 0$, $a_n = 0$ – göni we deňölçegli hereket.
2. $a_\tau = \text{const}$, $a_n = 0$, – göni deňüýtgeýän hereket.
   $a_\tau > 0$ – deňtizlenýän, $a_\tau < 0$ – deňhaýallanýan hereket.
3. $a_\tau = f(t)$, $a_n = 0$ – üýtgeýän tizlenmeli göni hereket.

4. $a_\tau = 0$, $a_n = \text{const}$ – deňölçegli töwerekleýin hereket ($a_n = \dfrac{\upsilon^2}{R}$ aňlatmadan görnüşi ýaly R – hemişelik bolmaly, sebäbi $a_\tau = \dfrac{d\upsilon}{dt} = 0$ aňlatma görä $\upsilon = const$).

5. $a_\tau = 0$, $a_n = f(t) \neq 0$ – egriçyzykly deňölçegli hereket.

6. $a_\tau = const$, $a_n \neq 0$ – egriçyzykly deňüýtgeýän hereket.

7. $a_\tau = f(t)$, $a_n \neq 0$ – üýtgeýän tizlenmeli egriçyzykly hereket.

Material nokadyň hereket deňlemesi geçilýän ýoluň ýa-da aýlanma burçunyň wagta baglylygy $S(t)$, $\varphi(t)$ görnüşde berlen bolsa, onda olaryň wagta görä birinji önümleri nokadyň çyzyk we burç tizliklerini kesgitleýär:

$$\upsilon = \frac{dS(t)}{dt}, \quad \omega = \frac{d\varphi(t)}{dt}. \tag{1.9}$$

Fiziki meselelerde bir ululygyň yzygider artmagynda oňa bagly beýleki ululygyň hem barha artýan ýagdaýynda jemleýji ululygy tapmak üçin integraldan peýdalanylýar.

Mysal üçin:

1) Deňölçegli hereketde geçilýän ýoly şeýle tapyp bolýar:

$$S = S_0 + \int_{t_1}^{t_2} \upsilon dt = S_0 + \upsilon(t_2 - t_1) = S_0 + \upsilon t.$$

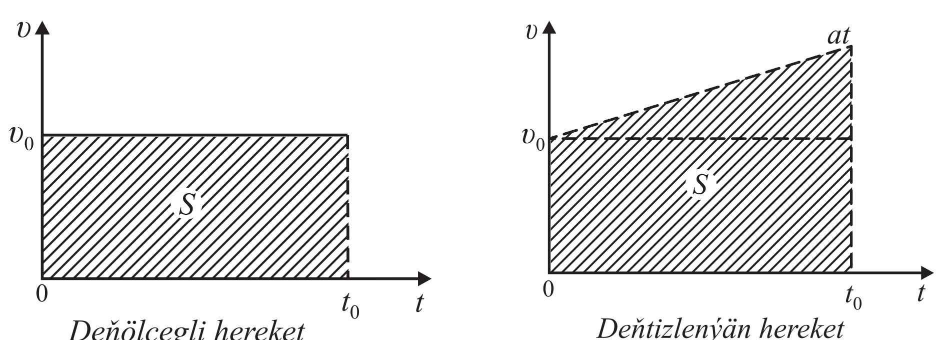
2) Deňtizlenýän hereketde tizlik we ýol:

$$\upsilon = \upsilon_0 + a\int_0^t dt = \upsilon_0 + at, \tag{1.10}$$

$$S = \int_0^t (\upsilon_0 + at)dt = \int_0^t \upsilon_0 dt + a\int_0^t tdt,$$

$$S = \upsilon_0 t + \frac{at^2}{2}.$$

(1.10) formulanyň manysyny grafikde synlamak üçin υ tizlik bilen t wagtyň arasyndaky baglanyşygyň grafigi gurulýar (*1.4-nji çyzgy*).



1.4-nji çyzgy

Funksiýadan alnan çäkli integral funksional çyzyk bilen absissalar okunyň arasyndaky meýdany kesgitleýär.

Eger giňişlik ortogonal hasaplaýyş sistemasynda üç ok bilen häsiýetlendirilýän bolsa, diýmek material nokadyň hereketi üç koordinata bilen doly kesgitlener.

Nokadyň giňişlikdäki ornuny kesgitleýän özbaşdak koordinatalaryň sanyna **erkinlik derejesiniň sany** diýilýär.

Görşümiz ýaly, material nokadyň erkinlik derejesiniň sany, giňişlikde üçe, tekizlikde bolsa ikä deň, diňe göni çyzygyň ugruna hereket edip bilýän ýagdaýynda bire deňdir. Absolýut gaty jisim, öň aýdylyşy ýaly, diňe öňe hereket etmän, eýsem käbir nokadyň daşynda üç ugurda, özara perpendikulýar tizliklerde aýlanyp hem bilýär.

Şol sebäpli absolýut gaty jisim giňişlikde hereket edende onuň erkinlik derejesiniň sany alta barabardyr. Jisimiň ýa-da mehaniki sistemanyň düzümindäki bölekler aradaşlyklaryny üýtgedip bilýän bolsalar (jisim deformirlense) erkinlik derejesiniň sanynyň has-da köp bolmagy mümkindir. Şeýle çylşyrymly hereketleri matematiki aňlatmak üçin radius-wektorlar, ýagny umumylaşdyrylan koordinatalary ulanmak kän amatlyklary döredýär.

II BAP. ÖŇE HEREKETIŇ DINAMIKASY

2.1. Hereketiň deňlemesi. Massa. Inertlilik

Dinamika jisimiň hereketini, ol hereketleriň häsiýetini kesgitleýän sebäpler bilen baglylykda öwrenýär. Mysal üçin, tizligiň üýtgemegi, traýektoriýanyň gyşarmagy birnäçe jisimleriň özara täsirleşmegi netijesinde bolup biler. Diýmek, şol täsirler hereketiň üýtgemeginiň sebäbidir.

Material nokadyň ýa-da nokatlar sistemasynyň belli bir pursatdaky, diňe özüne mahsus bolan fiziki ululyklaryň bahalary bilen kesgitlenýän häsiýetnamasyna **mehaniki sistemanyň haly** diýilýär. Mehaniki sistemanyň halynyň üýtgemesi elmydama başga jisimler bilen täsirleşmegi netijesinde bolup biler.

Jisimiň halyny kesgitleýän fiziki ululyklaryň (massa, tizlenme, täsir edýän güýç we ş.m.) özara baglanyşygyny aňladýan deňlemä **hereketiň deňlemesi** diýilýär.

Eger jisime başga jisimler tarapyndan edilýän täsir onuň tizligini üýtgedýän bolsa, onda oňa tizlenme berilýär. Emma, dürli jisimlere bir deň täsir edilende, olar dürli ululykdaky tizlenme alýarlar. Her bir jisim öz ýagdaýynyň üýtgedilmegine garşylyk görkezýär. Jisimleriň şu häsiýetine **inertlilik** diýilýär. Inertliligi mukdar taýdan häsiýetlendirmek üçin **massa** diýlip atlandyrylýan fiziki ululyk kabul edilendir. **Massa inertliligiň ölçegidir.**

Massa baradaky düşünje jisimleriň grawitasion dartyşmasy (bütindünýä dartyşma kanuny) netijesinde hem ýüze çykýar. Şeýlelikde **massa – materiýanyň**

esasy häsiýetleriniň birini aňladýan fiziki ululykdyr. Inersion massa bilen grawitasion massa deňdir. Bu bolsa massa barada umumy bir pikir ýöretmäge mümkinçilik berýär. Her bir jisimiň massasy nusga (etalon) deregine kabul edilen jisimiň massasy bilen deňeşdirmek arkaly kesgitlenip bilner.

Jisimleriň täsirlenişini öwrenmekde ýapyk sistema görnüşindäki modele seretmek peýdalydyr. **Ýapyk sistema diýlip hiç bir gaýry jisim bilen däl-de diňe öz aralarynda täsirleşýän jisimleriň toplumyna aýdylýar.** Diňe iki jisimden ybarat bolan sistema ýapyk sistemanyň ýönekeý modelidir.

Eger iki jisim täsirleşse, olaryň tizligi üýtgär, emma biriniň tizligi ulalsa, beýlekisiniňki kiçeler, ýagny jisimleriň tizlikleriniň üýtgemesi alamatlary boýunça ters bolar.

Ýöne, tizlikleriň üýtgemesiniň modullarynyň gatnaşygy olaryň nähili täsirleşýändigine bagly bolman, şol jisimleriň massalarynyň ters gatnaşygyna deňdir:

$$\frac{|\Delta\upsilon_1|}{|\Delta\upsilon_2|} = \frac{m_2}{m_1}.$$

Bu gatnaşykdan:

$$m_1\Delta\vec{\upsilon_1} = -\,m_2\Delta\vec{\upsilon_2} \quad \text{ýa-da} \quad \Delta\left(m_1\vec{\upsilon_1}\right) = -\,\Delta\left(m_2\vec{\upsilon_2}\right).$$

Jisimiň massasynyň we tizliginiň köpeltmek hasylyna deň, ugry tizligiň ugry bilen gabat gelýän wektor ululyga impuls ýa-da hereket mukdary diýilýär:

$$\vec{P} = m\vec{\upsilon}. \tag{2.1}$$

Halkara sistemasynda (HS) massanyň birligi hökmünde ýörite platina – iridiý garyndysyndan ýasalan jisimiň massasy kabul edilen.

Ol Parižiň golaýyndaky Sewr şäherinde ölçegleriň we agramlaryň Halkara býurosynda saklanýar. Onuň massasy bir kilograma deňdir we 4ºC temperaturadaky 1000 sm^3 göwrümli arassa suwuň massasyna golaýdyr.

Impulsyň ölçeg birligi: $kg \cdot m/s$, $[LMT^{-1}]$.

2.2. Nýutonyň kanunlary

Nýutonyň kanunlaryna esaslanan klassyky fizika XIX asyrda yzygiderli we ýerbe-ýer teoriýa hasaplanylýardy we onda “ähli fiziki hadysalary mehaniki proseslere syrykdyryp düşündirip bolýar” diýen pikir agdyklyk edýärdi. 1905-nji ýylda Eýnşteýniň döreden otnositellik teoriýasy, Nýutonyň giňişlige hem-de wagta bolan garaýyşlaryny düýbünden täzeledi. Bu teoriýa laýyklykda, ýagtylygyň tizligine golaý uly tizliklerde mehanikanyň kanunlarynyň düýpgöter üýtgeýändigi subut edilýär. Şeýlelikde, relýatiwistik mehanika döredi. Ol klassyky mehanikany doly ret etmeýär, sebäbi relýatiwistik mehanikanyň deňlemeleri kiçi tizliklerde **klassyky mehanikanyň** deňlemelerine geçýär we diňe onuň ulanylyş çäkliligini görkezýär. Soňra atom fizikasynyň ösdügiçe kwant mehanikasy döredi. Bu-da klassyky fizikanyň kanunlarynyň çäkliligini görkezdi. Nýutonyň kanunlary ýokarda agzalan kemçiliklere garamazdan köp şertlerde ýeterlik takyklygyny saklaýar we häzirki-zaman fizikasynda hem mynasyp orna eýedir.

Nýutonyň birinji kanuny: her jisim tä başga jisimiň täsiri onuň ýagdaýyny üýtgetmäge mejbur edýänçä, özüniň dynçlyk ýagdaýyny ýa-da deňölçegli we göniçyzykly hereketini saklaýar. Görnüşi ýaly, jisimiň ýagdaýy üýtgemese onuň tizlenmesi nola deňdir we tizligi üýtgemän galýar. Şoňa görä-de, bu kanuny dürli-dürli görnüşde aýtmak bolýar.

Eger biri-birine görä tizlenmeli hereketdäki iki hasaplaýyş sistemasyny alsak, onda jisimiň tizligi iki sistema görä-de hemişelik bolup bilmez. Elbetde, Nýutonyň birinji kanuny bir sistema görä ýerine ýetse-de, beýlekisine görä ýerine ýetmezligi mümkin.

Nýutonyň birinji kanuny doly ýerine ýetýän hasaplaýyş sistema, **inersial sistema** diýilýär. Şoňa görä-de, bu kanunyň özi-de **inersiýa kanuny** adyna eýedir. Merkezinde Gün bolan hasaplaýyş sistemanyň (geliosentrik hasaplaýyş sistema) inersial sistema örän golaýdygy tejribe arkaly subut edilýär. Takyk ölçegler üçin Ýer inersial sistema bolup bilmez. Inersial däl sistemalarda inersiýa güýçleri döreýär we Nýutonyň kanuny ýerine ýetmeýär.

Nýutonyň ikinji kanuny: impulsyň üýtgeýiş tizligi jisime täsir edýän güýje deňdir:

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \vec{F} \tag{2.2}$$

Bu aňlatma hereketiň deňlemesi diýilýär. Impulsyň aňlatmasyny göz öňünde tutup, deňlemäni şeýle ýazmak mümkin:

$$\frac{d}{dt}(m\vec{\upsilon}) = m\frac{d\vec{\upsilon}}{dt} = m\vec{a} = \vec{F}. \tag{2.3}$$

Şeýlelikde, Nýutonyň ikinji kanuny başgaça-da aýdylyp bilner: **jisimiň massasynyň onuň tizlenmesine köpeltmek hasyly jisime täsir edýän güýje deňdir.**

Nýutonyň ikinji kanunynyň esasynda güýç barada, ýagny täsirleri mukdar taýdan häsiýetlendirýän ululyk barada düşünje gelip çykýar. Eger massa birligi nusga görnüşde alynmasa, onda massany we güýji bir deňlemeden tapyp bolmajagy aýdyňdyr. Şol sebäpli güýjüň düýp manysy doly kesgitlenmedikdir.

Güýjüň ölçeg birligi hökmünde nýuton (*N*) kabul edilendir. Ol 1 *kg* massaly jisime täsir edip, oňa 1 m/s^2 tizlenme berýän güýje barabardyr. Ölçeg birligi: LMT^{-2}.

Mehanikada güýçleriň baglanyşyksyzlyk prinsipiniň uly ähmiýeti bardyr. Material nokada birnäçe güýç täsir edýän bolsa, olaryň her biri hamala başga güýçler ýok ýaly, Nýutonyň ikinji kanunyna laýyklykda, jisime tizlenme berýär. Bu bolsa güýji we tizlenmäni düzüjilere dargatmaga hem-de meseläni ýönekeýleşdirmäge mümkinçilik berýär.

Matematikadan belli bolşy ýaly, islendik funksiýanyň üýtgeýiş tizligi, şol funksiýanyň wagta görä önümidir:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{P}}{dt} = \dot{\vec{P}}. \tag{2.4}$$

Şeýlelikde, güýjüň ululygy jisimiň impulsynyň birinji önümine deňdir.

Nýutonyň üçünji kanunyna laýyklykda, jisimleriň biri-birine täsir ediş güýçleri ululyklary boýunça deň we ugurlary boýunça garşylyklydyr:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}. \tag{2.5}$$

Bu ýerde güýçleriň dürli jisimlere täsir edýändigini aýratyn bellemeledir.

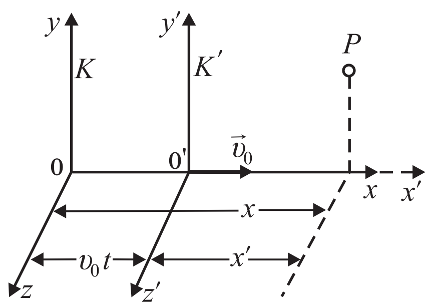
Nýutonyň üçünji kanuny diňe jisimleriň özara degişip ýa-da belli aradaşlykda dynçlykda durup, täsirleşmeginde ýerine ýetýär. Emma, hereket edýän jisimler üçin (ylaýta-da otnositel tizlikleri ýagtylygyň tizligine golaý bolsa) bu kanun adalatly däldir. Mysal üçin, biri beýlekä görä hereketdäki iki zarýad täsirleşende Kulonyň güýjünden başga-da magnit meýdanynyň döredýän täsir güýji (Lorensiň güýji) ýüze çykýar. Netijede, hasaplaýyş sistemasynyň saýlap alnyşyna görä, güýçleriň deň bolmazlyklary-da mümkindir. Şeýle mysallar Nýutonyň kanunlarynyň çäklidigini görkezýär.

2.3. Inersial hasaplaýyş sistemasy we otnositellik prinsipi. Galileýiň özgerdişleri

Nýutonyň birinji kanunynyň ýerine ýetýän sistemasyna inersial sistema diýilýär. Goý, iki sany inersial sistema (K we K') berlen bolsun.

Meseläni ýönekeýleşdirmek üçin, x we x' oklar biri-biriniň üstünde ýatýan, y, y' we z, z' oklar, degişlilikde parallel diýip hasap edeliň. K' sistema K sistema görä x' okuň ugruna deňölçegli we göni υ_0 tizlik bilen hereket edýär diýeliň. P nokatda ýerleşen material nokadyň koordinatalaryny dürli sistemalarda tapalyň we baglanyşdyralyň (*2.1-nji çyzgy*):

$$x = x' + \upsilon_0 t, \quad y = y', \quad z = z', \quad t = t'.$$



2.1-nji çyzgy

Deňlemeler, klassyky mehanikada kabul edilişi ýaly, wagtyň geçişiniň islendik sistemada deňdigine esaslanandyr. Koordinatalaryň we wagtyň bir sistemadan beýleki sistema şeýle özgerdişlerine Galileýiň özgertmeleri diýilýär. Deňlemeleriň birinjisiniň we dördünjisiniň diňe $\upsilon_0 << c$ şertlerde ýerliklidigini bellemek gerek. Deňlemeleri differensirläp iki sistema görä tizlikleriniň baglanyşygyny taparys:

$$x = x' + \upsilon_0 t, \qquad \upsilon_x = \upsilon'_x + \upsilon_0$$

$$y = y', \qquad \upsilon_y = \upsilon'_y$$

$$z = z', \qquad \upsilon_z = \upsilon'_z$$

Üç düzüjiniň esasynda ortogonal sistemada bir wektor alyp bolýar, ýagny

$$\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}' + \vec{\upsilon}_0 \tag{2.6}$$

Bu bolsa tizlikleriň goşulyş düzgünini berýär. Soňky deňligi ýene-de differensirläp alarys:

$$\dot{\vec{\upsilon}} = \dot{\vec{\upsilon}}' \quad \text{ýa-da} \quad \vec{a} = \vec{a}'. \tag{2.7}$$

Tizlenme bir inersial hasaplaýyş sistemasyndan beýlekä geçilende üýtgemeýär.

Diýmek, massanyň hemişelikdigini nazarda tutsak dinamikanyň deňlemeleri bir inersial hasaplaýyş sistemadan başgasyna geçilende üýtgemän galýarlar ýa-da başgaça aýdylanda, olar bir inersial hasaplaýyş sistemadan başgasyna geçmäge degişli özgertmelere görä inwariantdyrlar (üýtgemeýärler). Berlen inersial hasaplaýyş sistemanyň çäklerinde geçirilen hiç bir mehaniki tejribe arkaly, onuň dynçlyk halyndamy ýa-da deňölçegli we gönüçyzykly hereketdedigini bilip bolmaz. Bu prinsip Galileý tarapyndan aýdyňlaşdyryldy we **Galileýiň otnositellik prinsipi** adyna eýedir.

Klassyky mehanikada tizlik we tizlenme otnositeldir, sebäbi hiç bir absolýut hasaplaýyş sistemasy bolup bilmez. Islendik sistemanyň dynçlykdadygyny ýa- da hereketdedigini ýene başga sistema görä kesgitlemeli bolýar. Şonuň üçin-de absolýut tizlik barada gürrüň etmäge hiç bir fiziki esas ýokdur. Emma tizlenme islendik inersial sistema görä hemişelikdir.

2.4. Inersial däl hasaplaýyş sistemasy. Inersiýa güýçleri

Öň belleýşimiz ýaly, Nýutonyň kanunlary diňe inersial hasaplaýyş sistemalarda ýerine ýetýär. **Inersial sistema görä tizlenmeli hereket edýän hasaplaýyş sistemasyna inersial däl sistema diýilýär.**

Olar üçin Nýutonyň birinji kanuny ýerine ýetmeýär. Emma Nýutonyň ikinji kanunyny tizlenmeli hereket üçin ulanyp bolar. Şoňa görä-de tizlenmeli sistemada dynçlyk halynda ýerleşdirilen jisime elmydama

$$\vec{F}_{in} = -m\vec{a} \tag{2.8}$$

güýç täsir edýär. Oňa **inersiýa güýji** diýilýär. Mysal üçin, ýapyk kabina hemişelik tizlenme bilen ümmülmez giňişlikde hereket edýär diýip göz öňüne getireliň. Onda, kabinanyň içinde ýerleşen her bir jisime

$$\vec{F}_{in} = -m\vec{g} \tag{2.9}$$

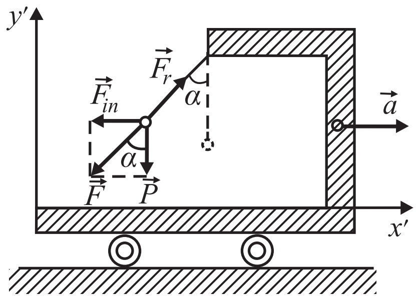
güýç täsir eder, ýagny hiç bir tejribe bilen kabinanyň hereketdedigini ýa-da Ýeriň üstünde dynçlyk halyndadygyny saýgaryp bolmaz.

Diýmek, inersiýa güýçleri grawitasion güýçlere meňzeşdir we jisimiň massasyna göni baglydyr. Muňa **Eýnşteýniň ekwiwalentlik prinsipi** hem diýilýär.

Eger inersial däl sistemadaky jisime başga güýç täsir edip, ony goşmaça tizlendirýän bolsa, onda Nýutonyň kanuny şeýle ýazylýar:

$$m\vec{a}' = \vec{F} + \vec{F}_{in}\,; \quad \vec{a}' = \frac{1}{m}\vec{F} - \vec{a}. \qquad (2.10)$$

Mysal üçin, goý, arabajyk tizlenme bilen hereket etsin. Onuň üstündäki asylgy jisim inersiýa güýjüniň täsiri bilen dik ýagdaýyndan gyşarar. Agyrlyk güýji bilen inersiýa güýjüniň wektorlaýyn jemi ýüpüň reaksiýa (gaýtargy) güýjüne deň bolan halynda ýük saklanar (*2.2-nji çyzgy*):



2.2-nji çyzgy

$$\mathrm{tg}\alpha = \frac{F_{in}}{P} = \frac{ma}{mg} = \frac{a}{g}.$$

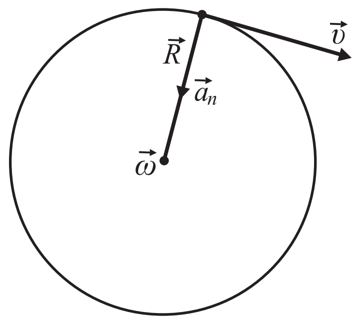
Eger material nokat *R* radiusly töwerek boýunça deňölçegli hereket edýän bolsa, onda ol tizlenmeli hereket edýär.

Tizlenmäniň normal düzüjisini burç tizligi, $\vec{a}_\tau = 0$, $\vec{a}_n \neq 0$ we radius arkaly aňladalyň (*2.3-nji çyzgy*):

$$\vec{a}_n = -[\vec{\omega}[\vec{R}, \vec{\omega}]]; \quad \vec{a}_n = -\omega^2\vec{R}. \qquad (2.11)$$

$\vec{F} = -m\vec{a}_n$ inersiýa güýji merkezden radius-wektoryň ugry boýunça radial ugur boýunça gönükdirilendir. Ol güýje **merkezden daşlaşýan inersiýa güýji** diýilýär:

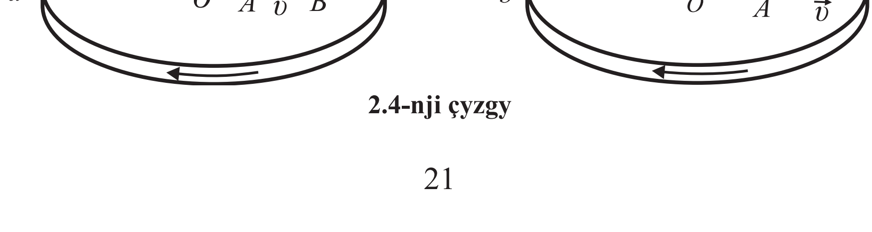
$$\vec{F} = -m\vec{a}_n = m\omega^2\vec{R}. \qquad (2.12)$$



2.3-nji çyzgy

Bu aňlatmadaky güýje aýlanýan sistema görä dynçlykdaky jisime täsir edýän inersiýa güýji hem diýilýär. Goý, gorizontal ýerleşen disk merkezinden geçýän dik okuň daşynda aýlanýan bolsun. Onuň üstünde goýlan şar merkezden daşlaşýan güýjüň täsiri bilen hereket edip başlar (*2.4-nji çyzgy*).

Disk dynçlykda mahaly *A* nokatdaky şarjagaz *AB* ugur boýunça hereket eder. Disk ω burç tizligi bilen aýlanýan bolsa, *A* nokatdaky şarjagaz *B′* nokada tarap üzük egri çyzyk boýunça hereket eder. 2.4-nji *a* çyzgydan peýdalanyp, ölçegleriň kiçidigini hasaba alyp, *B′* nokada tarap hereket edýän şarjagaz üçin alarys:



2.4-nji çyzgy

$$\Delta S = AB\Delta\varphi; \quad AB = \upsilon\Delta t; \quad \Delta\varphi = \omega\Delta t.$$

Bu ýerden $\Delta S = \omega\upsilon\Delta t^2$.

Geçilen ýol tizligiň kwadratyna bagly bolany üçin bu deňligi deňölçegli üýtgeýän hereketiň

$$\Delta S = \frac{a\Delta t^2}{2}$$

formulasy bilen deňeşdirip alarys:

$$a_k = 2\upsilon\omega.$$

Bu tizlenmäniň täsiri bilen $F_k = ma_k$ güýç döreýär. Ol güýç $\vec{\upsilon}$ tizlige perpendikulýardyr (*2.4-nji b çyzgy*) we şarjagazy egri üzük çyzyk bilen hereket etmäge mejbur edýär. F_k inersiýa güýjüdir. Oňa **Koriolis güýji** diýilýär:

$$F_k = 2m\upsilon\omega.$$

Bu güýji

$$\vec{F_k} = 2m[\vec{\upsilon}\ \vec{\omega}] \tag{2.13}$$

görnüşdäki wektor deňlik bilen hem aňlatmak bolýar. Burç tizliginiň $\vec{\omega}$ wektory diskden aňry tarapa, diske perpendikulýar ugrukdyrylandyr. $\vec{F_k}$, $\vec{\upsilon}$ we $\vec{\omega}$ wektorlar özara perpendikulýardyr.

Ýer şaryny aýlanýan sistema diýip alyp, Koriolis güýji ýüze çykaýjak mysallara garap bileris. Polýuslardan başga ýerde (ylaýta-da ekwatoryň golaýynda) erkin gaçýan jisim wertikaldan gündogara gyşarýar. Meridiýanyň ugry boýunça demirgazyga atylan ok demirgazyk ýarymşarda gündogara, günorta ýarym şarda bolsa, günbatara gyşarar. Demirgazyk ýarymşarda derýalaryň sag kenarynyň, günorta ýarymşarda-da çep kenarynyň güýçli opurylýandygyny, demir ýol relsleriniň deň iýilmeýändigini Koriolis güýjüniň ýüze çykmagy bilen düşündirip bolar.

Uzyn ýüpden asylan maýatnigiň yrgyldy tekizliginiň aýlanmagy hem Koriolis güýjüne baglydyr. Bu tejribe bilen Ýeriň öz okunyň daşynda aýlanýandygy subut edilýär (Fukonyň maýatnigi).

2.5. Impuls (hereket mukdary)

Bütewilikde seredilýän material nokatlaryň ýa-da jisimleriň toplumyna mehaniki sistema diýilýär. Mehaniki sistema girýän bölejikleriň özara täsir güýçleri, içki güýçler diýip atlandyrylýar. Sistemanyň material nokatlaryna täsir edýän keseki güýçlere bolsa, daşky güýçler diýilýär. Daşky güýçler täsir etmeýän mehaniki sistema ýapyk sistema diýilýär.

Goý, mehaniki sistema n material nokatdan ýa-da jisimden ybarat bolsun. Nýutonyň üçünji kanunyna laýyklykda olaryň özara täsir güýçleri biri-birine garşy ugrukdyrylandyr we wektorlaýyn (geometrik) jemi nola deň bolmalydyr. Eger material nokatlaryň massalaryny $m_1, m_2, ..., m_{n_1}$, tizliklerini $\vec{\upsilon}_1, \vec{\upsilon}_2, ..., \vec{\upsilon}_n$ bilen bellesek, onda olaryň impulslary $\vec{P}_1 = m_1\vec{\upsilon}_1,\ \vec{P}_2 = m_2\vec{\upsilon}_2, ..., \vec{P}_n = m_n\vec{\upsilon}_n$ bolar.

Içki güýçleriň deňtäsiredijisini $\vec{F}_i$, daşky güýçleriň deňtäsiredijisini $\vec{F}_i'$ arkaly aňladalyň.

Onda her bir material nokat üçin Nýutonyň ikinji kanunyny ýazyp bolar:

$$\frac{d}{dt}\left(m_1\vec{\upsilon}_1\right) = \frac{d}{dt}\vec{P}_1 = \vec{F}_1' + \vec{F}_1,$$

$$\frac{d}{dt}\left(m_2\vec{\upsilon}_2\right) = \frac{d}{dt}\vec{P}_2 = \vec{F}_2' + \vec{F}_2,$$

....

$$\frac{d}{dt}(m_n\vec{\upsilon}_n) = \frac{d}{dt}\vec{P}_n = \vec{F}_n' + \vec{F}_n.$$

Deňlemeleriň degişli agzalaryny goşup, şeýle aňlatma alarys:

$$\frac{d}{dt}(m_1\vec{\upsilon}_1 + m_2\vec{\upsilon}_2 + ... + m_n\vec{\upsilon}_n) =$$
$$= (\vec{F}_1' + \vec{F}_2' + ... + \vec{F}_n') + (\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + ... + \vec{F}_n)$$

ýa-da

$\sum\limits_{i=1}^{n}\vec{F}_i = 0,\quad \sum\limits_{i=1}^{n}\vec{P}_i = \vec{P}$ – şertleri nazara alyp ýazyp bileris:

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \sum_{i=1}^{n}\vec{F}_i' = \vec{F}'. \qquad (2.14)$$

Diýmek, impulslaryň wektorlaýyn jeminiň üýtgeýiş tizligi daşky güýçleriň ählisiniň deňtäsiredijisine deňdir.

Mälim bolşy ýaly, ýapyk sistemany düzýän material nokatlar diňe özara täsirleşmek bilen çäklenýärler we keseki jisimlerden üzňedirler. Diýmek, daşky güýçleriň jemi nola deňdir ýa-da daşky güýçler asla täsirleşmeýärler:

$$\vec{F}_1' + \vec{F}_2' + ... + \vec{F}_n' = 0,\quad \frac{d\vec{P}}{dt} = \frac{d}{dt}\sum(m_1\vec{\upsilon}_1 + m_2\vec{\upsilon}_2 + ... + m_n\vec{\upsilon}_n) = 0.$$

Şeýlelik bilen

$$\vec{P} = \sum_{i=0}^{n} m_i\vec{\upsilon}_i = const. \qquad (2.15)$$

Bu aňlatma **impulsyň saklanma kanuny** diýilýär. **Ýapyk sistemanyň impulsy wagtyň geçmegi bilen üýtgemeýär, ýagny hemişelik saklanýar.**

Bu kanun diňe klassyky mehanikada adalatly bolmak bilen çaklenmän, eýsem ol tebigatyň düýpli kanunydyr.

Impulsyň saklanma kanuny giňişligiň simmetriýa häsiýetiniň biri bolmak bilen onuň birhilliligine baglydyr. **Giňişligiň birhilliligi** şu aşakdakydan ybaratdyr. Jisimleriň ýapyk sistemasy, giňişlikde tutuşlygyna parallel göçürilende, onuň fiziki häsiýetleri we hereketiniň kanunlary üýtgemeýär. Başgaça aýdylanda, **inersial**

hasaplaýyş sistemasynyň koordinatlar başlangyjyny nirede saýlap alsak-da tapawudy ýokdur.

Eger mehaniki sistema içki güýçleriň täsiri bilen *dm* massaly bölegini belli bir ugra zyňýan bolsa, onda sistemanyň özi ters ugra impuls alar. Netijede sistemanyň massasy üýtgemek bilen ol (mysal üçin, raketa) herekete geler. Muňa reaktiw hereketiň prinsipi diýilýär.

Goý, raketanyň massasy *m*, tizligi $\vec{\upsilon}$ bolsun. Onda *dt* wagtda raketanyň massasy kiçelip *m* – *dm*, tizligi-de ösüp $\vec{\upsilon} + d\vec{\upsilon}$ bolar.

Impulsyň saklanma kanuny esasynda, raketanyň impulsynyň üýtgemesi şeýle tapylýar:

$$d\vec{P} = (m - dm)(\vec{\upsilon} + d\vec{\upsilon}) + (\vec{\upsilon} + d\vec{\upsilon} - \vec{u})dm - m\vec{\upsilon},$$

bu ýerde $\vec{u}$ – raketadan gazyň pürkülip çykyş tizligi. Şeýlelikde

$$dP = md\vec{\upsilon} - \vec{u}dm.$$

Nýutonyň ikinji kanunyna görä:

$$d\vec{P} = \vec{F}dt, \quad Fdt = md\vec{\upsilon} - \vec{u}dm \quad \text{ýa-da} \quad m\frac{d\vec{\upsilon}}{dt} = \vec{F} + \vec{u}\frac{dm}{dt},$$

$$m\vec{a} - \vec{F} = \vec{F_p}, \tag{2.16}$$

bu ýerde $\vec{F_p} = \vec{u}\dfrac{dm}{dt}$ – **reaktiw güýç** diýilýän goşmaça güýç.

Soňky deňlemä reaktiw hereketiň ýa-da üýtgeýän massaly jisimiň hereketiniň deňlemesi diýilýär (ilkinji gezek I. W. Meşerskiý hasaplap çykardy). Reaktiw güýji ulanmakda we reaktiw hereketiň teoriýasyny döretmekde N. I. Kibalçiç, K. E. Siolkowskiý we başgalar köp işler bitirdiler.

Eger daşky güýçler täsir etmeýän bolsa ($F = 0$), onda

$$m\frac{d\vec{\upsilon}}{dt} = -\vec{u}\frac{dm}{dt}$$

ýa-da skalýar görnüşde

$$m\frac{d\upsilon}{dt} = -u\frac{dm}{dt}.$$

Bu ýerden raketanyň tizligini tapmak bolar:

$$\upsilon = -u\int\frac{dm}{m} = -u\ln m + c.$$

Integrirleýiş hemişeligini $c = u \ln m_0$ görnüşde alsak (m_0 – başlangyç massa), onda tizlik üçin Siolkowskiniň formulasyny ýazyp bileris:

$$\upsilon = u\ln\left(\frac{m_0}{m}\right). \tag{2.17}$$

Bu formula klassyky mehanikanyň çäklerinde çykarylandyr hem-de raketanyň tizligini, pürkülip çykýan gazyň tizligini raketanyň başlangyç we peýdaly massalary bilen baglanyşdyryar.

2.6. Inersiýa merkezi

Mehaniki sistemada massanyň göwrüm giňişligindäki paýlanyşyny häsiýetlendirýän käbir *c* nokada inersiýa merkezi diýilýär. Ol nokadyň ornuny kesgitleýän radius-wektor şeýle tapylýar:

$$\vec{r}_c = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i \vec{r}_i}{m}, \tag{2.18}$$

bu ýerde n – sistemany düzýän material nokatlaryň sany. Bu nokada **massalar merkezi** hem diýilýär. Ol nokadyň tizligi:

$$\upsilon_c = \frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i \frac{d\vec{r}_i}{dt}}{m} = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i \vec{\upsilon}_i}{m} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \vec{P}_i}{m},$$

bu ýerden $\vec{P} = m\vec{\upsilon}_c$ deňligi alyp bolar.

Material nokatlar sistemasynyň impulsy onuň massasynyň we inersiýa merkeziniň tizliginiň köpeltmek hasylyna deňdir. Hereket deňlemesi şeýle ýazylýar:

$$m\frac{d\vec{\upsilon}_c}{dt} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \ldots + \vec{F}_n. \tag{2.19}$$

Bu aňlatma massalar merkeziniň hereket kanuny. Daşky güýçler nola deň bolsa:

$$m\frac{d\upsilon_c}{dt} = \frac{d}{dt}(m\vec{\upsilon}) = \frac{d\vec{P}}{dt} = 0; \text{ onda } \vec{P} = m\vec{\upsilon}_c = const.$$

Elbetde, jisimiň (mehaniki sistemanyň) massasyny onuň düzümine girýän ähli material nokatlaryň massalarynyň jemi görnüşinde tapýarys:

$$m = \sum_{i=1}^{n} m_i. \tag{2.20}$$

Massanyň şeýle häsiýetine **additiwlik** diýilýär (sistema tutuşlygyna degişli ululyk sistemanyň bölejiklerine degişli ululyklaryň jemine deňdir). Şeýle tassyklama diňe klassyky fizikanyň çäklerinde ýerliklidir.

Mehaniki sistema daşky güýçler täsir etmese, onda onuň doly impulsy üýtgemeýär. Başgaça aýdylanda ýapyk sistemanyň inersiýa merkezi dynçlykdaky ornuny ýa-da deňölçegli we gönüçyzykly hereketini saklaýar. Içki güýçler inersiýa merkezini üýtgedip bilmeýär.

Gaty jisimiň daşky güýçleriň täsiri zerarly ýüze çykýan hereketine massasy jisimiň massasyna deň we inersiýa merkezinde ýerleşen material nokadyň hereketi hökmünde seredip bolar:

$$m\frac{d\vec{\upsilon}}{dt} = m\vec{a}_c = \sum \vec{F}_i. \tag{2.21}$$

Massalar merkezine görä hereketsiz bolan hasaplaýyş sistemasyna **inersiýa merkeziniň sistemasy** diýilýär.

III BAP. GATY JISIMIŇ HEREKETI

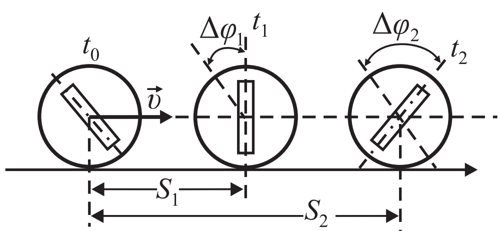
3.1. Gaty jisimiň öňe we aýlanma hereketleri

Mälim bolşy ýaly, gaty jisim özara ýerleşişlerini saklaýan material nokatlaryň toplumydyr. Gaty jisimiň hereketi iki görnüşde bolup bilýär. Bir görnüşi – öňe hereket, beýlekisi bolsa – aýlanma hereket. Öňe hereketde, gaty jisimiň her bir bölejigi, deň wagtda, deň orun üýtgedýär, ýagny olaryň tizlikleri we tizlenmeleri islendik pursatda bir meňzeşdir. Diýmek, gaty jisimiň öňe hereketini öwrenmek üçin, onuň haýsydyr bir nokadynyň (mysal üçin, inersiýa merkeziniň) hereketini anyklamak ýeterlikdir.

Gaty jisimiň aýlanma hereketi, onuň her bir nokadynyň belli bir tőwerek boýunça hereket etmeginiň netijesidir. Elbetde, şol töwerekleriň ählisiniň merkezi bir göni çyzygyň (aýlanma okunyň) üstünde ýerleşendir. Şeýlelikde, jisimiň aýlanma hereketini öwrenmek üçin, islendik pursatda onuň aýlanma okunyň giňişligindäki ýagdaýyny we şol oka görä jisimiň burç tizligini kesgitlemeli bolýar.

Eger jisimiň ähli nokatlary özara parallel tekizliklerde hereket edýän bolsa, onda aýlanma oky hem öz-özüne parallelligini saklaýar. Şeýle herekete **tekiz hereket** diýilýär. Mysal üçin, tekizlikde ýatan silindriň tigirlenmegi tekiz hereketdir.

Gaty jisimiň islendik hereketini, ýokarda agzalan esasy görnüşdäki hereketleriň goşulmagynyň netijesi hökmünde aňladyp bolýar (*3.1-nji çyzgy*). Jisimiň haýsydyr bir nokadynyň tükeniksiz kiçi dS orun üýtgetmesini ikä, ýagny "öňe" $d\vec{S}_r$ we "aýlanma" $d\vec{S}_a$ orun üýtgetmelere dargadyp bolar:



3.1-nji çyzgy

$$d\vec{S} = d\vec{S}_r + d\vec{S}_a.$$

Bu ýerde $d\vec{S}_r$ ähli nokatlar üçin bir meňzeşdir, emma $d\vec{S}_a$ bolsa dürli nokatlar üçin dürlüdir. Sebäbi, jisim şol bir $d\varphi$ burça aýlananda, her nokadyň çyzyk tizligi onuň pursatlaýyn aýlanma okundan uzaklygyna baglydyr. Şeýle hem, tükeniksiz kiçi wagtdaky orun üýtgetmäniň ululygy şol wagtdaky geçilen ýoluň uzaklygyna deňdir we ugurlary boýunça gabat gelýär. Şeýlelikde, $d\vec{S}$-i degişli wagta bölüp nokadyň tizligini taparys:

$$\vec{\upsilon} = \frac{d\vec{S}}{dt} = \frac{d\vec{S}_r}{dt} + \frac{d\vec{S}_a}{dt} = \vec{\upsilon}_0 + \vec{\upsilon}\,',$$

bu ýerde $\vec{\upsilon}_0$ – ähli nokat üçin deň bolan öňe hereketiň tizligi, $\vec{\upsilon}\,'$ – synlanýan nokadyň, aýlanma zerarly hereketiniň tizligi (ol her nokat üçin dürlüdir). Aýlanma sebäpli pursatlaýyn okdan uzaklygyna baglylykda her nokat özüne mahsus çyzyk tizlige eýe bolýar we onuň burç tizlik bilen baglanyşygy şeýle kesgitlenýär:

$$\vec{\upsilon}' = [\vec{\omega}\vec{r}]. \tag{3.1}$$

Diýmek, gaty jisimiň tekiz hereketi öwrenilende onuň islendik nokadynyň pursatlaýyn tizligini şeýle tapyp bolar:

$$\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_0 + [\vec{\omega}\vec{r}], \tag{3.2}$$

bu ýerde $\vec{r}$, ol $\vec{\upsilon}_0$ tizlik bilen hereket edýän hasaplaýyş sistema görä, şol nokadyň radius-wektory.

Belli bolşuna görä, tizligiň wagta baglylykda birinji önümine tizlenme diýilýär:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{\upsilon}}{dt} = \frac{d}{dt}[\vec{\omega}\ \vec{r}] = [\vec{\varepsilon}\ \vec{r}] + [\vec{\omega}\ \vec{\upsilon}]$$

ýa-da

$$\vec{a} = [\vec{\varepsilon}\ \vec{r}] + [\vec{\omega}[\vec{\omega}\ \vec{r}]], \tag{3.3}$$

bu ýerde $\vec{a}_\tau = [\vec{\varepsilon}\ \vec{r}]$ – alnan nokadyň tangensial tizlenmesi, $\vec{a}_n = [\vec{\omega}[\vec{\omega}\ \vec{r}]]$ – normal tizlenmesi.

3.2. Güýjüň we impulsyň momenti

Aýlanma hereketiň dinamikasy öwrenilende güýjüň, impulsyň we inersiýanyň momentleri barada düşünjeler girizilýär.

Hereketsiz O nokatdan, onuň daşyna aýlanýan we $\vec{F}$ güýç goýlan, N nokada geçirilen $\vec{r}$ radius-wektor bilen şol güýjüň wektor köpeltmek hasylyna güýjüň momenti diýilýär:

$$\vec{M} = [\vec{r}\ \vec{F}]. \tag{3.4}$$

Güýjüň momentiniň moduly:

$$M = rF\sin\alpha = Fl, \tag{3.5}$$

bu ýerde α, ol $\vec{F}$ we $\vec{r}$ wektorlaryň arasyndaky burç, $l = r\sin\alpha$ – O nokatdan güýjüň ýatan göni çyzygyna geçirilen perpendikulýaryň uzynlygy, oňa $\vec{F}$ güýjüň egni diýilýär.

Hereketsiz O nokada görä material nokadyň **impulsynyň momenti** diýip, onuň O nokada görä radius-wektorynyň hem-de impulsynyň wektor köpeltmek hasylyna aýdylýar:

$$\vec{L}_i = [\vec{r}_i m_i \vec{\upsilon}_i] = [\vec{r}_i \vec{P}_i]. \tag{3.6}$$

Eger, köp sanly material nokatlardan düzülen absolýut gaty jisim hereketsiz okuň daşynda aýlanýan bolsa, onda her bir nokat tekiz hereketdedir. Şeýle ýagdaýda egniň ululygy güýjüň goýlan nokady bilen aýlanma okunyň aradaşlygyna deňdir.

Mehaniki sistema täsir edýän ähli daşky güýçleriň, hereketsiz O nokada görä, momentleriniň geometrik jemine deň bolan wektora, daşky güýçleriň O nokada görä **baş momenti** diýilýär:

$$\vec{M}_{daş} = \sum_{i=1}^{n} [\vec{r}_i \vec{F}_i]. \tag{3.7}$$

Edil şoňa meňzeşlikde, mehaniki sistemanyň belli bir nokada ýa-da oka görä impulsynyň momenti hem, ony düzýän material nokatlaryň ählisiniň şol nokada ýa-da oka göra impulslarynyň momentleriniň geometrik jemine deňdir:

$$\vec{L} = \sum_{i=1}^{n} \vec{L}_i = \sum_{i=1}^{n} [\vec{r}_i \vec{P}_i]. \tag{3.8}$$

Eger soňky aňlatmany differensirlesek, onda

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \sum_{i=1}^{n} \frac{d}{dt}[\vec{r}_i \vec{P}_i] = \sum_{i=1}^{n} \left[\frac{d\vec{r}_i}{dt}\vec{P}_i\right] + \left[\vec{r}\,\frac{d\vec{P}}{dt}\right].$$

Emma, $\dfrac{d\vec{r}}{dt} = \vec{\upsilon}$ göz öňüne tutsak, onda

$$\left[\frac{d\vec{r}}{dt}\vec{P}_i\right] = [\vec{\upsilon} m_i \vec{\upsilon}_i] = 0, \text{ şoňa görä-de:}$$

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \sum_{i=1}^{n} \left[\vec{r}_i \frac{d\vec{P}}{dt}\right] = \sum_{i=1}^{n} ([\vec{r}_i \vec{F}_i] + [\vec{r}_i \vec{F}_{ik}]),$$

bu ýerde $\vec{F}_i$ – daşky, $\vec{F}_{ik}$ – içki güýçler.

Içki güýçleriň O nokada görä baş momenti nola deňdir, sebäbi Nýutonyň üçünji kanunyna laýyklykda material nokatlar biri-birine jübütleýin garşylykly güýç bilen täsir edýärler.

Şeýlelikde:

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \sum_{i=0}^{n} [\vec{r}_i \vec{F}_i] = \vec{M}_{daş}. \tag{3.9}$$

Bu **impulsyň momentiniň üýtgeýiş kanunydyr.**

Eger daşky güýçleriň täsiri zerarly mehaniki sistema ýa-da absolýut gaty jisim dynçlykda bolsa, onda

$$\vec{F}_{daş} = 0, \quad \vec{M}_{daş} = 0.$$

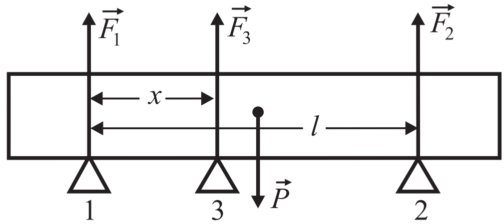
Bu deňlikler gaty jisimiň deňagramlylygynyň zerur şertleridir. Emma şeýle şertler ýerine ýetäýende-de gaty jisimiň inersiýa merkezi göni we deňölçegli hereket edip biler, jisimiň özi bolsa impulsynyň momentini saklap, aýlanyp biler.

Elbetde, absolýut gaty jisimiň ideal model hökmünde ulanylmagy kän amatlyklar döredýär. Ýöne, ähli şertlerde, hatda deformasiýa ujypsyz bolanda-da, şeýle modelden peýdalanyp bolmaz. Mysal üçin, üç diregiň üstünde ýatan absolýut gaty, birhilli pürsüň deňagramlylygyna seredeliň (*3.2-nji çyzgy*).

Goý, pürsüň massalar merkezi onuň uzynlygynyň ortasynda ýerleşen bolsun. Deňagramlylyk şertini, maýyşgak deformasiýa bolmaýan halda şeýle ýazyp bolar:

$$F_1 + F_2 + F_3 = P,$$

$$F_3 x + F_2 l = P\frac{l}{2}.$$



3.2-nji çyzgy

Görnüşi ýaly, näbellileriň sany üç (F_1, F_2, F_3), deňlemeleriň sany bolsa iki. Şeýle ýagdaýda anyk jogaplar alyp bolmaýar. Şu görnüşdäki mehaniki sistemalara **statiki kesgitsiz sistema** diýilýär.

Ýokarda görşümiz ýaly, mehaniki sistemanyň impulsynyň momenti additiw ululykdyr:

$$\vec{L} = \sum_{i=1}^{n} [\vec{r}_i m_i \vec{\upsilon}_i]. \qquad (3.10)$$

Gaty jisimi düzýän material nokatlar biri-birine görä ornuny üýtgetmeýärler. Şonuň üçin, olaryň ählisi-de şol bir burç tizlik bilen aýlanýar:

$$\omega = \frac{\upsilon_i}{r_i} \quad \text{ýa-da} \quad \vec{\upsilon}_i = [\omega_i, \vec{r}_i].$$

Şeýlelikde

$$\vec{L} = \sum_{i=1}^{n} [\vec{r}_i m_i [\vec{\omega}_i \vec{r}_i]]. \qquad (3.11)$$

Eger jisim hereketsiz okuň töwereginde aýlanýan bolsa, onda her bir nokat, oka perpendikulýar tekizlikde ýatan we merkezi ok bilen gabat gelýän töwerek çyzýandyr. Şeýle ýagdaýda radius-wektor töweregiň radiusyna deň bolar. Impulsyň momentiniň modulyny şeýle ýazyp bolar:

$$L = \sum_{i=1}^{n} m_i r_i^2 \omega = \omega \sum_{i=1}^{n} m_i r_i^2 = J\omega.$$

3.3. Inersiýa momenti

Soňky deňlikdäki $J = \sum_{i=1}^{n} m_i r_i^2$ ululyga sistemanyň (gaty jisimiň) aýlanma oka görä **inersiýa momenti** diýilýär.

Has doly manyda aýdylanda, jisimiň massasy onuň göwrüminde üznüksiz ýaýrandyr. Sebäbi material nokatlaryň göwrümleri tükeniksiz kiçi alynýar. Jisimiň her bir nokadynyň belli dykyzlygy bolýar.

Eger tutuş göwrümde, ähli nokatlardaky dykyzlyk üýtgemese, onda şeýle jisimlere birhilli jisimler diýilýär. Jisimiň ýa-da mehaniki sistemanyň bölejikleriniň massasy: $dm_i = \rho_i dV$.

Şeýlelikde

$$J = \int_{(V)} \rho_i r^2 dV$$

Birhilli jisimler üçin,

$$\rho_1 = \rho_2 = ... = \rho_n = \rho = const,$$

$$J = \rho \int_{(V)} r^2 dV. \qquad (3.12)$$

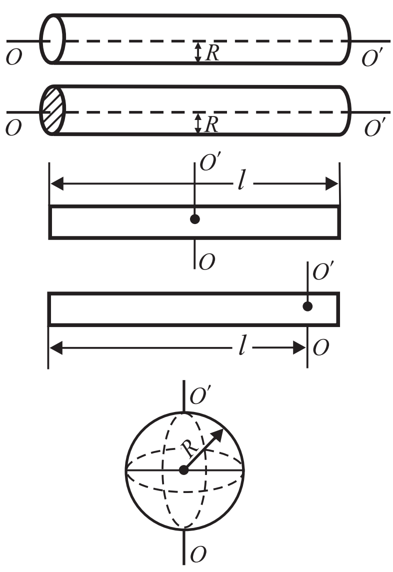
Elbetde, jisimiň inersiýa momenti aýlanma okuna görä onuň ýerleşişine, dykyzlygyna, görnüşine we möçberine baglydyr.

Aýlanma oky jisimiň inersiýa merkezinden geçýän bolsa, jisimiň hereketine inersiýa merkeziniň sistemasynda seretmek bolar. Bu iň ýönekeý ýagdaýdyr. Tötänleýin oka görä inersiýa momenti hasaplamak üçin **Şteýneriň teoremasyndan** peýdalanylýar.

Tötänleýin "*a*" oka görä jisimiň inersiýa momenti (J_a) şol oka parallel we inersiýa merkezinden geçýän, "*c*" oka görä inersiýa momenti (J_c) bilen, jisimiň massasynyň we oklaryň *d* aradaşlygynyň kwadratynyň köpeltmek hasylynyň jemine deňdir:

$$J_a = J_c + md^2. \qquad (3.13)$$

Ýönekeý simmetrik jisimleriň simmetriýa okuna görä inersiýa momentleri aşakdaky ýaly kesgitlenýär (*3.3-nji çyzgy*).



mR^2 – ýuka turba

$\frac{1}{2}mR^2$ – tutuş silindr

$\left.\begin{array}{l}\frac{1}{12}ml^2 \\ \frac{1}{3}ml^2\end{array}\right\}$ – inçe göni sterzen

$\frac{2}{5}mR^2$ – şar

3.3-nji çyzgy

3.4. Impulsyň momentiniň saklanma kanuny. Merkezi meýdandaky hereket. Kepleriň kanunlary

Belli bolşy ýaly, momentleriň deňlemesi şeýle ýazylýar:

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}_{daş}\,. \tag{3.14}$$

Eger mehaniki sistema ýapyk bolsa, onda daşky güýçleriň jemi momenti nola deň:

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}_{daş} = 0 \quad \text{ýa-da} \quad \vec{L} = const,$$

ýagny **ýapyk sistemanyň hereketsiz nokada görä impulsynyň momenti wagtyň geçmegi bilen üýtgemeýär.** Bu tassyklama **impulsyň momentiniň saklanma kanuny diýilýär.** Ýapyk däl sistemalar üçin hereketsiz aýlanma oka görä momentleriň deňlemesini ýazyp bolar:

$$\frac{d\vec{L}_z}{dt} = M_z^{daş}$$

Eger $M_z^{daş} = 0$ bolsa, onda

$$\frac{dL}{dt} = 0 \quad \text{ýa-da} \quad L_z = I\omega_z = const. \tag{3.15}$$

Ýapyk däl sistema täsir edýän ähli daşky güýçleriň gozganmaýan oka görä momentleriniň jemi nola deň bolsa, onda şol oka görä onuň impulsynyň momenti wagtyň geçmegi bilen üýtgemeýär.

Impulsyň momentiniň saklanma kanunyny giroskoplaryň, Žukowskiniň oturgyjynyň kömegi bilen tejribede barlap bolýar.

Eger giňişligiň islendik nokadynda synag material nokady ýerleşdirilende oňa belli bir güýç täsir edýän bolsa, onda şeýle giňişlige **güýçleriň meýdany** diýilýär. Eger güýjüň orun üýtgetmek üçin edýän işi diňe material nokadyň başlangyç we ahyrky ornuna bagly bolsa, onda oňa potensial ýa-da konserwatiw güýç diýilýär. Wagtyň geçmegi bilen üýtgemeýän potensial güýçleriň material nokada täsir edýän giňişligine **potensial meýdan** diýilýär. Potensial güýçleriň islendik ýapyk traýektoriýa boýunça material nokady hereketlendirmegi üçin edýän işi nola deňdir:

$$\oint_{(r)} \vec{F}\,d\vec{r} = 0.$$

Emma bu şert ýerine ýetse-de potensial diýip bolmajak güýçler hem bardyr. Olara hiç hili iş etmeýän giroskopik güýçler hem-de otrisatel iş edýän dissipatiw güýçler degişlidir.

Giňişligiň ähli nokatlarynda material nokada bir deň güýç täsir edýän bolsa oňa **birhilli meýdan** diýilýär.

Eger giňişlikde material nokada täsir edýän güýçleriň ululygy diňe käbir merkezi nokatdan uzaklyga bagly bolsa we ähli nokatlardaky güýçleriň ugry şol merkezde kesişýän bolsa, onda şeýle meýdana **merkezi meýdan** diýilýär.

Merkezi meýdan potensial meýdandyr:

$$\vec{F} = \vec{F}_r(r)\frac{\vec{r}}{r},$$

bu ýerde $\vec{r}$ – merkezi O nokatdan gönükdirilen radius-wektor. Bu güýjüň momenti:

$$\vec{M} = [\vec{r}\ \vec{F}] = \frac{F_r(r)}{r}[\vec{r}, \vec{r}] = 0.$$

Momentleriň deňlemesine laýyklykda:

$$\vec{L} = m[\vec{r}\ \vec{\upsilon}] = const. \qquad (3.16)$$

Görnüşi ýaly, $\vec{L}$ elmydama $\vec{r}$ we $\vec{\upsilon}$ wektorlaryň ýatýan tekizligine perpendikulýardyr (ortogonaldyr).

Bu bolsa material nokadyň hereketiniň tekizligini we onuň tizligini düzüjilere dargadyp bolýandygyny aňladýar:

$$\vec{L} = m[\vec{r}\ \vec{\upsilon}] = [\vec{r}\ \vec{\upsilon}_z] + m[\vec{r}\ \vec{\upsilon}_{\varphi_0}],$$

bu ýerde $\vec{\upsilon}_z$ – radius-wektora ugurdaş düzüji, $\vec{\upsilon}_{\varphi_0}$ – radius-wektora perpendikulýar düzüji.

Parallel iki wektoryň wektor köpeltmek hasyly elmydama nola deňdir. Şoňa görä-de:

$$\vec{L} = \vec{m}[\vec{r}\ \vec{\upsilon}_{\varphi_0}] \quad \text{ýa-da} \quad L = mr\upsilon_{\varphi_0} = mr^2\frac{d\varphi}{dt} = 2m\sigma,$$

bu ýerde φ – radius-wektoryň aýlanma burçy, ω_0 we r – nokadyň polýar koordinatlary, σ – sektorlaýyn tizlik.

Diýmek, $\sigma = \dfrac{L}{2m} = const.$

Material nokat merkezi güýçleriň meýdanynda hereket edende, onuň sektorlaýyn tizligi hemişelikdir.

Bu kanuny ilkinji bolup Günüň meýdanynda planetalaryň hereketini düşündirmek üçin I. Kepler (1609-njy ýylda) ulandy. Şoňa görä-de muňa **Kepleriň ikinji kanuny** diýilýär.

Kepleriň **birinji kanuny**: Gün sistemasynyň ähli planetalary elliptik orbitalar boýunça hereket edýärler we olaryň fokuslarynyň birinde Gün ýerleşendir.

IV BAP. MEHANIKI ENERGIÝA WE IŞ

4.1. Energiýa barada umumy düşünje. Mehaniki iş

Materiýanyň hereketiniň dürli görnüşleriniň we olara degişli täsirleşmeleriň ýeke-täk möçberi hökmünde fizikada **energiýa** diýip atlandyrylýan skalýar ululyk girizilendir. Hereket materiýanyň aýrylmaz häsiýetidir. Şoňa görä-de, jisimleriň we meýdanlaryň islendik sistemasynyň energiýasy bardyr. Sistemanyň energiýasy, bu sistemany, bolup biläýjek hereket öwrülişiklere görä, mukdar taýdan häsiýetlendirýär. Şeýle öwrülişikler sistemanyň öz bölekleriniň arasynda, şeýle hem sistema bilen daşky sredanyň arasynda täsirleşmeler zerarly bolup geçýär. Hereketiň dürli görnüşleri we olara degişli täsirleşmeler üçin fizikada dürli kysymly energiýalara, ýagny mehaniki, içki, elektromagnit, ýadro we beýleki energiýalara seredilýär. Häzirlikçe mehaniki hereketi we seredilýän sistemanyň öz içinde hem-de daşky jisimler bilen täsirleşmegini häsiýetlendirýän mehaniki energiýa seredeliň. Mehaniki täsirleşmeleriň möçberi hökmünde degişli güýçler alynýar. Şonuň üçin-de, mehaniki energiýanyň üýtgemegi barada gürrüň gozgalanda, onuň diňe goýlan güýjüň täsiri zerarly üýtgeýändigini göz öňünde tutarys. Mehaniki energiýanyň üýtgemeginiň möçberini görkezmek üçin **güýjüň işi** baradaky düşünje girizilýär.

Käbir material nokady tükeniksiz kiçi dr aralyga süýşirmek üçin F güýjüň δA işi hökmünde, $\vec{F}$ we $d\vec{r}$ wektorlaryň skalýar köpeltmek hasylyna deň ululyk alynýar:

$$\delta A = \vec{F}d\vec{r} = \vec{F}\vec{\upsilon}dt, \tag{4.1}$$

bu ýerde $\vec{r}$ we $\vec{\upsilon} = \dfrac{d\vec{r}}{dt}$ degişlilikde nokadyň radius-wektory we tizligi.

Bahalaryny ýerine goýup alarys

$$\delta A = \vec{F}\,|d\vec{r}\,|\cos\alpha = Fds\cos\alpha = F_\tau ds, \tag{4.2}$$

bu ýerde α, ol $\vec{F}$ hem-de $d\vec{r}$ wektorlaryň arasyndaky burç, $\vec{F_\tau}$, bu $\vec{F}$ güýjüň $d\vec{r}$ (ýa-da $\vec{\upsilon}$) wektoryň ugruna proýeksiýasy.

Material nokat hereketsiz bolsa ýa-da α burçy $\pm\pi/2$ bolsa, goýlan güýç iş etmeýär ($\delta A = 0$). Eger $0 < \alpha < \pi/2$, ýagny $F_\tau > 0$ bolsa, onda güýje **iteriji güýç** diýilýär.

Eger α burç kütek, ýagny $F_\tau < 0$, bolsa, onda güýje **bökdeýji güýç** diýilýär (mysal üçin, sürtülme güýji).

Gönüburçly koordinatlar sistemasynda

$$\vec{F} = F_x\vec{l}_x + F_y\vec{l}_y + F_z\vec{l}_z \quad \text{we} \quad d\vec{r} = dx\vec{l}_x + dy\vec{l}_y + dz\vec{l}_z$$

deňlikleri göz öňünde tutup hem-de wektorlaryň skalýar köpeldiliş düzgünine esaslanyp, (4.1) deňlemäni şeýle ýazyp bolýar:

$$\delta A = F_x dx + F_y dy + F_z dz,$$

bu ýerde x, y, z – güýç goýlan nokadyň koordinatlary, F_x, F_y, F_z, olar $\vec{F}$ güýjüň koordinatlar oklaryna proýeksiýalary.

Işiň ölçeg birligi: joul (J) $[L^2MT^{-2}]$.

4.2. Kinetik energiýa

Mehanikada iki kysymly mehaniki energiýa seljerilýär. Olar kinetik we potensial energiýalardyr.

Mehaniki sistemanyň mehaniki hereketiniň energiýasyna kinetik energiýa diýilýär. Kinetik energiýanyň üýtgemesi güýjüň täsiri zerarly bolup geçýär we şol güýjüň edýän işine deňdir:

$$dE_k = \vec{F}d\vec{r} = \vec{F}\vec{\upsilon}dt. \tag{4.3}$$

Mehaniki sistemanyň impulsynyň üýtgeýşinden mälim bolşuna görä:

$$\vec{F}dt = d\vec{P}. \tag{4.4}$$

Şoňa görä-de

$$dE_k = \vec{\upsilon}d\vec{P} = \frac{1}{m}\vec{P}d\vec{P}, \quad \text{sebäbi} \quad \vec{P} = m\vec{\upsilon}; \quad \vec{\upsilon} = \frac{\vec{P}}{m}.$$

Wektor algebrasynyň düzgünlerine laýyklykda

$$\vec{P}dP = \frac{1}{2}d(\vec{P}\,\vec{P}) = \frac{1}{2}d(P^2) = PdP, \qquad dE_k = \frac{PdP}{m} = \frac{1}{2m}d(P^2).$$

Nýutonyň mehanikasynda material nokadyň massasy onuň tizligine we impulsyna bagly däldir. Ýokarky formulada $P = m\upsilon = 0$ bolsa, $E_k = 0$ bolýandygyna esaslanyp, formulany integrirläp alarys:

$$E_k = \frac{P^2}{2m} = \frac{m\upsilon^2}{2}. \tag{4.5}$$

Mehaniki sistemanyň kinetik energiýasy ony düzýän bölejikleriň kinetik energiýalarynyň jemine deňdir:

$$E_k = \sum_{i=1}^{n} \frac{m_i \upsilon_i^2}{2}. \tag{4.6}$$

Kinetik energiýa additiw ululykdyr. Sistemanyň kinetik energiýasy oňa girýän material nokatlaryň massalarynyň we tizlikleriniň bahalary bilen doly kesgitlenýär. Başgaça aýdylanda, sistemanyň kinetik energiýasy onuň mehaniki hereketiniň hal funksiýasydyr.

Inersial sistema görä gaty jisimiň hereketi öwrenilende, massa merkeziniň sistemasy baradaky aýdylanlara daýanyp, onuň kinetik energiýasyny şeýle aňladyp bolýar:

$$E_k = E_k' + \frac{m\upsilon_c^2}{2},$$

bu ýerde υ_c – inersiýa merkeziniň tizligi, E_k' – jisimiň ähli material nokatlarynyň inersiýa merkezine görä kinetik energiýasy.

Şeýlelikde

$$E_k' = \sum \frac{m_i(\upsilon_i')^2}{2} = \sum \frac{m_i(r_i')^2}{2}\omega^2 = \frac{J\omega^2}{2},$$

bu ýerde $J = \sum m_i (r_i')^2$ – massalar merkezine görä jisimiň inersiýa momenti.

Eger gaty jisimiň massalar merkezi öňe, galan nokatlary bolsa onuň daşynda aýlanma hereket edýän bolsa, onda jisimiň kinetik energiýasyny aşakdaky görnüşde ýazyp bolar:

$$E_k = E_{k.ayl} + E_{k.öň} = \frac{J\omega^2}{2} + \frac{m\upsilon^2}{2}. \tag{4.7}$$

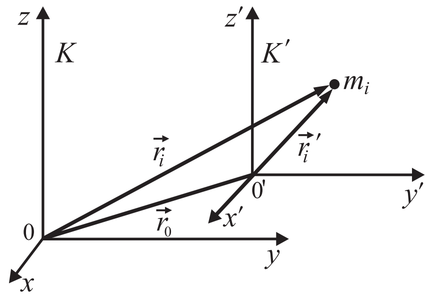
Energiýanyň ölçeg birligi: joul (J) $[L^2MT^{-2}]$.

Dürli hasaplama sistemalaryna görä kinetik energiýalaryň arabaglanyşygyny tapmak üçin iki sistema seredeliň. Goý, K inersial sistema görä K' sistema $\vec{u}$ tizlik bilen hereket edýär diýeliň (*4.1-nji çyzgy*).

$$\vec{r}_i = \vec{r}_i{}' + \vec{r}_0$$

Eger K' sistema görä bölejigiň tizligi $\vec{\upsilon}_i{}'$ bolsa, onda

$$\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_i{}' + \frac{d\vec{r}_0}{dt} = \vec{\upsilon}_i{}' + \vec{u};$$



4.1-nji çyzgy

$$\vec{\upsilon^2} = \left(\vec{\upsilon}_i{}' + \vec{u}\right)^2 = \left(\vec{\upsilon}_i{}'\right)^2 + 2\vec{u}\,\vec{\upsilon}_i{}' + \vec{u^2};$$

$$E_k = \sum_{i=1}^{n} \frac{m_i\left(\upsilon_i'\right)^2}{2} + u\sum_{i=1}^{n} m_i\,\upsilon_i' + \frac{u^2}{2}\sum_{i=2}^{n} m_i$$

ýa-da

$$E_k = E_k' + u\vec{P}' + \frac{mu^2}{2},$$

bu ýerde $\vec{P}' = \sum_{i=1}^{n} m_i\,\upsilon_i'$ we $E_k' = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n} m_i\,\upsilon_i'^{\,2}$, degişlilikde gözegçilikdäki jisimiň K' sistema görä ölçelen impulsynyň we kinetik energiýasynyň bahalary.

Mehaniki sistemanyň düzümindäki mikrobölejikleriň tertipsiz hereketleriniň we özara täsirleriniň energiýasyna **içki energiýa** diýilýär. Görnüşi ýaly, sistemanyň bütewilikde hereketiniň kinetik energiýasyna içki energiýa degişli däldir.

Mehanikada duş gelýän güýçler **konserwatiw** we **konserwatiw däl** güýçlere bölünýärler. Eger **täsir güýçleri sistemanyň material nokatlarynyň diňe ýerleşişine (konfigurasiýasyna) bagly bolsa we olaryň sistemany käbir başlangyç orundan başga bir ahyrky orna geçirende edýän işi geçiş ýoluna bagly däl bolsa, onda şol güýçlere konserwatiw güýçler diýilýär.** Şeýle meýdana bolsa **potensial** meýdan diýilýär. Şol şertlere gabat gelmeýän beýleki güýçleriň hemmesine konserwatiw däl güýçler diýilýär.

Konserwatiw güýçleriň islendik ýapyk traýektoriýa (ýol) boýunça edýän işi nola deňdir. Konserwatiw däl güýçlere, ylaýta-da, **dissipatiw (pytradyjy)** güýçler degişlidir. Mysal üçin, jisimiň energiýasyny sredada pytradýan sürtülme güýji dissipatiw güýje degişlidir. **Dissipatiw güýçleriň doly işi elmydama otrisateldir.** Konserwatiw güýçlere hereketiň ugruna perpendikulýar ugurda täsir edýän güýçler hem degişlidir. Olar material nokadyň tizligine baglydyr, emma elmydama tizlige perpendikulýar täsir edýändigine görä, iş etmeýär. Muňa Lorensiň güýji-de mysal bolup bilýär.

Güýjüň wagt birliginde edýän işini häsiýetlendirmek üçin, mehanikada **kuwwat** düşünjesi girizilýär. **Tükeniksiz kiçi wagtda $\vec{F}$ güýjüň edýän δA işiniň şol wagtyň *dt* dowamlylygyna bolan gatnaşygyna güýjüň N kuwwaty diýilýär:**

$$N = \frac{\delta A}{dt} = \vec{F}\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{F}\vec{\upsilon}.$$

Diýmek, güýjüň kuwwaty şol güýjüň tizlige skalýar köpeltmek hasylyna deňdir. Elbetde, mehanikanyň otnositellik prinsipine laýyklykda, güýjüň işi we kuwwat hasaplaýyş sistemasynyň saýlanyp alnyşyna baglydyr.

Kuwwatyň ölçeg birligi: watt (*Wt*) [L^2MT^3].

4.3. Potensial energiýa. Mehanikada energiýanyň saklanma kanuny

Ýokarda belläp geçişimiz ýaly, material nokada goýlan güýjüň işi diňe nokadyň başlangyç we ahyrky orunlaryna bagly bolsa, oňa **konserwatiw** güýç diýilýär. Giňişligiň her bir nokadyna degişli material nokat başga nokada geçende iş edilýär we şol iş material nokadyň nähili ýol bilen geçenine bagly däldir. Diýmek, mehaniki sistemanyň düzümindäki material nokatlar ýa-da tutuş bölekler biri-birine görä ýerleşişlerini (konfigurasiýasyny) üýtgetseler iş ediler. Bilşimiz ýaly, iş energiýanyň üýtgeme ululygyna deňdir. Güýçleriň potensial meýdanynda ýerleşen mehaniki sistemanyň giňişlikde ýerleşişini häsiýetlendirýän funksiýa barada düşünje girizmek bolar. Şol funksiýa **potensial energiýa** diýilýär. Meýdanyň her bir nokadyndaky güýç wagta görä üýtgemese, onda meýdana stasionar (durnukly) diýilýär. Stasionar meýdanda orun üýtgetmede edilen işi şeýle aňladyp bolar:

$$\delta A = -dE_p(x, y, z).$$

Ýönekeý model hökmünde material nokadyň potensial güýjüň täsiri bilen tükeniksiz kiçi orun üýtgetmesine seredip bileris. Şol güýjüň işi şeýle tapylýar:

$$\delta A = \vec{F}d\vec{r} = -\left[\frac{\partial E_p}{\partial x}dx + \frac{\partial E_p}{\partial y}dy + \frac{\partial E_p}{\partial z}dz\right].$$

Güýçleriň düzüjilere dargadylyşyny göz öňünde tutsak, onda

$$F_x\,dx + F_y\,dy + F_z\,dz = -\left[\frac{\partial E_p}{\partial x}dx + \frac{\partial E_p}{\partial y}dy + \frac{\partial E_p}{\partial z}dz\right].$$

Deňligiň iki taraplaryny, degişlilikde deňeşdirip alarys:

$$F_x = -\frac{\partial E_p}{\partial x}; \quad F_y = -\frac{\partial E_p}{\partial y}; \quad F_z = -\frac{\partial E_p}{\partial z}.$$

Şeýlelikde, material nokadyň potensial energiýasy bilen täsirleşýän meýdanyň potensial güýjüni baglaşdyrýan aňlatmany alarys:

$$F = -\left[\frac{\partial E_p}{\partial x}\vec{i}_x + \frac{\partial E_p}{\partial y}\vec{i}_y + \frac{\partial E_p}{\partial z}\vec{i}_z\right]$$

ýa-da

$$F = -\mathrm{grad}E_p; \quad \vec{F} = -\vec{\nabla}E_p, \tag{4.8}$$

bu ýerde $\vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial x}\vec{i}_x + \frac{\partial}{\partial y}\vec{i}_y + \frac{\partial}{\partial z}\vec{i}_z$ – nabla operatory ýa-da oňa Gamiltonyň operatory hem diýilýär.

Skalýar funksiýanyň gradiýenti, şol funksiýanyň giňişlikde haýsy ugra has depginli we nähili depginde üýtgeýändigini görkezýär.

Material nokadyň grawitasion meýdany ýa-da nokatlanç zarýadyň elektrostatik meýdany **merkezi güýçleriň meýdanyna** mysal bolup biler.

Bütindünýä dartyşma kanunyna laýyklykda Ýeriň töweregindäki jisime:

$$F_r(r) = -G\frac{Mm}{r^2}$$

güýç täsir edýär. Bu ýerde $G = 6,67 \cdot 10^{-11}\,\frac{N \cdot m^2}{kg^2}$ – grawitasiýa hemişeligi, r – Ýeriň merkezinden beýleki jisimiň merkezine çenli aralyk. M – Ýeriň massasy, m – jisimiň massasy.

Jisimiň Ýeriň meýdanyndaky potensial energiýasy:

$$E_p(r) = -\int_{\infty}^{r} F_r(r)dr = -\int_{\infty}^{r} G\frac{Mm}{r^2}dr = -GMm\int_{\infty}^{r}\frac{dr}{r^2},$$

$$E_p(r) = -G\frac{Mm}{r}. \tag{4.9}$$

Mehaniki sistema täsir edýän ähli içki we daşky potensial däl güýçler iş etmeýän bolsa ($\delta A_{p.d} = 0$) hem-de daşky potensial güýçler stasionar bolsa, onda şol sistema konserwatiw diýilýär. Şeýle ýagdaýda potensial energiýa wagtyň geçmegi bilen üýtgemez, ýagny onuň wagta görä önümi nola deň bolar:

$$\frac{dE_p}{dt} = 0.$$

Konserwatiw sistemanyň potensial energiýasy wagtyň geçmegi bilen üýtgemeýär. Muňa **mehaniki energiýanyň saklanma kanuny** diýilýär.

Ýapyk sistemalar üçin bu kanuny şeýle aýdyp bolar: **Eger ýapyk sistemanyň içki güýçleri potensial bolsa ýa-da iş etmeýän bolsa, onda onuň mehaniki energiýasy üýtgemeýär.** Dynçlykdaky sürtülme güýçleri hem-de giroskopik güýçler iş etmeýärler we sistemanyň mehaniki energiýasyny üýtgetmeýärler.

Bu kanun deňagramlyk şertlerini aýdyňlaşdyrmaga-da ýardam edýär. **Mehaniki deňagramlyk haly** diýilip, sistemanyň diňe daşky güýçleriň täsiri zerarly üýtgäp biljek halyna aýdylýar.

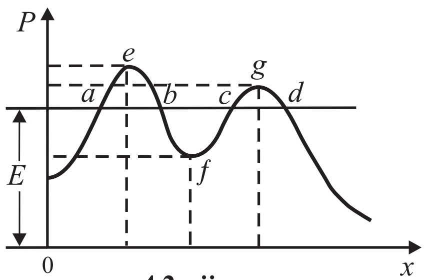
Eger tükeniksiz kiçi daşky täsir sistemanyň halyny sähelçe üýtgedýän bolsa, üstesine-de sistemada ony deňagramlylyk halyna dolandyrmaga çalyşýan güýçler döreýän bolsa, onda şeýle deňagramlyga **durnukly deňagramlylyk** diýilýär.

Eger tükeniksiz kiçi täsir-de sistemany deňagramlylyk halyndan çykaryp bilýän bolsa we sistema oňa dolanyp gelmeýän bolsa, onda şeýle deňagramlyga **dur-**

nuksyz deňramlylyk diýilýär. Bu ýagdaýda, sistemanyň halyny deňagramlykdan has-da uzaklaşdyrýan güýçler döreýär. Mehaniki energiýanyň saklanma kanunyna laýyklykda, durnukly deňagramlyga potensial energiýanyň iň kiçi (minimal) bahalary, durnuksyz deňagramlyga iň uly (maksimal) bahalary degişlidir (*4.2-nji çyzgy*).

Doly mehaniki energiýa kinetik we potensial energiýalaryň jemine deňdir:

$$E = E_k + E_p. \tag{4.10}$$



4.2-nji çyzgy

Eger kinetik energiýanyň otrisatel bolup bilmeýändigini bellesek, onda sistema berlen bahadaky doly energiýasy barka, diňe $E_p \le E$ hallarda bolup biler.

Eger potensial energiýa x okunyň boýuna çyzgydaky ýaly üýtgeýän bolsa (*4.2-nji çyzgy*), onda sistemanyň eýeläp biläýjek hallary a nokatdan çepde, d nokatdan sagda we b, c nokatlaryň arasynda ýerleşer. Eger material nokat b we c nokatlaryň arasynda bolsa, ol şondan çykyp bilmez, ýagny potensial çukurda ýerleşendir. Potensial çukuryň iki tarapyny bolsa e we g nokatlara degişli bökdenç-potensial päsgelçilik gurşap alandyr.

Real şertlerde mehaniki sistema sürtülme we garşylyk görkeziji dissipatiw güýçler täsir edýärler. Umuman aýdylanda, daşky potensial güýçler hem stasionar däldir. Şoňa görä-de, konserwatiw sistemalar barada diňe amatly model hökmünde ýa-da käbir takmynlyk bilen gürrüň etmelidir.

XIX asyryň ortalarynda Ý. Maýer, J. Joul, we G. Gelmgols energiýanyň ähli özgeriş we alyşyk prosesleriniň-de, energiýanyň saklanma we öwrülme kanunyna boýun egýändigini aýdyňlaşdyrdylar.

Sistemanyň energiýasynyň bir görnüşden başga görnüşe geçmegi sebäpli, onuň bölekleriniň arasynda başgaça paýlanmagy mümkin. Emma islendik prosesde sistemanyň doly energiýasynyň üýtgemesi elmydama diňe daşyndan alnan energiýa deňdir.

Energiýanyň saklanma we öwrülme kanuny diňe bir umumy fiziki kanun bolman, eýsem tebigatyň iň wajyp kanunlaryndan biridir. Bu kanun çuňňur filosofik mana eýedir we hereketiň materiýanyň aýrylmaz häsiýetidigi, ony döredip ýa-da ýok edilip bolmaýandygy, diňe bir görnüşden başgasyna geçýändigi baradaky esasy kanunlaryň birini görnetin tassyklaýar.

Impulsyň saklanma kanunynyň giňişligiň birhilliligi bilen, impulsyň momentiniň saklanma kanunynyň bolsa giňişligiň izotroplygy bilen bagly bolşy ýaly, energiýanyň saklanma kanuny-da **wagtyň birhilliligi** bilen baglydyr. Wagtyň birhilliliginden ýapyk sistemanyň hereket kanunlarynyň wagt hasabynyň başlangyjyny nähili saýlap alnyşyna bagly däldigi ýüze çykýar.

Giňişligiň simmetriýa häsiýetlerine kybapdaş, wagt hem simmetriýa häsiýete eýedir. Nýutonyň mehanikasynda wagtyň üýtgeýiş (ösüş ýa-da kemeliş) ugruna görä hereket kanunlary simmetriýany saklaýar, ýagny mehanikanyň deňlemeleri, üýtgeýän t wagt t' wagta çalşylanda inwariantlygyny saklaýar.

Deňlemeleriň simmetriýasy mehaniki prosesleriň dolanyşyklydygyna şaýatlyk edýär. Eger mehaniki sistema haýsydyr bir hereket edýän bolsa, onda şol güýçleriň täsiri bilen gapma – garşylykly hereket edip, şol bir aralyk konfigurasiýalary ters tertipde-de geçip biler.

V BAP. OTNOSITELLIGIŇ ÝÖRITE TEORIÝASY BARADA DÜŞÜNJELER

5.1. Otnositelligiň ýörite teoriýasynyň postulatlary

Ozal belläp geçişimiz ýaly, hereket ähli inersial sistemalarda birmeňzeş kanunlar boýunça öwrenilýär. Olardan haýsy-da bolsa birini absolýut sistema diýip saýlap bolmaz. Emma, şeýle-de bolsa, şol bir hadysa ýa-da hereket dürli inersial sistemalara görä öwrenilende, olary özara deňeşdirmegiň usulyny tapmak zerurlygy döreýär. Elektromagnit tolkunlarynyň çäkli tizlik bilen ýaýraýandygy subut edilensoň şeýle talaplar has-da artdy. 1905-nji ýylda özüniň “Hereketlenýän jisimleriň elektrodinamikasyna degişli” atly işinde A. Eýnşteýn otnositelligiň ýörite teoriýasynyň düýbüni tutdy. Bu teoriýada Nýutonyň mehanikasyna meňzeşlikde, wagt birhillidir, giňişlik bolsa, hem birhillidir, hem izotropdyr diýip nygtalýar. Ol Eýnşteýniň iki postulatyna esaslanýar.

Birinji postulat Galileýiň mehaniki otnositellik prinsipini ähli fiziki prosesler üçin jemleýär we Eýnşteýniň **relýatiwistik otnositellik prinsipi** diýip atlandyrylýar:

Islendik inersial sistemada şol bir şertlerde ähli fiziki hadysalar birmeňzeş bolup geçýär.

Fiziki kanunlar inersial hasaplaýyş sistemasynyň saýlanyp alnyşyna bagly däldir, olary aňladýan deňlemeler bolsa, ähli inersial hasaplaýyş sistemalarda birmeňzeşdir. **Ýapyk sistemada, hiç bir fiziki tejribe arkaly şol sistemanyň haýsydyr bir inersial sistema görä dynçlykdadygyny ýa-da deňölçegli we gönüçyzykly hereketdedigini saýgaryp bolmaz.** Diýmek, ähli inersial hasaplaýyş sistemalar deňdirler. Olaryň hiç biriniň başgalardan hil artykmaçlygy ýokdur we hiç birini baş hasap sistemasy diýip tapawutlandyryp bolmaz.

Ikinji postulat ýagtylygyň tizliginiň inwariantlyk prinsipini aňladýar.

Ýagtylygyň wakuumdaky tizligi ýagtylyk çeşmesiniň hereketine bagly däldir we ähli inersial sistemalarda hem-de ähli ugurlar boýunça şol bir baha eýedir.

Tejribeleriň görkezişine laýyklykda, ýagtylygyň wakuumdaky c tizligi tebigatda iň ýokary tizlikdir we hiç bir zadyň tizligi ondan ýokary bolup bilmez.

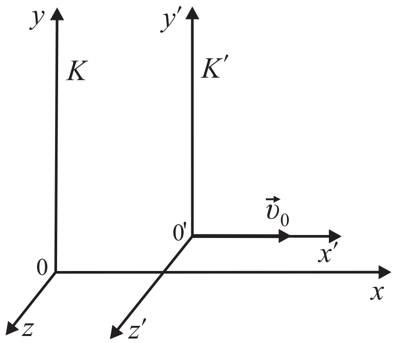
Bu postulatlar Nýutonyň mehanikasynda berk orun tutan wagtyň hem-de giňişligiň ähli inersial sistemalarda bir meňzeşdigi, ýagny olaryň absolýutdygy baradaky düşünjelere gabat gelmeýär.

5.2. Lorensiň özgertmeleri we ondan gelip çykýan netijeler

Bir inersial sistemadan beýlekä geçilende hereket deňlemelerini almak üçin Lorensiň özgertmelerinden peýdalanylýar.

Meseläni ýönekeýleşdirmek üçin, degişli oklary ugurdaş bolan K we K' inersial ortogonal hasaplaýyş sistemalara seredeliň. Goý, K' sistema K sistema görä x okunyň ugruna $\vec{\upsilon}_0$ tizlik bilen hereket edýän bolsun (*5.1-nji çyzgy*).

Mundan başga-da, koordinatalar başlangyçlary O we O' bir-biriniň üstüne düşen pursaty iki sistemada-da wagtyň hasaplaýyş başlangyjy, ýagny $t = 0$; $t' = 0$ diýip alalyň. Şeýle ýagdaýda, koordinatalaryň we wagtyň iki sistema üçin baglanşygyny aşakdaky görnüşde ýazyp bolar:



5.1-nji çyzgy

$$x' = \frac{x - \upsilon_0 t}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon_0^2}{c^2}}} \qquad x = \frac{x' + \upsilon_0 t'}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon_0^2}{c^2}}}$$

$$y' = y \qquad y = y'$$

$$z' = z \qquad z = z'$$

$$t' = \frac{t - \frac{\upsilon_0 x}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon_0^2}{c^2}}} \qquad t = \frac{t' + \frac{\upsilon_0 x'}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon_0^2}{c^2}}}. \tag{5.1}$$

Tükeniksiz kiçi orun üýtgemäniň moduly koordinatalaryň üýtgemesi arkaly tapylyp bilner:

$$|dr|^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2.$$

Goý, wakuumda ýagtylyk ýaýraýar diýeliň. Onda c tizligiň inwariantlygyny nazara alyp, her sistema degişli öz deňligini alarys:

$$x^2 + y^2 + z^2 = c^2t^2 \qquad x'^2 + y'^2 + z'^2 = c^2t'^2$$

ýa-da

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2 = x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2t'^2 = in\upsilon.$$

Islendik iki inersial sistemanyň biri-birine görä tizligi ýagtylygyň wakuumdaky tizliginden ýokary bolup bilmez.

Uzynlyk möçberleriniň otnositelligini öwrenmek üçin mysal hökmünde x okuna ugurdaş göni sterženiň uzynlygyna seredeliň:

$$l = x_2(t) - x_1(t) = (x_2' - x_1')\sqrt{1 - \frac{\upsilon_0^2}{c^2}} = l_0\sqrt{1 - \frac{\upsilon_0^2}{c^2}}, \tag{5.2}$$

bu ýerde l_0, ol K' hasaplaýyş sistemasyna görä dynçlykdaky sterženiň uzynlygy. Steržen $O'x'$ okuň ugry boýunça ýerleşende $l_0 = x_2' - x_1'$ bolar. x_2' we x_1' – sterženiň uçlarynyň koordinatalary. l, bu K hasaplaýyş sistemasyna görä sterženiň uzynlygy.

Sterženiň beýleki ölçegleri üýtgemeýär:

$$y_2 - y_1 = y_2' - y_1'; \quad z_2 - z_1 = z_2' - z_1'.$$

Görnüşi ýaly, jisimiň çyzyklaýyn ölçegleri otnositel ululykdyr. Ol dynçlykda duran sistemada iň uly baha eýedir. Jisimiň bu ölçeglerine onuň hususy ölçegleri diýilýär.

Dürli hasaplaýyş sistemalarynda hadysalaryň dowamlylygyna seredeliň. Goý, K' hasaplaýyş sistemasynda şol bir nokatda geçýän iki hadysanyň arasyndaky wagt interwaly $\tau_0 = t_2' - t_1'$ bolsun. K hasaplaýyş sistemasyna görä iki hadysanyň arasyndaky wagt interwaly aşakdaky deňlik bilen kesgitlenýär:

$$\tau = t_2 - t_1 = \frac{t_2' - t_1'}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon_0^2}{c^2}}} = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon_0^2}{c^2}}}, \tag{5.3}$$

bu ýerde τ_0 – hususy wagt.

Görnüşi ýaly, giňişligiň käbir nokadynda bolup geçýän hadysanyň dowamlylygy, şol nokat haýsy inersial sistema görä hereketsiz bolsa, şoňa görä-de iň kiçi hususy bahasyna eýedir. **Başga ähli hereketli inersial sistemalara görä, nokadyň tizligine baglylykda hadysanyň dowamlylygy artýar.** Muňa wagtyň haýallamagynyň relýatiwistik effekti diýilýär.

Hadysalaryň birwagtlaýynlygyny öwrenmek üçin şeýle mysala ýüzleneliň. Goý, K sistemanyň x_1 we x_2 koordinataly nokatlarynda t_1 we t_2 pursatlarda iki hadysa bolup geçýär diýeliň. Onda K' sistemada olara x_1' we x_2' koordinatlar hem-de t_1' we t_2' pursatlar degişli bolar. Eger hadysalar bir nokatda ($x_1 = x_2$) we birwagtda ($t_1 = t_2$) bolup geçýän bolsa, onda Lorensiň özgerdişlerine görä:

$$x_1' = x_2'; \quad t_1' = t_2'.$$

Şeýle hadysalar islendik inersial sistema görä birwagtlaýyndyr we giňişlikde şol bir orny eýeleýändir.

Eger K sistemada hadysalar dürli nokatlarda ($x_1 \neq x_2$), emma şol bir wagtda ($t_1 = t_2$) bolup geçseler, onda bu ýagdaýa aşakdaky gatnaşyklar degişlidir:

$$x_1' = \frac{x_1 - \upsilon_0 t}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon_0^2}{c^2}}}, \quad x_2' = \frac{x_2 - \upsilon_0 t}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon_0^2}{c^2}}}.$$

$$t_1' = \frac{t - \frac{\upsilon_0 x_1}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon_0^2}{c^2}}}, \quad t_2' = \frac{t - \frac{\upsilon_0 x_2}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon_0^2}{c^2}}}. \tag{5.4}$$

Görnüşi ýaly

$$x_1' \neq x_2'; \quad t_1' \neq t_2'.$$

Hadysalar K' sistema görä, diňe giňişligiň dürli nokatlaryndadygy bilen çäklenmän, eýsem birwagtlaýyn hem däldirler.

Şeýlelikde, bir inersial hasaplaýyş sistemasyndaky hadysalaryň birwagtlylygy olaryň başga inersial hasaplaýyş sistemalara görä-de birwagtlaýyndygyny aňlatmaýar. Emma hadysalaryň biri beýlekisine sebäp bolanda, hiç bir sistemada sebäp netijeden yza galmaýar.

5.3. Tizlikleriň goşulyşy we özgerdilişi

Tizlikleriň goşulyşyny relýatiwistik mehanikanyň kanunlarynyň esasynda öwrenmek maksady bilen aşakdaky mysala garalyň.

Goý, K we K' inersial sistemalar x okuň ugruna biri-birine görä υ tizlik bilen hereket edýän bolsun. K sistemada material nokadyň orny t pursatda x, y, z koordinatalary bilen, K' sistemada bolsa t' pursatda x', y', z' koordinatalar bilen kesgitlenýän bolsun. Material nokadyň K we K' sistemalara görä tizliklerini şeýle tapyp bileris:

$$U_x = \frac{dx}{dt}, \quad U_y = \frac{dy}{dt}, \quad U_z = \frac{dz}{dt} \text{ we}$$

$$U'_x = \frac{dx'}{dt'}, \quad U'_y = \frac{dy'}{dt'}, \quad U'_z = \frac{dz'}{dt'}.$$

Lorensiň özgerdişlerinden differensirlemek arkaly alarys:

$$dx = \frac{dx' + \upsilon dt'}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}}; \quad dy = dy'; \quad dz = dz'; \quad dt = \frac{dt' - \frac{\upsilon dx'}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}}.$$

Şu aňlatmalardan peýdalanyp, **tizlikleriň goşulyşynyň relýatiwistik kanunyny** aşakdaky görnüşde ýazyp bileris:

$$K' \Rightarrow K \qquad\qquad K \Rightarrow K'$$

$$U_x = \frac{U'_x + \upsilon}{1 + \frac{\upsilon U'_x}{c^2}}, \qquad U'_x = \frac{U_x - \upsilon}{1 - \frac{\upsilon U_x}{c^2}},$$

$$U_y = \frac{U'_y\sqrt{1-\beta^2}}{1 + \frac{\upsilon U'_x}{c^2}}, \qquad U'_y = \frac{U_y\sqrt{1-\beta^2}}{1 - \frac{\upsilon U_x}{c^2}},$$

$$U_z = \frac{U'_z\sqrt{1-\beta^2}}{1 + \frac{\upsilon U'_x}{c^2}}, \qquad U'_z = \frac{U_z\sqrt{1-\beta^2}}{1 - \frac{\upsilon U_x}{c^2}}.$$

Bu ýerde $\beta = \frac{\upsilon}{c}$.

Material nokat x oka parallel hereket edýän bolsa, onda onuň K sistema görä tizligi U_x gabat gelýär.

$$U = \frac{U' + \upsilon}{1 + \frac{\upsilon U'}{c^2}}, \qquad U' = \frac{U - \upsilon}{1 - \frac{\upsilon U}{c^2}}. \tag{5.5}$$

Eger υ, U' we U ýagtylygyň tizligine görä has kiçi bolsa, onda bu formulalar klassyky mehanikanyň kanunlaryna geçýär.

Tizlikleriň goşulyşynyň relýatiwistik kanuny Eýnşteýniň ikinji postulatyna tabynlykdadyr. Eger $U' = c$ bolsa, onda

$$U = \frac{c + \upsilon}{1 + \frac{c\upsilon}{c^2}} = c,$$

şeýle hem $U = c$ bolsa, onda

$$U' = \frac{c - \upsilon}{1 - \frac{c\upsilon}{c^2}} = c.$$

Goşulýan tizlikler ýagtylygyň tizligine her näçe golaý bolsa-da olaryň jemi tizligi ýagtylygyň tizliginden kiçidir.

5.4. Relaýatiwistik impuls

Otnositellik prinsipine görä, fizikanyň kanunlary ähli inersial hasaplaýyş sistemalarynda birhilli bolmalydyr. K' sistemada haýsy-da bolsa bir hadysany aňladýan deňlemäni, şol hadysany K sistemada aňladýan deňlemeden, degişli koordinatalary we wagty çalyşmak arkaly alyp bolýar. Bu şerte, Lorensiň özgerdişlerine görä, fiziki kanunlaryň deňlemeleriniň inwariantlyk şerti ýa-da gysgaça, Lorens – inwariantlyk şerti diýilýär.

Nýutonyň mehanikasynda material nokadyň dinamikasynyň esasy kanuny şeýle görnüşe eýedir:

$$m\frac{d\vec{\upsilon}}{dt} = \frac{d}{dt}(m\vec{\upsilon}) = \vec{F}.$$

Emma bu ýerde nokadyň massasy m ähli inersial hasaplaýyş sistemalarynda hemişelik ululyk diýip kabul edilýär.

XIX asyryň ahyrlarynda uly tizlikli elektronlar bilen geçirilen tejribelerde jisimiň massasynyň onuň tizligine baglydygy belli edildi. Otnositelligiň ýörite teoriýasynda bu baglanyşyk aşakdaky görnüşde aňladylýar:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}}.$$

Bu ýerde m_0 – jisimiň dynçlykda bolan inersial sistema görä ölçelen massasy, oňa **dynçlyk massa** diýilýär. m – hereketlenýän jisimiň massasy, oňa **relýatiwistik massa** diýilýär.

Şeýlelikde, relýatiwistik dinamikanyň esasy deňlemesi aşakdaky görnüşe eýe bolar:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}}\vec{\upsilon}\right)=\vec{F} \quad \text{ýa-da} \quad \frac{d\vec{P}}{dt}=\vec{F}, \tag{5.6}$$

bu ýerde $\vec{P}=m\vec{\upsilon}=\frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}}\vec{\upsilon}$ – **relýatiwistik mehanikada jisimiň impulsy.**

Giňişligiň birhilliligi zerarly relýatiwistik impulsyň saklanma kanuny ýerine ýetýär. **Ýapyk sistemanyň relýatiwistik impulsy wagtyň geçmegi bilen üýtgemeýär.** Ýokardaky aňlatmalardan görnüşi ýaly, ýapyk sistemanyň doly relýatiwistik massasy onda bolup geçýän ähli prosesleriň netijesinde üýtgemän galýar.

5.5. Energiýa üçin relýatiwistik aňlatma. Dynçlyk energiýasy bilen massanyň arasyndaky baglanyşyk

Kinetik energiýanyň aňlatmasyny-da relýatiwistik mehanikanyň düzgünleri esasynda alyp bolar. Material nokadyň hereketi bilen bagly bolan kinetik energiýanyň ösüşi $\vec{F}$ güýjüň tükeniksiz kiçi orun üýtgeme üçin edýän işine deňdir:

$$E_k=\vec{F}d\vec{r}=\vec{F}\,\vec{\upsilon}dt,$$

$$\vec{F}=\frac{d\vec{P}}{dt}=\frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}}\frac{d\vec{\upsilon}}{dt}+\frac{m_0\vec{\upsilon}}{c^2\left(1-\frac{\upsilon^2}{c^2}\right)^{\frac{3}{2}}}\upsilon\frac{d\vec{\upsilon}}{dt},$$

$$dE_k=\frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}}\vec{\upsilon}d\vec{\upsilon}+\frac{m_0\vec{\upsilon}d\vec{\upsilon}}{c^2\left(1-\frac{\upsilon^2}{c^2}\right)^{\frac{3}{2}}}\vec{\upsilon}\vec{\upsilon}.$$

$\vec{\upsilon}d\vec{\upsilon}=\upsilon d\upsilon$ we $\vec{\upsilon}\vec{\upsilon}=\upsilon^2$ bolany üçin

$$dE_k=\frac{m_0\vec{\upsilon}d\vec{\upsilon}}{\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}}\left[1+\frac{\frac{\upsilon^2}{c^2}}{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}\right]=\frac{m_0\upsilon d\upsilon}{c^2\left(1-\frac{\upsilon^2}{c^2}\right)^{\frac{3}{2}}},$$

bu ýerde

$$dm=\frac{m_0\upsilon d\upsilon}{c^2\left[1-\frac{\upsilon^2}{c^2}\right]^{\frac{3}{2}}};\quad dE_k=c^2dm. \tag{5.7}$$

Eger material nokadyň kinetik energiýasynyň dynçlyk halyna görä üýtgeýşini nazara alsak, onda

$$E_k = (m - m_0)c^2 = m_0 c^2\left[\frac{1}{\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}} - 1\right].$$

Teýloryň hataryna dargadyp alarys:

$$\frac{1}{\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}} = \left[\left(1-\frac{\upsilon}{c}\right)^2\right]^{-\frac{1}{2}} = 1 + \frac{1}{2}\left(\frac{\upsilon}{c}\right)^2 + \frac{3}{8}\left(\frac{\upsilon}{c}\right)^4 + \ldots$$

$\upsilon << c$ bolsa, diňe birinji iki çleni almak ýeterlikdir:

$$E_k = \frac{1}{2}m_0 c^2\left(\frac{\upsilon}{c}\right)^2 = \frac{1}{2}m_0\upsilon^2.$$

Görşümiz ýaly

$$\Delta m = m - m_0 = \frac{E_k}{c^2}.$$

Jisimler çaknyşanda energiýanyň saklanma kanunyna laýyklykda:

$$mc^2 = m_0c^2 + E_k = u + E_k = E.$$

$$E^2 = m^2c^4 = \frac{m_0^2c^4}{1-\left(\frac{\upsilon}{c}\right)^2} = m_0c^4 + \frac{m_0^2\upsilon^2c^2}{1-\left(\frac{\upsilon}{c}\right)^2} = m_0^2c^4 + m_0^2\upsilon^2c^2 = m_0^2c^4 + p^2c^2$$

ýa-da

$$E = \sqrt{p^2c^2 + m_0^2c^4}.$$

Bu deňlik doly energiýa bilen jisimiň impulsynyň arasyndaky relýatiwistik gatnaşykdyr.

Ýokarky gatnaşyklar esasynda A.Eýnşteýn şeýle netijä gelýär:

Jisimiň doly energiýasy onuň relýatiwistik massasynyň ýagtylygyň wakuumdaky tizliginiň kwadratyna köpeldilmegine deňdir:

$$E = mc^2. \tag{5.8}$$

Bu deňleme massanyň we energiýanyň özara baglanyşygyny aňladýar.

Goý, elementar bölejikleriň çaknyşma proseslerinde dargama reaksiýa hadysalary ekzotermik (ýylylyk bölüp çykarýan) ($Q > 0$) bolsun.

Erkin neýtronyň β – dargama (raspad) sezewar bolşuna seredeliň:

$$n \to p + e^- + \tilde{\upsilon}_e,$$

bu ýerde n – neýtron, p – proton, $\tilde{\upsilon}_e$ – antineýtrino. Dargama netijesinde

$$Q = \{m_n - (m_p + m_e)\}c^2 \approx 0{,}78\ MeW$$

ýylylyk bölünip çykýar.

Proton bolsa neýtrondan ýeňil bolansoň erkin halda dargama sezewar bolmaýar.

Maýyşgak däl çaknyşmalarda oňa gatnaşýan bölejikler bir görnüşden başgasyna geçip bilýär we ol prosesler ekzotermik ($Q > 0$) ýa-da endotermik (ýylylyk talap edýän) ($Q < 0$) bolup biler. Endotermik reaksiýalar çaknyşýan bölejikleriň ähli energiýasynda bolman, diňe käbir iň kiçi energetiki derejeden ýokary energiýalarda geçip biler. Başky bölejikleriň, reaksiýanyň geçmegine energetiki mümkinçilik döredýän, iň kiçi kinetik energiýasyna **bosaga energiýasy** ýa-da şol **reaksiýanyň bosagasy** E_{bos} diýilýär.

VI BAP. MEHANIKI YRGYLDYLAR WE TOLKUNLAR

6.1. Yrgyldyly hadysalar. Gormoniki yrgyldylar

Wagtyň geçmegi bilen belli bir derejede gaýtalanyp durýan hadysalara (herekete ýa-da hal üýtgemelere) yrgyldy diýilýär.

Yrgyldyly hadysalar fiziki tebigatlary boýunça dürli-dürli bolup biler. Şoňa görä-de mehaniki (maýatnikleriň, tarlaryň, her hili gurallaryň, köprüleriň we ş.m. yrgyldylary), elektromagnit (elektrik toklarynyň, elektromagnit meýdanynyň $\vec{E}$ we $\vec{B}$ wektorlarynyň yrgyldysy) we başga yrgyldylary tapawutlandyryp bolýar. Emma olaryň ählisini birmeňzeş deňlemeler arkaly deň garaýyşda häsiýetlendirip bolýar. Şeýle usuly D. U. Releý, A. G. Stoletow, P. N. Lebedew, L. I. Mandelştam giňden ulanypdyrlar.

Üýtgeýän daşky täsirleriň ýoklugynda, diňe başlangyç täsir zerarly sistemanyň durnukly deňagramlygyndan çykarylmagy netijesinde, sistemada bolup geçýän yrgyldylara erkin ýa-da hususy yrgyldylar diýilýär.

Eger yrgyldy mahaly üýtgeýän we yrgyldyny häsiýetlendirýän ähli fiziki ululyklaryň bahasy deň möhletlerde gaýtalanýan bolsa, onda şeýle yrgyldylara **periodiki yrgyldylar** diýilýär.

Sistemanyň bir doly yrgyldy edýan wagtyna **yrgyldynyň periody** (T) diýilýär.Wagt birliginde bolup geçýän yrgyldylaryň sanyna periodiki yrgyldynyň **ýygylygy** (ν) diýilýär. $\omega = 2\pi\nu = \dfrac{2\pi}{T}$ ululyga, aýlaw ýygylyk diýilýär. Oňa burçlaýyn ýygylyk hem diýilýär.

Periodiki yrgyldylarda, yrgyldaýan S ululygyň wagta baglylygy aşakdaky şerte eýerýär:

$$S = (t + T) = S(t).$$

Yrgyldaýan ululygyň wagta görä üýtgeýşi sinusyň ýa-da kosinusyň kanunyna eýerýän bolsa, onda bu yrgylda garmoniki yrgyldy diýilýär (*6.1-nji çyzgy*):

$$S(t) = A\sin(\omega t + \varphi_0), \tag{6.1}$$

bu ýerde $\omega = 2\pi\nu = \dfrac{2\pi}{T} = const$ – garmoniki yrgyldynyň aýlaw ýygylygy.

$$A = S_{\max} = const > 0 \tag{6.2}$$

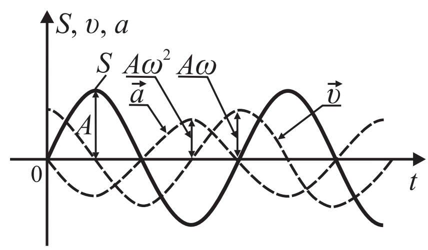
yrgyldaýan ululygyň iň uly bahasy (amplitudasy), φ_0 – başlangyç fazasy. Islendik pursatda ululygyň bahasy yrgyldynyň $\phi(t) = \omega t + \varphi_0$ – fazasy bilen kesgitlenýär. Garmoniki yrgyldynyň aňlatmasyny kosinus arkaly hem ýazyp bolýar.

Garmoniki yrgylda degişli $S(t)$ ululygyň birinji we ikinji önümlerini (6.1)-den tapsak, olaryň garmoniki kanun boýunça üýtgeýändigine göz ýetirmek bolar. Eger $S(t)$ ululygy süýşme diýip kabul etsek, onda bu önümler, degişlilikde yrgyldaýan nokadyň υ tizligini we a tizlenmesini kesgitleýär:

$$\upsilon = \frac{dS}{dt} = A\omega\cos\left(\omega t + \varphi_0\right) = A\omega\sin\left(\omega t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right), \tag{6.3}$$

$$a = \frac{d^2S}{dt^2} = -A\omega^2\sin\left(\omega t + \varphi_0\right) = A\omega^2\sin\left(\omega t + \varphi_0 + \pi\right), \tag{6.4}$$

Görnüşi ýaly $\frac{dS}{dt}$ yrgyldaýan S ululykdan fazasy boýunça $\frac{\pi}{2}$ burça, $\frac{d^2S}{dt^2}$ bolsa π burça süýşendir. Olaryň amplitudasy $A\omega$ we $A\omega^2$ barabardyr ($\varphi_0 = 0$ bolanda, *6.1-nji çyzgy*).



6.1-nji çyzgy

Başgaça aýdylanda, S ululygyň ikinji önümi aşakdaky ýaly kesgitlenýär:

$$\frac{d^2S}{dt^2} = -\omega^2 S$$

ýa-da

$$\frac{d^2S}{dt^2} + \omega^2 S = 0. \tag{6.5}$$

Bu ikinji derejeli differensial deňlemäniň umumy çözgüdi aşakdaka deňdir:

$$S = A_1\sin\omega t + A_2\cos\omega t, \tag{6.6}$$

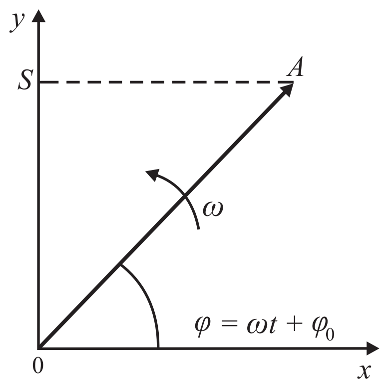
bu ýerde A_1 we A_2 – käbir hemişelik ululyklar we olary başlangyç şertlerden tapyp bileris:

$$A_1 = \frac{1}{\omega}\left(\frac{dS}{dt}\right)t = 0, \quad A_2 = S(0).$$

Şeýlelikde, umumy çözgüdi ýönekeý görnüşe getirip bileris:

$$S = A\sin(\omega t + \varphi_0),$$

$$A = \sqrt{A_1^2 - A_2^2}, \quad \varphi_0 = \text{artctg}\left(\frac{A_1}{A_2}\right).$$



6.2-nji çyzgy

Diýmek, S ululyk ýokarda görkezilen differensial deňlemäni kanagatlandyrsa, diňe şonda garmoniki yrgyldy bolýar. Şoňa görä-de, (6.5) deňlemä **garmoniki yrgyldylaryň differensial deňlemesi** diýilýär.

Garmoniki yrgyldylary tekizlikde aýlanýan wektor görnüşde hem grafiki şekillendirip bolýar

(*6.2-nji çyzgy*). Koordinatalar başlangyjy O nokatda A wektoryň başlangyjjyny ýerleşdirip, ony ω burç tizligi bilen aýlasak, onda A wektoryň y okuna proýeksiýasy garmoniki kanun boýunça üýtgär:

$$A_y = S = A\sin(\omega t + \varphi_0).$$

Şeýle grafiki şekillendirmä wektor diagrammalaryň usuly diýilýär. Bu usul ugurdaş yrgyldylary goşmakda giňden ulanylýar.

Kompleks sanlar üçin Eýleriň formulasyna laýyklykda:

$$e^{i\varphi} = \cos\varphi + i\sin\varphi,$$

$$i = \sqrt{-1} \text{ – hyýaly birlik.}$$

Şoňa görä-de $S = A\cos(\omega t + \varphi_1)$ garmoniki yrgyldaýan ululygy eksponensial funksiýa görnüşde ýazyp bolar:

$$\tilde{S} = \tilde{A}e^{i\omega t} = Ae^{i(\omega t + \varphi_1)},$$

bu ýerde $\tilde{A} = Ae^{i\varphi_1}$ – kompleks amplituda.

Kompleks $\tilde{S}$ funksiýanyň diňe hakyky böleginiň fiziki manysy bardyr:

$$R_e\tilde{S} = S = A\cos(\omega t + \varphi_1) = A\sin(\omega t + \varphi_0), \quad \varphi_0 = \varphi_1 + \frac{\pi}{2}.$$

Umuman, garmoniki yrgyldyny häsiýetlendirmek üçin trigonometrik, kompleks funksiýalary, aýlanýan wektory we grafigi ulanyp bolar. Agzalan usullaryň her biriniň özboluşly amatly taraplary bardyr.

6.2. Garmoniki yrgyldylaryň goşulyşy

Sistemanyň bir wagtda birnäçe yrgyldy proseslere gatnaşmagy netijesinde onuň ahyrky yrgyldy kanunyny tapmaklyga yrgyldylaryň goşulyşy diýilýär. Yrgyldylaryň biri-birine görä dürli ugurlarda bolmagy mümkin. Umumy fizika kursunda iň ýönekeý modelleşdiriş, ýagny yrgyldylaryň sany çäkli bolup (köplenç, iki), olar biri-birine görä ugurdaş ýa-da perpendikulýar bolan ýagdaýlaryna seretmek ýeterlikdir.

Ugurdaş iki garmoniki yrgyldylaryň goşulyşyna seredeliň. Goý, material nokat bir koordinata okunyň, ýagny x okuň ugruna, iki yrgyldy herekete gatnaşýan bolsun:

$$x_1 = A_1\cos(\omega_1 t + \varphi_1), \quad x_2 = A_2\cos(\omega_2 t + \varphi_2). \tag{6.7}$$

Eger yrgyldylar garmoniki bolsa, onda netijeleýji yrgyldynyň deňlemesini şeýle ýazmak bolar:

$$x = x_1 + x_2 = A(t)\cos\phi(t),$$

bu ýerde $\phi(t)$ – yrgyldynyň fazasy, $A(t)$ – yrgyldynyň amplitudasy. Bilşimiz ýaly, garmoniki yrgyldylaryň fazalary, aşakdaky ýaly aňladylýar:

$$\phi_1(t) = \omega_1 t + \varphi_1, \quad \phi_2(t) = \omega_2 t + \varphi_2.$$

Garmoniki yrgyldylaryň aýlanýan wektorlaryň kömegi bilen aňladylyşyny peýdalanyp, $\vec{A_1}(t)$ we $\vec{A_2}(t)$ wektorlary O nokatda ýerleşdirip, olara ω_1 we ω_2 burçlaýyn tizlik bermeli (*6.3-nji çyzgy*).

Şol wektorlaryň x oka proýeksiýasy kosinus kanuny boýunça yrgyldar. Islendik pursatda iki wektoryň jemi $\vec{A}(t)$ wektora deňdir:

$$|A(t)^2| = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos[\phi_2(t) - \phi_1(t)]. \tag{6.8}$$

Netijede $\vec{A}(t)$ wektoryň fazasy şeýle kesgitlenýär:

$$\mathrm{tg}\phi(t) = \frac{A_1\sin\phi_1(t) + A_2\sin\phi_2(t)}{A_1\cos\phi_1(t) + A_2\cos\phi_2(t)}.$$

Iki yrgyldynyň fazalarynyň tapawudy:

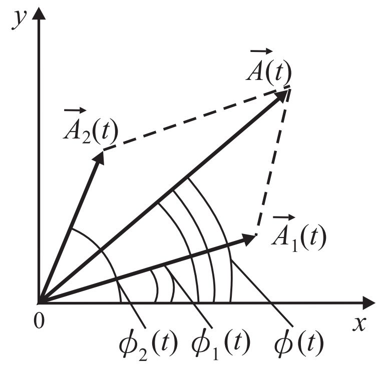
$$\phi_2(t) - \phi_1(t) = (\omega_2 - \omega_1)t + (\varphi_2 - \varphi_1).$$

Eger yrgyldylaryň fazalarynyň tapawudy wagtyň geçmegi bilen üýtgemese, onda olara **kogerent yrgyldylar** diýilýär. Elbetde bu şert diňe aýlaw ýygylyklar deň bolanda ýerine ýetýär. Diýmek, aýlaw ýygylyklary deň bolan yrgyldylar kogerentdirler, ýagny

$$\omega_1 = \omega_2 = \omega$$

bolanda

$$\phi_2(t) - \phi_1(t) = \varphi_2 - \varphi_1.$$



6.3-nji çyzgy

Kogerent yrgyldylaryň islendik pursatdaky fazalarynyň tapawudy yrgyldylaryň başlangyç fazalarynyň tapawudyna deňdir. Iki ugurdaş kogerent yrgyldylaryň goşulmagy netijesinde ýene-de garmoniki yrgyldy emele geler:

$$x_1 + x_2 = A\cos(\omega t + \varphi_0).$$

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\varphi_2 - \varphi_1). \tag{6.9}$$

$$\mathrm{tg}\varphi_0(t) = \frac{A_1\sin\varphi_1(t) + A_2\sin\varphi_2(t)}{A_1\cos\varphi_1(t) + A_2\cos\varphi_2(t)}. \tag{6.10}$$

Görnüşi ýaly, netijeleýji yrgyldy fazalaryň tapawudyna baglylykda aşakdaky iki çägiň arasynda üýtgäp bilýär:

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \pm(2n + 1)\pi \quad \text{bolsa,} \quad A = |A_1 - A_2|,$$

$\varphi_2 - \varphi_1 \pm 2n\pi$ bolsa, $A = A_1 + A_2$, ($n = 0, 1, 2, ...$) – položitel bütin san.

Eger iki yrgyldynyň faza tapawudy π-niň jübüt sanyna deň bolsa, onda olara deň fazaly (sinfaz), π-niň täk sanyna deň bolsa tersfazaly yrgyldylar diýilýär.

Umuman, yrgyldylaryň ýygylyklary deň däl bolsa olar kogerent däldir. Emma ω_1 we ω_2 juda az tapawutlanýan bolsa, olara käbir Δt möhletde, takmynan kogerent yrgyldylar diýmek bolar. Munuň üçin $|\omega_2 - \omega_1|\Delta t << 2$ ýa-da $\Delta t << \tau_{kog}$ şert ýerine ýetmelidir, bu ýerde $\tau_{kog} = \dfrac{2\pi}{(\omega_2 - \omega_1)}$ – yrgyldylaryň **kogerentlik wagty**.

Deň ugrukdyrylan we golaý ýygylykly iki garmoniki yrgyldy goşulanda ýüze çykýan garmoniki däl yrgyldylara **endiremeler** (biýeniýeler) diýilýär.

Eger, amatlylyk üçin, iki yrgyldynyň fazalary gabat gelýän pursaty wagtyň hasaplaýyş başlangyjy hökmünde ulansak, onda

$$S_1 = A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_0),$$

$$S_2 = A_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_0) = A_2 \sin[\omega_1 t + \varphi_0 + \varphi(t)],$$

$$\varphi(t) = (\omega_2 - \omega_1)t.$$

Ýokarda ulanan usulymyzyň esasynda goşulmak netijesindäki yrgyldyny şeýle aňladyp bolar:

$$S = S_1 + S_2 = A(t)\sin[\omega_1 t + \varphi_0 + \psi(t)],$$

ýagny

$$[A(t)]^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos\varphi(t),$$

$$\mathrm{tg}\psi(t) = \frac{A_2 \sin\varphi(t)}{A_1 + A_2\cos\varphi(t)}.$$

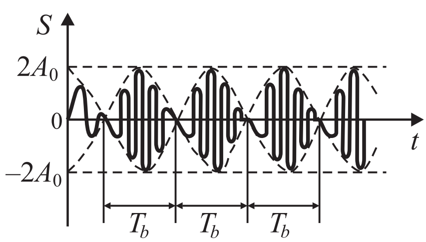
Ýönekeýleşdirmek üçin $A_1 = A_2 = A_0$ diýip alsak:

$$A(t) = 2A_0\cos\left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2}t\right),$$

$$\psi(t) = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2}t,$$

$$S = 2A_0\cos\left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2}t\right)\sin\left(\frac{\omega_2 + \omega_1}{2}t + \varphi_0\right).$$

Bu ýerden görnüşi ýaly yrgyldynyň üýtgeýän $A(t)$ amplitudasy $A(t)|A_1 - A_2|$-den $A_1 + A_2$ çenli aralykda $\Omega = |\omega_2 - \omega_1|$ ýygylyk bilen üýtgäp durýar. Ω – endiremäniň (biýeniýäniň) aýlaw ýygylygy, $A(t)$ bolsa amplitudasy. Endiremäniň gaýtalanyş periody (*6.4-nji çyzgy*) şeýle kesgitlenýär:



6.4-nji çyzgy

$$T_t = \frac{2\pi}{\Omega} = \frac{2\pi}{|\omega_2 - \omega_1|} = \frac{T_1T_2}{|T_1 - T_2|}.$$

Islendik periodiki garmoniki däl yrgyldyny esasy aýlaw ýygylygy bütin sana tapawutlanýan uly ýygylykly ýönekeý garmoniki yrgyldylaryň jemi hökmünde kabul edip bolar:

$$S = f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega t + \varphi_n).$$

Periodiki $f(t)$ funksiýany şeýle aňlatmaga çylşyrymly periodiki yrgyldyny Furýeniň hataryna ýaýratmak ýa-da garmoniki seljerme diýilýär. Onuň düzümindäki ω, 2ω, 3ω we ş.m aýlaw ýygylykly yrgyldylara çylşyrymly yrgyldynyň birinji (esasy), ikinji, üçünji we ş.m. **garmonikalary** diýilýär. Bulara tutuşlygyna $S = f(t)$ **yrgyldynyň spektri** diýilýär.

Yrgyldynyň öz periodyndan has uly wagtda onuň amplitudasynyň ýa-da başga bir parametriniň (ýygylygynyň) belli bir kanun boýunça üýtgedilmegine yrgyldynyň modulýasiýasy diýilýär.

Deňýygylykly özara perpendikulýar garmoniki yrgyldylaryň goşulyşyny şeýle mysal arkaly öwreneliň.

Goý, käbir nokat bir wagtda x we y oklaryň ugry boýunça yrgylda gatnaşýar diýeliň:

$$x = A_1 \cos\omega t,$$

$$y = A_2 \cos(\omega t + \varphi).$$

Bularyň fazalarynyň tapawudy φ. Deňlemeleri bilelikde işläp, netijeleýji yrgyldynyň traýektoriýasynyň deňlemesini taparys:

$$\frac{x}{A_1} = \cos\omega t,$$

$$\frac{y}{A_2} = \cos(\omega t + \varphi) = \cos\omega t \cos\varphi - \sin\omega t \sin\varphi.$$

Bu ýerden $\sin\omega t = \sqrt{1 - \cos^2\omega t} = \sqrt{1 - (x/A_1)^2}$ bolýandygyny göz öňünde tutup alarys:

$$\frac{x^2}{A_1^2} - \frac{2xy}{A_1 A_2}\cos\varphi + \frac{y^2}{A_2^2} = \sin^2\varphi. \qquad (6.11)$$

Bu ellipsiň deňlemesidir. Şoňa görä-de şeýle yrgyldylara **elliptik polýarlaşan** diýilýär.

Eger $A_1 = A_2 = R$, $\varphi = \frac{\pi}{2}(n + 1)$ bolsa, onda

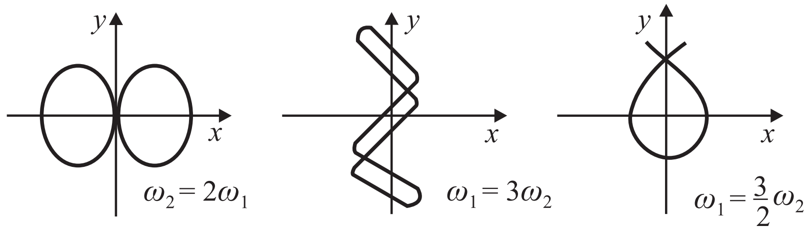
$$x^2 + y^2 = R^2. \qquad (6.12)$$

Ýagny, töweregiň deňlemesini alarys. Şeýle yrgylda **töwerekleýin** ýa-da **sirkulýar polýarlaşan** diýilýär.

Eger $\varphi = n\pi$ bolsa, ellips göni çyzygyň kesimine öwrülýär:

$$y = \pm\frac{A_2}{A_1}x. \qquad (6.13)$$

Şeýle yrgylda **gönümel polýarlaşan** diýilýär. Goşulýan yrgyldylaryň aýlaw ýygylyklarynyň gatnaşygy birden uly bitin sana ýa-da galyndysyz paýa deň bolsa, onda dürli görnüşdäki halkalaýyn traýektoriýalar emele geler. Olara Lissažunyň figuralary diýilýär (*6.5-nji çyzgy*).



6.5-nji çyzgy

Elektromagnit yrgyldylary öwrenilende Lissažunyň figuralaryny ossillografda synlap bolýar.

6.3. Erkin garmoniki yrgyldylar

Eger material nokat x koordinatlar oky boýunça deňagramlyk ýagdaýynyň golaýynda gönümel garmoniki hereket edýän bolsa, onda onuň koordinatalarynyň wagta baglylygyny şeýle görnüşde aňladyp bolar:

$$x = A\cos(\omega t + \varphi_0).$$

Ýokarda seredip geçişimiz ýaly, material nokadyň tizligi we tizlenmesi garmoniki kanun boýunça üýtgeýär. Şoňa görä-de, nokada täsir edýän güýç aşakdaka deň bolar:

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad \text{ýa-da} \quad F_x = -m\omega^2 x.$$

Bu ýerde m – material nokadyň massasy. Diýmek, güýç material nokadyň deňagramlyk ýagdaýdan gyşarmasynyň ters ugruna gönükdirilendir we şol gyşarma göni baglydyr:

$$\vec{F} = -m\omega^2 x\vec{i},$$

bu ýerde $\vec{i}$, x okunyň birlik wektory. Şeýle güýçler maýyşgak güýçleriň kanunyna laýyk gelýär. Emma tebigaty başga bolany sebäpli olara **kwazimaýyşgak** (hamala maýyşgak ýaly) güýçler diýilýär.

Yrgyldaýan material nokadyň kinetik energiýasy:

$$E_k = \frac{m\upsilon^2}{2} = \frac{1}{2}m\upsilon_0^2 \sin^2(\omega t + \varphi_0) = \frac{m\omega^2 A^2}{2}\sin^2(\omega t + \varphi_0)$$

ýa-da

$$E_k = \frac{m\omega^2 A^2}{4}\left[1 - \cos 2(\omega t + \varphi_0)\right].$$

Kinetik energiýa noldan $\frac{m\omega^2 A^2}{2}$ ululyga çenli 2ω aýlaw ýygylygy bilen garmoniki üýtgeýär.

Kwazimaýyşgak güýçleriň täsiri zerarly material nokadyň potensial energiýasy-da üýtgäp durýar:

$$E_p = -\int_0^x F_x dx = \frac{1}{2}m\omega^2 x^2 = \frac{m\omega^2 A^2}{2}\cos^2(\omega t + \varphi_0)$$

ýa-da

$$E_p = \frac{mA^2\omega^2}{4}\left[1 + \cos 2(\omega t + \varphi_0)\right].$$

Görnüşi ýaly, kinetik we potensial energiýalar deň çäklerde birmeňzeş kanuna laýyklykda üýtgeýärler, emma olaryň fazalarynyň tapawudy π-e deňdir (ýagny olar fazalary boýunça gapma-garşylyklydyr).

Şeýlelikde

$$E = E_k + E_p = \frac{m\omega^2 A^2}{2} = const. \qquad (6.14)$$

Material nokadyň doly mehaniki energiýasy hemişelikdir.

Erkin yrgyldylara mysal görnüşinde, dissipatiw güýçler ýok hasap edip, dürli maýatnikleriň hereketine garap bileris.

I. Gönüçyzykly garmoniki ossillýator. Eger puržiniň bir ujuna berkidilen ýükjagaz, puržinde döreýän maýyşgak güýçler sebäpli gowşak yrgyldy edýän bolsa, şeýle sistema **puržinli maýatnik** diýilýär. Puržinli maýatnik gönüçyzykly ossilýatoryň mysalydyr. Ýükjagazyň hereket deňlemesini şeýle ýazmak bolar:

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = -kx \quad \text{ýa-da} \quad \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m}x = 0. \qquad (6.15)$$

Bu deňleme garmoniki yrgyldynyň differensial deňlemesidir. Öň belläp geçişimiz ýaly:

$$\omega^2 = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = \frac{k}{m}, \quad \text{ýa-da} \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}. \qquad (6.16)$$

Bu formulalar puržinli maýatnigiň aýlaw ýygylygyny we doly yrgyldynyň periodyny kesgitlemäge mümkinçilik berýär.

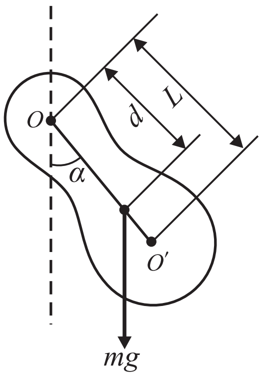
2. Fiziki maýatnik agyrlyk merkezinden geçmeýän käbir kese okuň daşynda agyrlyk güýjüniň täsiri zerarly yrgyldap bilýän gaty jisimdir. 6.6-njy çyzgyda jisimiň agyrlyk merkezinden geçýän we yranma okuna perpendikulýar tekizlikdäki kesigi görkezilen.

Ok bilen tekizligiň kesişme nokadyna **maýatnigiň asma nokady** diýilýär.

Hereketsiz okuň daşynda aýlanýan jisimiň dinamikasynyň esasy kanunyna laýyklykda:

$$J\frac{d^2\alpha}{dt^2} = mgd\sin\alpha,$$

bu ýerde J – jisimiň yranma okuna görä inersiýa momenti, m – jisimiň massasy, g – erkin gaçma tizlenmesi. Kiçi burçlar üçin $\sin\varphi \approx \varphi$ bolýandygyny göz öňünde tutup, deňlemäni şeýle ýazmak bolar:



6.6-njy çyzgy

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \frac{mgd}{J}\alpha = 0. \tag{6.17}$$

Bu deňlemä fiziki maýatnigiň differensial deňlemesi diýilýär. Fiziki maýatnigiň differensial deňlemesinden öň belläp geçişimiz ýaly, aýlaw ýygylygy we doly yrgyldynyň periodyny taparys:

$$\omega = \sqrt{\frac{mgd}{J}}, \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{mgd}} = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}},$$

bu ýerde $L = \dfrac{J}{md}$ – **fiziki maýatnigiň getirme uzynlygy diýilýär**.

3. Matematiki maýatnik – agramsyz, süýnmeýän sapakda asylan we dik tekizlikde, agyrlyk güýjüniň täsiri zerarly yrgyldaýan material nokatdyr. Elbetde, matematiki maýatnigiň deňlemesi hem edil fiziki maýatnik üçin ulanylan usul boýunça alynýar. Emma, $d = l$ (l – sapagyň uzynlygy) material nokadyň inersiýa momenti bolsa, onda $J = ml^2$.

Şeýlelikde

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}, \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

6.4. Togtaýan erkin yrgyldylar

Yrgyldaýan sistemada energiýanyň ýitgisi zerarly amplitudasy barha peselýän yrgyldylara **togtaýan yrgyldylar** diyilýär.

Erkin mehaniki yrgyldylaryň peselmegi, esasan sürtülmäniň ýa-da daşky sredanyň garşylyk güýçleriniň barlygy bilen baglydyr. Ol güýçler daşky sredada maýyşgak tolkunlary döretmek üçin iş edip, sistemanyň energiýasyny barha kemeldýär. Mysal üçin, puržinli maýatnikde ýükjagazyň tizligine bagly we oňa ters ugrukdyrylan garşylyk güýji ýüze çykýar:

$$\vec{F}_L = -b\vec{\upsilon} = -b\frac{dx}{dt}\vec{i},$$

bu ýerde b – garşylyk koeffisiýenti diýlip atlandyrylýan hemişelik položitel ululyk. Maýatnigiň yrgyldysynyň deňlemesi şeýle görnüşde bolar:

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = -b\frac{dx}{dt} - kx$$

ýa-da

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta\frac{dx}{dt} + \omega^2 x = 0, \quad \beta = \frac{b}{2m}, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Alnan deňlemäni yrgyldy wagty üýtgeýän her bir fiziki ululyk üçin hem ýazyp bileris:

$$\frac{d^2S}{dt^2} + 2\beta\frac{dS}{dt} + \omega_0^2 x = 0,$$

bu ýerde β – **togtama koeffisiýenti**. Sistemada energiýa ýitgisi bolmadyk mahaly $\beta = 0$. ω_0 – erkin yrgyldylaryň aýlaw ýygylygy.

Matematika kursunda subut edilişine görä, şeýle deňlemäniň çözüwini $S = e^{\lambda T}$ görnüşde gözlemeli. Onuň umumy çözüwi aşakdaka deňdir:

$$S = c_1 e^{\lambda_1 T} + c_2 e^{-\lambda_2 T},$$

bu ýerde c_1, c_2 – başlangyç şertlere bagly hemişelik koeffisiýentler, λ_1, λ_2 – deňlemede $S(t) = e^{\lambda T}$ goýup alynýan meňzeş

$$\lambda^2 + 2\beta\lambda + \omega^2 = 0$$

deňlemäniň kökleri.

Eger $\beta < \omega_0$ bolsa, onda kwadrat deňlemäniň kökleri kompleksleýin – çatrymlydyrlar:

$$\lambda_{1,2} = \beta \pm \sqrt{\beta^2 - \omega_0^2} = -\beta \pm i\omega,$$

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}, \quad i = \sqrt{-1} \text{ – hyýaly birlik.}$$

Umumy çözüwi aşakdaky görnüşe eýe bolar:

$$S = e^{-\beta t}[c_1 e^{i\omega t} + c_2 e^{-i\omega t}].$$

Eýleriň formulasynyň esasynda

$$S = e^{-\beta t}[(c_1 + c_2)\cos\omega t + i\,(c_1 + c_2)\sin\omega t].$$

Eger

$$c_1 + c_2 = A\cos\psi, \quad i(c_1 - c_2) = A_0\sin\psi_0$$

diýip bellesek, onda alarys:

$$S = A_0 e^{-\beta t}\cos(\omega t + \psi).$$

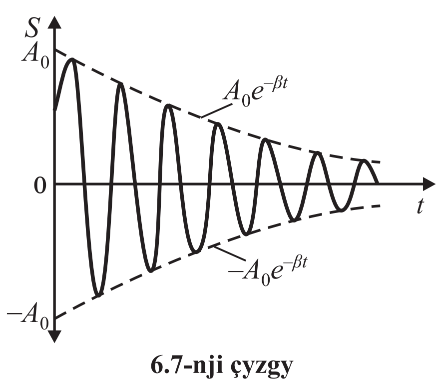
$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega^2 - \beta^2}},$$

bu ýerde T – togtaýan yrgyldylaryň periody. Şeýlelikde

$$A = A_0 e^{-\beta t},$$

bu ýerde A – togtaýan yrgyldynyň amplitudasy, A_0 – başlangyç amplitudasy (*6.7-nji çyzgy*).

Togtaýan yrgyldylaryň amplitudasy e esse kiçelýänçä geçýän wagta **relaksasiýa wagty** diýilýär:



6.7-nji çyzgy

$$\tau = \frac{1}{\beta}.$$

Amplitudanyň peseliş çaltlygyny mukdar taýdan häsiýetlendirmek üçin **togtamanyň logarifmik dekrementi** diýen düşünje ulanylýar:

$$\delta = \ln\frac{A(t)}{A(t+T)} = \beta T = \frac{T}{\tau} = \frac{1}{N},$$

bu ýerde N – amplituda e esse kiçelýänçä bolup geçýän doly yrgyldylaryň sany.

Togtamanyň logarifmik dekrementi t we $t + T$ pursatlara degişli amplitudalaryň gatnaşygynyň natural logarifmine deň bolan ölçeg birliksiz sandyr.

Togtaýan yrgyldylaryň aýlaw ýygylygy hem logarifmik dekremente baglydyr:

$$\delta = \beta T = \frac{2\pi}{\omega}\sqrt{\omega_0^2 - \omega^2} = 2\pi\sqrt{\left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2 - 1},$$

$$\omega = \frac{\omega_0}{\sqrt{1 + (\delta/2\pi)^2}}.$$

Yrgyldaýan sistemanyň hilliligi (dobrotnost) diýlip, onuň t pursatdaky energiýasynyň bir doly yrgyldynyň periodynyň dowamynda (t we $t + T$ pursatlaryň arasynda) energiýanyň azalmagyna gatnaşygynyň 2π-e köpeltmek hasylyna deň bolan Q ululyga aýdylýar. Q ululyk ölçeg birliksiz sandyr.

$$Q = 2\pi\frac{E(t)}{E(t) - E(t+T)} = 2\pi\frac{A^2 t}{A^2(t) - A^2(t+T)} = \frac{2\pi}{1 - e^{-2\delta}}.$$

Eger $\delta << 1$ bolsa, onda $1 - e^{-2\delta} \approx 2\delta$, ýagny yrgyldaýan sistemanyň hilliligi aşakdaka deňdir:

$$Q \approx \frac{\pi}{\delta} \approx \frac{\pi}{\beta T_0} = \frac{\omega_0}{2\beta}.$$

Puržinli maýatnik üçin

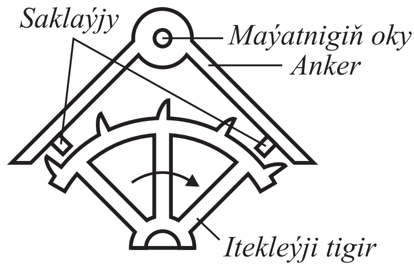
$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad \beta = \frac{b}{2m}, \quad Q = \frac{1}{b}\sqrt{km}.$$

Togtama koeffisiýenti β ulaldygyça yrgyldylaryň şertli periody barha artýar we $\beta = \omega_0$ bolanda tükeniksizlige öwrülýär. Şeýle ýagdaýda periodik yrgyldyly hereket bolup bilmez we oňa aperiodik (periodik däl) **hereket** diýilýär.

6.5. Mejbury yrgyldylar we rezonans

Ozal belläp geçişimiz ýaly, togtaýan yrgyldylarda sistemanyň energiýasy garşylyk güýçlerini ýeňip geçmek üçin sarp bolýar. Eger şeýle ýitgileriň öwezi doldurylyp durulsa, onda yrgyldylar togtamaýar. Sistemanyň energiýasynyň üstüni daşyndan täsir edýän itergileriň hasabyna dolduryp bolar. Emma şeýle itergiler yrgyldylaryň ugry bilen sazlaşykly bolmalydyr. Sazlaşyk bolmadyk mahalynda itergiler yrgyldyny gowşadyp, hatda togtadyp hem biler. Itergileriň yrgyldy hereketler bilen sazlaşykly bolmagyny yrgyldaýan sistemanyň özi dolandyrar ýaly-da edip bolýar. Şeýle sistemalara öz-özi yrgyldaýan sistemalar diýilýär. Bolup geçýän togtamaýan yrgyldylara bolsa, **awtoyrgyldylar** diýilýär.

Mysal üçin, sagatlaryň awtoyrgyldyly mehanizmine garap bileris. Sagadyň maýatniginiň oky (*6.8-nji çyzgy*) egri anker bilen berkidilen. Ankeriň uçlarynda ýörite görnüşdäki çykyndylar gezekli-gezegine itekleýji tigriň dişlerine ilteşýär.



6.8-nji çyzgy

Tigir puržiniň ýa-da ýüküň agyrlyk güýji zerarly aýlanmaga ymtylýar. Emma ol diňe maýatnigiň hereketi netijesinde anker towlananda herekete gelip bilýär we çykyndylaryň ýapgyt depesinden dişleri typyp ony itekleýär. Bir doly yrgyldynyň döwründe tigir iki dişine degişli itergi berýär.

Sistema täsir edýän we mejbury mehaniki yrgyldylary döredýän, üýtgeýän daşky güýje mejbur ediji ýa-da gozgaýjy güýç diýilýär. Ony agyrlyk güýji döredýär.

Eger sadaja ossillýatora (mysal üçin, x okuň ugruna yrgyldaýan puržinli maýatnige) itergi güýçleri täsir edýän bolsa, okuň mejbury yrgyldylarynyň differensial deňlemesini şeýle ýazyp bolar:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta\frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = \frac{1}{m}F_x(t), \qquad (6.17)$$

bu ýerde $F_x(t)$ – wagta bagly periodiki funksiýa (daşky güýç).

Şeýle güýjüň täsiri başlansoň, ilkibaşda maýatnik bir wagtda iki herekete gatnaşýar, ýagny mejbury yrgyldylaryň geçiş düzgüni döreýär.

Maýatnik, birinjiden, togtaýan erkin yrgyldyny dowam edýär, ikinjiden bolsa gözgaýjy $F_x(t)$ – güýjüň ýygylygy bilen yrgyldamaga mejbur bolýar.

Togtaýan yrgyldylaryň amplitudasy:

$$A(t) = A_0 e^{-\beta t} \qquad (6.18)$$

$\tau_0 = \dfrac{4,6}{\beta}$ – wagtda 100 esse kiçelýär. Şoňa görä-de yrgyldy başlandan $\tau \geq \tau_0$ wagt geçenden soň togtaýan yrgyldylar hasaba alardan gowşak diýip bolýar. Ýagny, sistema diňe $F_x(t)$ güýç zerarly yrgyldymagyny dowam edýär. Maýatnik gozgaýjy güýjüň ýygylygy bilen bolup geçýän we mejbury yrgyldalaryň döreýän ýagdaýyna geçýär.

Eger $F_x(t)$ güýç garmoniki kanun boýunça üýtgeýän bolsa, onda bu mejbury yrgyldylar hem garmoniki kanuna eýedirler:

$$x = A\cos(\omega t + \varphi_0), \qquad (6.19)$$

bu ýerde ω – güýjüň aýlaw ýygylygy, A – mejbury yrgyldylaryň amplitudasy, φ_0 – onuň başlangyç fazasy.

Şeýlelikde

$$\frac{dx}{dt} = -A\omega \sin(\omega t + \varphi_0) = A\omega \cos\left(\omega t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right), \tag{6.20}$$

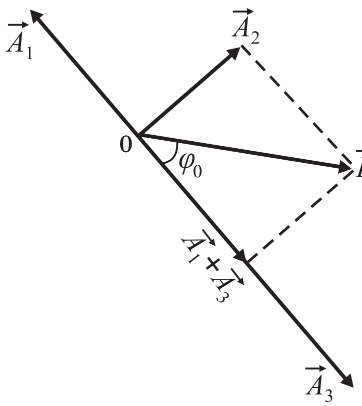
$$\frac{d^2x}{dt^2} = -A\omega \cos(\omega t + \varphi_0) = A\omega^2 \cos(\omega t + \varphi_0 + \pi). \tag{6.21}$$

(6.20.), (6.21.) we (6.17) deňlemelerden alarys:

$$A_1\cos(\omega t + \varphi_0 + \pi) + A_2\cos(\omega t + \varphi_0 + \pi) + A_3\cos(\omega t + \varphi) = B\cos\omega t. \tag{6.22}$$

Bu ýerde aşakdaky bellemeler ulanyldy:

$$A_1 = \omega^2 A, \quad A_2 = 2\beta\omega A, \quad A_3 = \omega_0^2 A, \quad B = \frac{F_0}{m}. \tag{6.23}$$



6.9-njy çyzgy

Deňlemeden görnüşi ýaly, birmeňzeş ýygylykly üç garmoniki yrgyldynyň jemi ýene-de garmoniki yrgyldy bolar. Eger olary wektorlar görnüşinde aňlatsak (*6.9-njy çyzgy*), onda has düşnükli bolar.

Gyzgyda wektorlaryň başlangyç pursatdaky ($t = 0$) ýagdaýlary görkezilen:

$$\vec{A_1}(0) + \vec{A_2}(0) + \vec{A_3}(0) = \vec{B}(0).$$

Görnüşi ýaly, döreýän mejbury yrgyldylaryň A amplitudasy we maýatnigiň deňagramlyk ýagdaýyndan gyşarmasy bilen mejbur ediji güýjüň arasyndaky φ_0 faza süýşmesi ω_0, ω, β – ululyklara baglydyr. Bu ýerde ω_0 – sistemanyň erkin yrgyldysynyň, ω – mejbur ediji güýjüň aýlaw ýygylyklary, β – sistemada **yrgyldylaryň togtama koeffisiýenti**:

$$A = \frac{F_0}{m\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}},$$

$$\mathrm{tg}\varphi_0 = -\frac{2\beta\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)}.$$

Eger $\omega = 0$ bolsa, onda $F_x = F_0$ güýç hemişelikdir. Bu ýerde $A_0 = \dfrac{F_0}{k}$ – maýatnigiň deňagramlykdan statik gyşarmasy diýilýär.

Döreýän mejbury yrgyldylaryň, amplitudanyň iň uly boljak bahasyna haýsy ω_r ýygylygyň degişlidigini kesgitlemek üçin, amplitudanyň aňlatmasyndaky maýdalawjynyň iň kiçi bahasyny tapmak gerek:

$$\frac{d}{d\omega}\left[(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2\right]_{\omega = \omega_r} = 0;$$

$$-4\omega_r\left(\omega_0^2-\omega_r^2\right)+8\beta^2\omega_r=0;$$
$$\omega_r=\sqrt{\omega_0^2-2\beta^2}=\sqrt{\omega^2-\beta^2},$$

bu ýerde ω – togtaýan erkin yrgyldynyň aýlaw ýygylygy, ω_r – rezonansdaky aýlaw ýygylyk.

Rezonans mahaly amplitudanyň iň uly bahasy:

$$A_{\max}=\frac{F_0}{2m\beta\omega}=\frac{\pi F_0}{m\delta\omega^2},$$

bu ýerde $\delta=\beta T=\dfrac{2\pi\beta}{\omega}$ – togtamanyň logarifmik dekrementi.

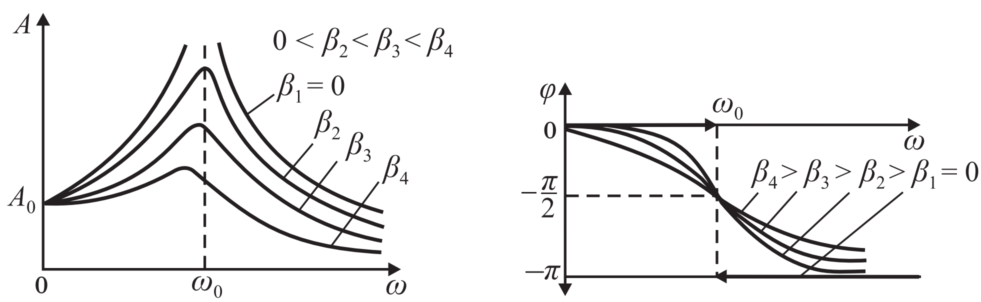
Eger $\beta << \omega_0$ bolsa, onda

$$\omega_r\approx\omega\approx0,$$
$$\varphi_0\left(\omega_r\right)\approx-\frac{\pi}{2},$$

bu ýerde $Q=\dfrac{\pi}{\delta}$ – maýatnigiň hilliligi, $A_0=\dfrac{F_0}{m\omega_0^2}$ – statik gyşarma.

Mejbur ediji güýjüň ýygylygy bilen sistemanyň hususy yrgyldysynyň ýygylygy deňleşende mejbury yrgyldynyň amplitudasynyň çürt-kesik artmagyna mehaniki rezonans diýilýär.

6.10-njy çyzgyda egri çyzyklar rezonansa degişli bolup, ol onuň golaýynda amplitudanyň we fazanyň, gozgaýjy güýjüň aýlaw ýygylygyna görä üýtgeýşini görkezýär.



6.10-njy çyzgy

Eger gozgaýjy güýç periodiki, emma garmoniki däl kanuna eýerýän bolsa, onda ony Furýeniň hataryna dargadyp garmonikalaryň jemi görnüşinde kabul etmek bolýar. Garmonikalar dürli amplitudaly, fazaly we aýlaw ýygylyklydyrlar.

Emma olaryň ýygylyklary $\dfrac{2\pi}{T}$ ululyga kratnydyr: $\omega=\dfrac{2n\pi}{T}$; (n = 1, 2, 3 ...,),

bu ýerde T – gozgaýjy güýjüň gaýtalanma periody. Maýatnik gönümel baglanyşykly yrgyldaýan sistemadygy sebäpli, gozgaýjy güýjüň her bir garmonikasy oňa, hamala beýlekileri bolmadyk ýaly, täsir edýär. Şonuň üçin-de, islendik periodiki gozgaýjy güýjüň maýatnikde döredýän mejbury yrgyldylaryny, şol güýjüň her garmonikasynyň aýratynlykda döredýän mejbury yrgyldylarynyň goşulmagynyň netijesi hökmünde kabul edip bolar. Rezonans hadysasy bilen baglanyşykly, gozgaýjy güýjüň garmonikalarynyň, diňe maýatnigiň rezonans ýygylygyna golaý aýlaw ýygylyklary düýpli ähmiýete eýedir.

Eger maýatnigiň togtama koeffisiýenti kiçi (ýa-da maýatnigiň hilliligi ýokary) bolsa, hat-da gozgaýjy güýçler garmoniki däl bolanda-da, maýatnikde dörän mejbury yrgyldylar garmoniki kanuna golaý bolup biler. Şeýle ossillýatorlaryň rezonans ýygylygyny üýtgetmek arkaly, olary spektral abzal hökmünde ulanyp bolýar. Ýagny, dürli ýygylykly garmonikalaryň, periodiki gozgaýjy güýçleriň düzüminde, nähili gatnaşyklarda durýandygyny barlamak mümkin.

6.6. Mehaniki tolkunlar

Öň belläp geçişimiz ýaly, yrgyldyly sistemanyň energiýasy daşky sreda bilen täsir netijesinde barha kemelýär. Eger daşky täsirler diňe sürtülme güýçleri bolsa, onda yrgyldaýan sistemanyň energiýasynyň ýitgileri diňe daşky sredanyň gyzmagyna getirerdi. Emma tejribeleriň görkezişi ýaly, daşky sreda diňe gyzmak bilen çäklenmeýär. Onda mejbury yrgyldylar-da ýüze çykýar. Sredanyň maýyşgaklyk häsiýetlerini nazara alyp, oňa käbir (bitewi) tutuş sreda görnüşinde garap bolýar. Birhilli sredany düzýän her bir bölejik (atomlar we molekulalar) töweregindäki bölejikler bilen ortaça deň täsirleşýär.

Olaryň käbiri başgalara görä ornundan gozgansa, garşylykly güýç döretjekdigi mälimdir. Şeýle güýçler **maýyşgak güýçlerdir** we Gukuň kanunyna eýerýändirler. Netijede her bir ornundan gozganan bölejik maýyşgak täsir arkaly beýleki golaý bölejiklere itergi berer, olar bolsa öz gezeginde ýene başgalara itergi berip biler we ş.m.

Yrgyldynyň ýa-da islendik mehaniki oýanmanyň maýyşgak sredada ýaýramagyna maýyşgak ýa-da mehaniki tolkunlar diýilýär. Maýyşgak sreda täsir edip, şol oýanmalary döredýän jisime bolsa **maýyşgak tolkunlaryň çeşmesi** diýilýär. Tolkunyň ýaýramagy her bölejigiň öz deňagramlyk ýagdaýynyň golaýynda yrgyldamagy bilen çäklenýär we maddanyň süýşmesini aňladýan däldir. Tolkunyň ýaýramagynyň özge mehaniki hereketlerden tapawudy, giňişligiň bir nokadyndan başga nokadyna, maddanyň däl-de, diňe yrgyldy hereketiň we oňa degişli energiýanyň geçirilmegidir.

Eger sredanyň bölejikleriniň yrgyldyly hereketi tolkunyň ýaýraýyş ugruna gabat gelýän bolsa, onda şeýle tolkunlara **boý tolkunlar** diýilýär. Boý tolkunlar maýyşgak sredanyň göwrümleýin deformasiýasyna bagly. Şoňa görä-de olar gaty, suwuk we gaz halyndaky sredalarda ýaýrap biler. Ses tolkunlarynyň howada ýaýraýşy muňa mysal bolup biler.

Eger sredanyň yrgyldaýan bölejikleriniň hereketi ýaýraýyş ugruna perpendikulýar tekizliklerde bolup geçýän bolsa, onda oňa **kese tolkunlar** diýilýär.

Kese tolkunlar maýyşgak sredanyň süýşme deformasiýasyna baglydyr. Şonuň üçin hem olar, esasan gaty jisimlerde, ýagny görnüşi üýtgände maýyşgak güýçler döreýän jisimlerde ýaýrap biler. Bu babatda üst tolkunlarynyň öz aýratynlygy bardyr. Suwuklygyň erkin üstünde ýa-da garyşmaýan iki suwuklygy bölýän üstde, kese tokunlar ýaýrap biler. Şeýle tolkunlaryň üst boýunça ýaýramagyny üpjün etmekde üst dartyş güýçleriniň we agyrlyk güýçleriniň uly ähmiýeti bardyr. Üstüň her bir bölejigi hem boý tolkunlaryň, hem-de kese tolkunlaryň ýaýraýşyna gatnaşýar. Şoňa görä-de üstüň her nokady elliptik ýa-da has çylşyrymly traýektoriýalar boýunça hereket edýär.

Tolkuna degişli yrgyldylar garmoniki bolsalar, onda şol tolkuna **sinusoidal** ýa-da garmoniki tolkunlar diýilýär.

Tolkun ýaýranda ony häsiýetlendirýän skalýar ýa-da wektor ululyklaryň koordinata we wagta baglanyşygyny görkezýän aňlatma maýyşgak tolkunyň deňlemesi diýilýär.

Islendik nokadyna geçirilen galtaşma tolkunyň ýaýraýyş ugry bilen gabat gelýän çyzyga şöhle diýilýär. Birhilli sredada şöhle gönüdir we kese tolkun ýaýranda ol sredanyň bölejikleriniň yrgyldaýan tekizliginde ýatýandyr. Emma göni şöhläniň üstünden köp tekizlik geçirip bolar. Bölejikler bir wagtda özara perpendikulýar iki tekizlikde yrgyldap bilýär. Şoňa görä-de, sinusoidal tolkunlaryň tekiz, elliptik we töwerek boýunça polýarlanyp ýaýramagy mümkin. Tolkunyň ýaýrama ugry boýunça dürli bölejikler şol bir meňzeş kanunalaýyklykda yrgyldasalar-da, olaryň yrgyldy fazalary çeşmeden uzaklygyna görä üýtgeýär. Deň fazada yrgyldaýan iň golaý iki bölejigiň aradaşlygyna **tolkun uzynlygy** (λ) diýilýär. Tolkun uzynlygy yrgyldynyň anyk fazasynyň bir doly yrgyldynyň periodynyň içinde ýaýrap geçýän aralygyna deňdir:

$$\lambda = \upsilon T \quad \text{ýa-da} \quad \upsilon = \lambda \nu, \tag{6.18}$$

bu ýerde ν – yrgyldynyň ýygylygy.

6.7. Tekiz tolkunlar

Yrgyldylaryň giňişlikde ýaýrap, t pursata çenli ýeten nokatlarynyň geometrik ýerleşmesine tolkunyň fronty ýa-da tolkun üsti diýilýär. Tolkun üstüň ähli nokatlary deň fazaly yrgyldaýar. Birhilli we izotrop sredada tolkun üstleri şöhlä perpendikulýar (ortogonal) bolýar. Eger tolkun üstler özara parallel tekizlikler görnüşinde bolsalar, onda bular ýaly tolkuna **tekiz tolkun** diýilýär.

Tekiz tolkun x okuň ugruna ýitgisiz ýaýraýan bolsa, onda şol ugurdaky ähli bölejikler deň kanun boýunça yrgyldar. Emma olaryň yrgyldylary, x-iň artmagy bilen barha giç başlanyp, çeşmeden uzaklaşdygyça fazalary boýunça yza galýar.

Eger çeşme koordinatalar başlangyjynda ýerleşip, onuň yrgyldysy garmoniki kanuna eýerýän bolsa, onda çeşmäniň yrgyldysyny şeýle aňladyp bolar:

$$\xi(0, t) = A\cos\omega t. \tag{6.19}$$

Tolkun υ tizlik bilen ýaýrap x nokada ýetýänçä $\tau = \frac{x}{\upsilon}$ wagt geçer. Ýagny, sredanyň bölejikleriniň yrgyldysy koordinata we wagta bagly bolar:

$$\xi(x, A) = A\cos\omega\left(t - \frac{x}{\upsilon}\right). \tag{6.20}$$

Tolkun x oka ters ugra ýaýraýan bolsa:

$$\xi(x, t) = A\cos\omega\left(t + \frac{x}{\upsilon}\right), \tag{6.21}$$

bu ýerde A – tolkunyň amplitudasy, $\omega = \frac{2\pi}{T}$ – tolkunyň aýlaw ýygylygy, T – yrgyldynyň periody.

Bu deňlemelere tekiz sinusoidal tolkunyň deňlemesi diýilýär. Tolkun ýaýranda energiýa geçirilýänligi sebäpli, deňlemä **ylgaýjy tolkunyň deňlemesi-de** diýilýär. Umuman, deňlemäni şeýle ýazyp bolar:

$$\xi(x, t) = A\cos\left[\omega\left(t - \frac{x}{t}\right) + \varphi_0\right] = A\cos\left(\omega t - \frac{\omega x}{\upsilon} + \varphi_0\right)$$

ýa-da

$$\xi(x, t) = A\cos\left[\frac{2\pi t}{T} - \frac{2\pi x}{(T\upsilon)} + \varphi_0\right], \tag{6.22}$$

bu ýerde φ_0 – çeşmäniň yrgyldysynyň başlangyç fazasy, $\varphi = \omega t - \frac{\omega x}{\upsilon} + \varphi_0$ – tekiz tolkunyň fazasy.

Sinusoidal tolkuny häsiýetlendirmek üçin tolkun sany diýilýän düşünje girizilýär:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{\upsilon T} = \frac{\omega}{\upsilon}.$$

Onda tekiz sinusoidal tolkunyň deňlemesi şeýle görnüşde bolar:

$$\xi(x, t) = A\cos(\omega t - kx + \varphi_0). \tag{6.23}$$

Moduly boýunça tolkun sana deň we şöhle bilen ugurdaş wektor ululyga **tolkun wektory** diýilýär. Biziň garaýan şertlerimizde:

$$\vec{k} = k\vec{i} \quad \text{ýa-da} \quad kx = \vec{k}\vec{r},$$

bu ýerde $\vec{r}$ – yrgyldaýan nokadyň radius-wektory, $\vec{i}$ – birlik wektor.

Şeýlelikde

$$\xi(x, t) = A\cos(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \varphi_0). \tag{6.24}$$

Eýleriň formulasyndan peýdalanyp, şeýle ýazyp bileris:

$$\xi(x, t) = Ae^{i(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \varphi_0)}. \tag{6.25}$$

Eger tolkun üstleri umumy merkezli (konsentrik) sferalar görnüşde bolsalar, onda bular ýaly tolkuna **sferik tolkun** diýilýär. Merkezden ähli tarapa ýaýraýan sinusoidal sferik tolkunyň deňlemesi şeýle görnüşde bolar:

$$\xi(r,t) = A(r)\cos(\omega t - \vec{k}\vec{x} + \varphi_0), \tag{6.26}$$

bu ýerde $A(r)$ – tolkunyň radiusa bagly amplitudasy, $\vec{k}\vec{r}$ – merkezden geçirilen radius-wektor.

Hakyky şertlerde tolkun çeşmesiniň gerimi bardyr we belli bir giňişligi eýeleýär.

Emma çeşmeden uzakda ony nokatlanç hasap edip bolar. Tolkun üstüň kiçi bölegine bolsa tekiz tolkun hökmünde garap bolar.

Tolkunlaryň birhilli we izotropik sredada ýitgisiz ýaýramagyny hususy önümli differensial deňleme arkaly aňladyp bolar:

$$\nabla^2 \xi - \frac{1}{\upsilon^2}\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = 0, \tag{6.27}$$

bu ýerde υ – tolkunyň fazalaýyn tizligi, $\nabla^2 = \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – Laplasyň operatory.

x – oky boýunça ýaýraýan tekiz tolkun üçin bu deňleme ýönekeýleşer:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{\upsilon^2}\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}.$$

Sinusoidal tolkunyň anyk bir fazasyna degişli üstüň giňişlikdäki orun üýtgediş tizligine fazalaýyn tizlik diýilýär. Şol üste degişli faza hemişelikdir, ýagny

$$\omega t - \vec{k}\vec{r} + \varphi_0 = const$$

ýa-da

$$\frac{dr}{dt} = \upsilon = \frac{\omega}{k}.$$

Görnüşi ýaly, sinusoidal tolkunlaryň fazalaýyn tizligi olaryň ýygylygyna bagly. Bu hadysa **tolkunlaryň dispersiýasy**, ony ýüze çykarýan sreda bolsa **dispergirleýji sreda** diýilýär. Tejribeleriň tassyklamasyna görä, ses tolkunlarynyň gazlardaky tizligi, adatça, ýygylyga bagly däldir we $\upsilon = \sqrt{\gamma RT/\mu}$ aňlatma bilen kesgitlenýär. Bu ýerde $\gamma = C_p/C_V$ – sreda üçin hemişelik basyşdaky udel ýylylyk sygymyň hemişeligi göwrümdäki ýylylyk sygymyna gatnaşygy, R – uniwersal gaz hemişeligi, T – termodinamiki temperatura, μ – sredanyň molýar massasy.

Eger, sreda daşyndan täsir bar bolsa we ol täsir zerarly sredanyň ýagdaýynyň üýtgemesi gönüden-göni baglanyşykda bolsa, onda sreda birhilli diýilýär. Mysal üçin, maýyşgak sredada, gowşagrak gozgaýyşlarda ýüze çykýan güýçler, şol gozganyşlaryň ululygyna gönümel baglydyr. Şeýle sredalarda tolkunyň tizligi onuň intensiwligine bagly bolmansoň, birnäçe tolkun özbaşdak ýaýrap bilýär.

6.8. Tolkunlaryň superpozisiýasy. Interferensiýa

Göni baglanyşykly sistemada ençeme tolkunyň bilelikde ýaýramagy netijesindäki gozganyş, şol tolkunlaryň aýry-aýrylykda ýaýrandaky gozganyşlarynyň jemine deňdir. Bu tassyklama **tolkunlaryň superpozisiýa prinsipi** diýilýär.

Tolkunlaryň superpozisiýa prinsipiniň esasynda islendik sinusoidal däl tolkuna, ençeme sinusoidal tolkunlaryň meňzeş ýygyndysy hökmünde, ýagny **tolkunlaryň topary** (gruppasy) ýa-da **tolkunlar dessesi** (paketi) görnüşinde garap bileris. Şol dürli ýygylykly sinusoidal tolkunlaryň ähli ýygylyklarynyň bileligine bolsa **tolkunyň spektri** diýilýär.

Sinusoidal däl tolkunyň spektrine girýän ähli ýygylykdaky sinusoidal tolkunlar dispergirlemeýän sredada deň fazalaýyn tizlik bilen ýaýraýar we tolkunyň görnüşi (sudury) saklanýar.

Emma dispergirlenýän sredada tolkunlar dessesini düzüji, dürli ýygylykly, sinusoidal tolkunlar dürli tizlik bilen ýaýrap, gatyşyp başlarlar we signalyň görnüşi üýtgär.

Tolkunlar topary hökmünde deň amplitudaly, ýygylyklarynyň we tolkun sanlarynyň bahalary golaý bolan, iki tekiz tolkunyň bir ok boýunça bile ýaýramagy netijesinde döreýän kwazisinusoidal tekiz tolkuny almak bolar:

$$\xi(x, t) = 2A_0\cos(\omega t - kx) + A_0\cos[(\omega + d\omega)t - (k + dk)x],$$

$$\xi(x,t) = 2A_0\cos\left(\frac{tdt - xdk}{2}\right)\cos(\omega t - kx).$$

Şeýle tolkunyň sinusoidal tolkundan tapawudy, onuň amplitudasynyň x koordinata we t wagta baglylykda haýal üýtgemegidir. Onuň tizligi deregine amplitudasy hemişelik bolan käbir nokadyň orun üýtgediş u tizligi kabul edilýär. Şol nokat üçin:

$$td\omega - xdk = const.$$

Bu ýerden

$$u = \frac{dx}{dt} = \frac{d\omega}{dk}, \tag{6.28}$$

bu ýerde u – **toparlaýyn tizlik**.

Toparlaýyn tizlik, tolkunlaryň dispersiýasy ýok ýagdaýynda, energiýanyň äkidiliş tizligine deňdir. Toparlaýyn we fazalaýyn tizlikler özara baglanyşyklydyr.

Eger $\omega = \upsilon k$, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ we $dk = -\frac{2\pi}{\lambda^2}d\lambda$ bolsa, onda

$$u = \frac{d\omega}{dk} = \upsilon + k\frac{d\upsilon}{dk} = \upsilon - \lambda\frac{d\upsilon}{d\lambda}. \tag{6.29}$$

Tolkunlaryň interferensiýasy baradaky esasy düşünjelere seredeliň. **Wagtyň geçmegi bilen fazalarynyň tapawudy üýtgemeýän iki tolkuna kogerent tolkunlar, olaryň çeşmesine-de kogerent çeşmeler diýilýär.**

$$\xi_1 = A_1\cos\phi_1; \quad \xi_2 = A_2\cos\phi_2$$

kogerent iki tolkunyň biri-biriniň üstüne düşmegi netijesinde amplitudasy diňe koordinatalara bagly tolkun dörär:

$$\xi = \xi_1 - \xi_2 = A\cos\phi;$$

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\phi_1 - \phi_2); \tag{6.30}$$

$$\mathrm{tg}\phi = \frac{A_1\sin\phi_1 + A_2\sin\phi_2}{A_1\cos\phi_1 + A_2\cos\phi_2}; \tag{6.31}$$

$$\phi_2 - \phi_1 = (\omega_2 - \omega_1)t - \left(\frac{\omega_2 r_2}{\upsilon_2} - \frac{\omega_1 r_1}{\upsilon_1}\right) + (\varphi_2 - \varphi_1).$$

Eger $\omega_2 = \omega_1$ bolsa, onda

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos\left[k\Delta + (\varphi_1 - \varphi_2)\right].$$

Bu ýerde $\Delta = r_2 - r_1$ – tolkunlaryň geçen ýollarynyň geometrik tapawudy.

Görnüşi ýaly, Δ-nyň üýtgemegi bilen $\cos[k\Delta + (\varphi_2 - \varphi_1)]$-iň bahasy –1-den +1-e çenli aralykda dürli bahalara eýe bolup biler.

Eger

$$k\Delta + (\varphi_2 - \varphi_1) = \pm 2m\pi, \quad (m = 0, 1, 2, ...)$$

ýa-da

$$\Delta = \pm m\lambda + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2\pi}\lambda \tag{6.32}$$

bolsa, onda $A = A_1 + A_2$.

Ýagny, amplituda iň uly (maksimal) baha eýedir. Başlangyç fazalar φ_2 we φ_1 özara deň bolsa:

$$\Delta = \pm m\lambda. \tag{6.33}$$

Edil şonuň ýaly, amplitudanyň iň kiçi (minimal) bahasyna degişli Δ ululygy hem kesgitläp bolar:

$$\Delta = \pm(2m - 1)\frac{\lambda}{2} + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2\pi}\lambda \quad \text{ýa-da} \quad \varphi_2 = \varphi_1$$

bolsa

$$\Delta = \pm(2m - 1)\frac{\lambda}{2}.$$

Kogerent tolkunlaryň biri-biriniň üstüne düşmegi zerarly fazalaryna baglylykda olaryň biri-birini käbir nokatlarda güýçlendirmegine, käbir nokatlarda bolsa gowşatmagyna interferensiýa diýilýär. Bu hadysa wagta görä durnuklydyr.

Eger $\phi_2 - \phi_1 = \pm 2m\pi$, ýagny fazalarynyň tapawudy jübüt π sana deň bolsa, onda şol nokatlarda interferensiýa maksimumlary ýüze çykýar.

Eger $\phi_2 - \phi_1 = \pm(2m + 1)\pi$, ýagny fazalaryň tapawudy täk π sana deň bolsa, onda interferensiýa minimumlary ýüze çykýar.

Bu ýerde $m = 0, 1, 2, 3, ...$, ýagny islendik bütin san. Oňa **interferensiýa maksimumynyň ýa-da minimumynyň tertip sany** diýilýär.

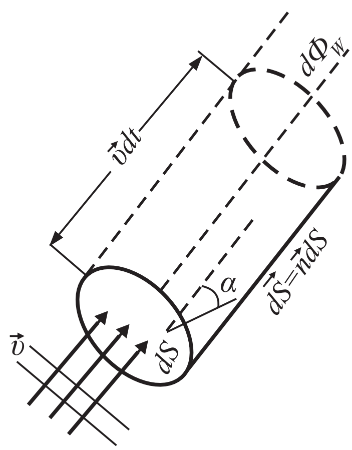
Tolkunlaryň interferensiýasynyň aýratyn bir görnüşi durgun tolkunlaryň emele gelmegidir.

Durgun tolkun diýlip, biri-birine garşylykly ýaýraýan iki sany kogerent we sinusoidal akaba tolkunlaryň goşulyp emele getirýän tolkunyna aýdylýar. Kese tolkunlaryň polýarlanyşy-da deň bolmalydyr. Tekiz tolkunlar goşulanda emele gelýän durgun tolkunyň deňlemesi aşakdaky görnüşe eýedir:

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 = 2A\cos kx \cos \omega t.$$

Durgun tolkunyň amplitudasynyň nola deň nokatlaryna onuň **düwünleri** diýilýär. Amplitudanyň maksimal ($A_m = 2A$) nokatlaryna bolsa durgun tolkunyň desseleri diýilýär. Iki goňşy düwnüň ýa-da dessäniň aradaşlygyna durgun tolkunyň uzynlygy diýilýär.

Mysal üçin, dartylgy taryň berkidilen uçlaryndan serpigýän kese tolkunlar **durgun tolkunlary** döredip bilýär. Boý tolkun bolsa islendik maýyşgak sredada, onuň serpikdiriji üstleriniň bar mahaly, durgun tolkun döredip biler. Emma elmydama iki serpikdiriji nokatlaryň arasy ýaýraýan tolkunyň uzynlygynyň ýarsyna galyndysyz bölünmelidir. Durgun tolkun dörände energiýa göçürilmeýär.



6.11-nji çyzgy

Ähli akaba tolkunlarynyň ýaýramagy energiýanyň geçirilişi bilen baglydyr. Tükeniksiz kiçi dS meýdandan tükeniksiz kiçi dt wagtda geçýän dW energiýanyň şol möhlete gatnaşygyna energiýanyň akymy ($d\Phi_W$) diýilýär (*6.11-nji çyzgy*):

$$d\Phi_W = \frac{dW}{dt}.$$

Elbetde, geçýän energiýa dt wagtda $\vec{\upsilon}dt$ ýol geçer. Onda energiýanyň göwrümleýin dykyzlygyny w arkaly belläp alarys:

$$dw = \omega \upsilon dt dS \cos\alpha t,$$

$$d\Phi_W = \omega(\vec{\upsilon}d\vec{S}) = (\vec{U}d\vec{S}), \tag{6.34}$$

bu ýerde $\vec{U} = \omega\vec{\upsilon}$ – Umowyň wektory.

Umowyň wektorynyň ortaça bahasynyň modulyna deň skalýar ululyga **tolkunyň intensiwligi** diýilýär:

$$I = |\langle U \rangle|. \tag{6.35}$$

6.9. Ses. Ultrases

Ses gaz halyndaky, suwuk we gaty sredalarda tolkun görnüşinde ýaýraýan maýyşgak sredanyň bölejikleriniň yrgyldyly hereketidir. Sese adamyň we haýwanlaryň eşidiş organlary tarapyndan duýulýan hadysa diýmek hem bolar. Adam 16 *Gs*-den 20 *kGs*-e çenli aralykdaky sesleri eşidýär. 16 *Gs*-den pes ýygylykly sese **infrases** diýilýär. Ýygylygy 20 *kGs*-den ýokary bolan sese **ultrases** diýilýär. Bu sesleri adamyň gulagy eşitmeýär.

Ses tolkunlarynyň ýaýramagy üçin sredanyň maýyşgak bolmagy zerurdyr. Gaty jisimler gysylma (süýnme) deformasiýa üçin hem, süýşme deformasiýasy üçin hem maýyşgakdyr. Şeýle bolansoň gaty jisimlerde ses tolkunlary boý we kese görnüşlerde bolup bilýär. Gazlarda we suwuklyklarda ses tolkunlary diňe boý tolkun görnüşinde ýaýraýar. Sebäbi bu sredalar diňe gysylma (süýşme) deformasiýasy üçin maýyşgakdyr.

Kesgitli ýerde basyşyň üýtgemegini ýa-da mehaniki napryýaženiýe döredýän hadysalar ses çeşmeleridir. Yrgyldaýan gaty jisimler (reproduktoryň, telefonyň membranasy, saz gurallarynyň tarlary we ş.m.) ses çeşmesi hökmünde giňden ýaýrandyr.

Yrgyldaýan jisim özüni gurşap alan sredanyň bölejiklerini öz ýygylygy bilen yrgyldamaga mejbur edýär. Bu bölejikler hem özleriniň goňşy bölejiklerini yrgyldamaga mejbur edýär we netijede sreda boýunça ses tolkuny ýaýraýar.

Gazlarda sesiň ýaýraýyş tizligi

$$\upsilon = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}} \tag{6.36}$$

formula bilen kesgitlenýär. Bu ýerde R – uniwersal gaz hemişeligi; μ – molýar massa, $\gamma = C_p/C_V$ – gazyň hemişelik basyşdaky we göwrümdäki molýar ýylylyk sygymlarynyň gatnaşygy, T – termodinamiki temperatura.

(6.36) formuladan görünişi ýaly, sesiň ýaýraýyş tizligi termodinamiki temperaturadan alnan kwadrat köke göni proporsional, molýar massadan alnan kwadrat köke bolsa ters proporsional. Tejribeleriň maglumatlary bilen (6.36) aňlatma gowy ylalaşýar. Meselem, sesiň tizligi otag temperaturasynda howada $\upsilon = 331 m/s$ ($\mu = 29 \cdot 10^{-3}\ kg/mol$), wodorodda $\upsilon = 1260\ m/s$ ($\mu = 2 \cdot 10^{-3}\ kg/mol$).

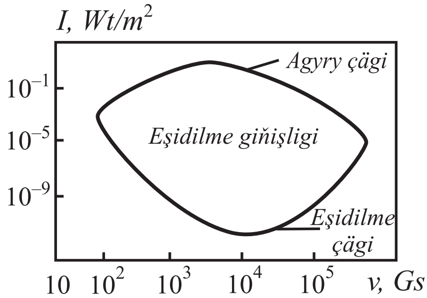
Sesiň energetiki häsiýetnamasy bolup **sesiň intensiwligi** diýilýän ululyk hyzmat edýär. Wagt birliginde sesiň ýaýraýan ugruna perpendikulýar ýerleşen birlik tekizlikden ses tolkunynyň geçirýän energiýasyna deň ululyga sesiň intensiwligi diýilýär:

$$I = \frac{W}{St}.$$

Intensiwligiň ölçeg birligi: Wt/m^2.

Adamyň gulagy diňe käbir iň kiçi bahadan ýokary intensiwlikli sesleri kabul etmäge ukyplydyr. Bu çägi kesgitleýän intensiwlige eşidilme çägi diýilýär (*6.12-nji çyzgy*). Eşidilme çägi hemme adamlar üçin deň däldir, şeýle-de ýygylyga baglydyr.

Sesiň intensiwligi käbir kesgitli bahadan geçende ses eşidilmeýär. Bu çäge **agyry duýgusynyň çägi** diýilýär. Bu görkeziji hem ýygylyga baglydyr. 6.12-nji çyzgyda bu çägiň ýygylyga baglylygynyň grafigi görkezilen.



6.12-nji çyzgy

Sesiň birnäçe subýektiw häsiýetnamalary bar. Olara **sesiň gatylyk derejesi, belentligi we tembri** degişlidir. Bu görkezijiler fiziki parametrler bilen baglanşykda kesgitlenýär.

6.12-nji çyzgydan görnüşi ýaly, sesiň intensiwligi ýygylyga baglylykda geometrik progressiýa boýunça üýtgeýär. Sesiň *L* gatylyk derejesi bolsa ýygylyga bagly has haýal üýtgeýär. Sesiň gatylygynyň intensiwlik bilen baglanyşygy aşakdaky ýalydyr:

$$L = \lg \frac{I}{I_0},$$

bu ýerde I_0 – ähli sesler üçin kabul edilen eşidilme çägindäki sesiň intensiwligidir. San bahasy: 10^{-12} Wt/m^2.

Gatylyk derejesiniň ölçeg birligi: bel (*B*). Adatça mundan on esse kiçi desibel (*dB*) diýen birlikden peýdalanylýar. Intensiwligiň bahasyny desibelde almak üçin

$$L = 10\ 1\text{g} \frac{I}{I_0}$$

formula ulanylýar. Bu formula ulanylyp hasaplanylanda, intensiwligiň adamyň gulagyna täsir edýän çäginde ($10^{-12} \div 10$ Wt/m^2) sesiň gatylygynyň derejesi noldan 130 *dB*-e çenli üýtgeýär. Mysal üçin, pyşyrdynyň gatylyk derejesi 30 *dB*, duran traktoryň motorynyň sesi (1 metrden) – 90 *dB*, uçaryň motorynyň sesi (5 metrden) – 120 *dB*.

Tebigatdaky sesler ýönekeý gormoniki yrgyldylaryň ýaýramagy däldir. Olar birnäçe gormonikalaryň jeminiň döredýän sesidir. Berlen sesiň düzüminde bar bolan yrgyldylaryň ýygylyklarynyň toplumyna **akustiki spektr** diýilýär. Akustiki spektr bütewi we çyzykly görnüşlerde bolup bilýär.

Sesiň belentligi onuň ýygylygyna bagly görkezijidir. Belent sese degişli ýygylyk hem ýokarydyr.

Akustiki spektriň düzümindäki ýygylyklaryň aýratynlyklary, kesgitli ýygylyklaryň arasyndaky energiýanyň paýlanyşy sesiň tembrini kesgitleýär. Şol bir esasy ýygylykda aýdym ýerine ýetirýän aýdymçylaryň sesleri tembri boýunça tapawutlanyp bilýär.

Ozal belläp geçişimiz ýaly, ýygylygy $2 \cdot 10^4$ *Gs*-den ýokary bolan maýyşgak tolkunlara ultrases diýilýär.Ýygylygynyň ýokarylygy, tolkun uzynlygynyň gysgalygy sebäpli ultrases üýtgeşik häsiýetleri ýüze çykarýar.

Tehnikada ultrases, esasan, iki hadysanyň esasynda işleýän gurluşlaryň kömegi bilen alynýar. Ol hadysalar – göwrümleýin pýezoelektrik effekti we magnitostriksiýadyr. Kwars (ýa-da onuň bilen häsiýetdeş) plastinka elektrik meýdanyna ýerleşdirilende deformasiýa ýüze çykýar. Bu hadysa pýezoelektrik effekti diýilýär. Kwars plastinkasy üýtgeýän elektrik meýdanynda ýerleşdirilende, meýdanyň ýygylygy rezonans ýygylyga deň bolanda ýokary ýygylykly ultrases tolkuny döreýär. Şu esasda ultrases generatorlary ýasalýar.

Magnit meýdanynyň täsiri bilen ferromagnitlerde deformasiýanyň ýüze çykmagyna magnitostriksiýa diýilýär. Ferromagnit sterženi ýokary ýygylykda üýtgeýän magnit meýdanynda ýerleşdirip şonuň ýaly ýygylykly maýyşgak yrgyldyny – ultrasesi alyp bolýar. Bu gurluşlarda ultrasesi ýagtylyk dessesi ýaly gönükdirilen görnüşde hem almak mümkindir.

Ultrases tehnikada giňden ulanylýar. Maddalarda ultrasesiň ýaýraýyş tizligini we ýuwdylma koeffisiýentini ölçäp, maddanyň maýyşgaklyk modulyny we birnäçe dissipatiw häsiýetnamalaryny kesgitläp bolýar. Şeýle-de şu usul bilen suwuklyklarda we gazlarda geçýän prosesleriň derňewi amala aşyrylýar. Dürli sredalaryň araçäginde ultrasesiň serpikmesi öwrenilip, ultrases priborlarynyň kömegi bilen detallaryň örän kiçi ölçegleri kesgitlenýär, olardaky şikesler ýüze çykarylýar. Ultrases mikroskoplarynyň kömegi bilen optiki taýdan dury bolmadyk obýektlerde ölçegler geçirip bolýar. Ultrasesiň serpikmesinden peýdalanyp, howadaky ýa-da suwdaky jisimleriň koordinatlaryny we ölçeglerini kesgitläp bolýar.

Ýokary intensiwlikli ultrasesi ulanmak bilen metallurgiýada ýylylyk we massa çalyşmasy bilen baglanyşykly prosesleri tizleşdirip bolýar. Birhilliligi ýokary bolan metallary alyp bolýar.

Ultrases biologiýada we medisinada hem giňden ulanylýar. Biologiki obýektlere ultrases täsir edende akustiki energiýa ýylylyk energiýasyna öwrülýär. Ol bolsa maddada çalyşma prosesini ýokarlandyrýar. Medisinada ultrases içki organlaryň kesellerini anyklamak üçin, şeýle-de bejeriş maksatlary üçin ulanylýar.

Ultrasesiň ýarymgeçitijilere täsirleri öwrenilip, elektronikanyň täze bir ugry-akustoelektronika döredi. Onuň gazananlary mikroradioelektronikada signal – habarlary özleşdirýän priborlary döretmäge mümkinçilik berdi.

6.10. Dopleriň effekti

Yrgyldy çeşmesiniň we kabuledijiniň biri-birine görä hereket etmegi netijesinde kabuledijiniň alýan tolkunynyň ýygylygynyň üýtgemegine Dopleriň effekti diýilýär. Meselem, stansiýa golaýlaýan otlynyň, stansiýadan daşlaşýan otlynyň ýa-da duran otlynyň guguldylarynyň tapawudyny adamyň gulagy duýýar. Ol üç sesiň-de ýygylyklary dürlüdir. Goý, çeşme we kabulediji bir **göni çyzygyň** ugry boýunça υ_r we υ_k tizlikler bilen hereket edýän bolsun. Çeşme we kabul ediji biri-birine golaýlaşýan bolsa tizlikleri položitel, daşlaşýan bolsa otrisatel diýip kabul edeliň. Çeşmäniň yrgyldysynyň ýygylygy ν_0 bolsun. Aşakdaky ýagdaýlara seredeliň:

1. Kabulediji çeşmä tarap hereket edýär, çeşme hereketsiz. Ýagny $\upsilon_k > 0$; $\upsilon_r = 0$. Bu ýagdaýda kabuledijä görä tolkunyň tizligi $\upsilon + \upsilon_k$ bolar. Tolkunyň sredadaky uzynlygy üýtgemez: $\lambda = \lambda_0 = \dfrac{\upsilon}{\nu_0}$. Onda

$$\nu = \frac{\upsilon + \upsilon_k}{\lambda} = \frac{\upsilon + \upsilon_k}{\upsilon T} = \frac{(\upsilon + \upsilon_2)\nu_0}{\upsilon}.$$

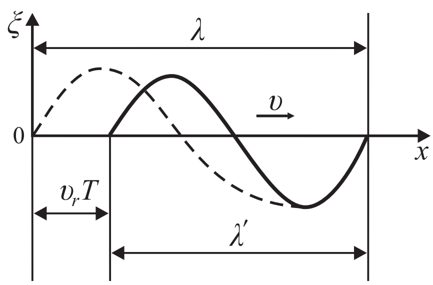
Kabulediji üçin tolkunyň ýygylygy $\dfrac{\upsilon + \upsilon_k}{\upsilon}$ esse köp bolar.

2. Çeşme kabuledijä tarap hereket edýär, kabulediji hereketsiz, ýagny $\upsilon_k = 0$; $\upsilon_r > 0$. Yrgyldynyň ýaýramak tizligi sreda bagly. Yrgyldynyň periodyna deň bolan wagt aralygynda tolkun kabuledijä tarap υT aralygy geçer. Bu aralyk çeşme hereketlenmedik ýagdaýyndaky tolkun uzynlygydyr. Emma wagt aralygynda çeşme $\upsilon_r T$ aralyga süýşýär. Netijede tolkunyň uzynlygy gysgalýar we

$$\lambda' = \lambda - \upsilon_r T = (\upsilon - \upsilon_r)T.$$

Onda

$$\nu = \frac{\upsilon}{\lambda'} = \frac{\upsilon}{(\upsilon - \upsilon_r)T} = \frac{\nu_0 \nu}{\upsilon - \upsilon_r}.$$



6.13-nji çyzgy

Ýagny kabuledijä barýan tolkunyň ýygylygy $\dfrac{\upsilon}{\upsilon - \upsilon_r}$ esse ulalar (*6.13-nji çyzgy*). Birinji we ikinji ýagdaýlar üçin $\upsilon_r < 0$ we $\upsilon_k < 0$ bolsa ýokarky formulalardaky goşmak we aýyrmak alamatlary tersine bolar.

3. Çeşme we kabulediji biri-birine görä hereket edýän bolsun. 1 we 2 ýagdaýlardan peýdalanyp alarys:

$$\nu = \frac{(\upsilon \pm \upsilon_k)\nu_0}{\upsilon \mp \upsilon_r}.$$

Bu ýerde, sanawjydaky plýus we maýdalawjydaky minus çeşmäniň we kabuledijiniň golaýlaşmagyna degişlidir. Sanawjydaky minus we maýdalawjydaky plýus bolsa olaryň biri-birinden daşlaşmagyna degişlidir.

Formulalardan görnüşi ýaly, Dopleriň effekti diňe çeşme hereket edende, diňe kabulediji hereket edende ýa-da olar bile hereket edende dürlüdir. Eger çeşme we kabulediji bir göni çyzygyň ugrunda hereket etmese, onda hasaplama çylşyrymlaşýar. Bu ýagdaýda tizlikleriň çeşme bilen kabuledijini birikdirýän göni çyzyga proýeksiýalary ulanylýar.

Goý, sreda görä çeşme υ_r, kabulediji bolsa υ_k tizlikli islendik ugur boýunça hereket edýän bolsun. Eger tolkunyň sredada ýaýraýyş tizligi υ bolsa, onda tizlikleriň otnositellik prinsipine görä alarys:

$$\nu = \nu_0 \frac{1 + \frac{\upsilon_2}{\upsilon}\cos\theta_2}{1 + \frac{\upsilon_1}{\upsilon}\cos\theta_1},$$

bu ýerde $\vec{\upsilon_1}$ we $\vec{\upsilon_2}$ wektorlaýň $\vec{\upsilon}$ wektor bilen emele getirýän burçlary θ_1 we θ_2 burçlardyr.

Dopleriň effekti, ses çeşmeleriniň hereket edýän mahaly diňleýji üçin aýdyň ýüze çykýar. Ses çeşmesi diňleýjä tarap hereket etse, sesiň ýygylygy ýokarlanýar, ol daşlaşanda bolsa – peselýär.

VII BAP. TUTUŞ SREDANYŇ MEHANIKASYNYŇ ELEMENTLERI

7.1. Suwuklyklaryň we gazlaryň umumy häsiýetleri

Gaz molekulalarynyň arasynda özara täsiriň ujypsyzlygy zerarly olar tertipsiz (haotik) hereketdedir. Molekulalaryň hereketleri erkindir. Molekulalar biri-biri bilen çakyşma netijesinde dürli taraplara zyňylýarlar we berlen göwrümiň hemme ýerine ýaýraýarlar. Şonuň üçin hem gazyň göwrümi deregine onuň ýerleşen gabynyň göwrümi kabul edilýär. Suwuklyklar özüni çäklendirýän üstüň formasyny kabul edýärler.

Suwuklyklarda gazlardan tapawutlylykda molekulalaryň özara täsir güýçleriniň ululygy netijesinde molekulalaryň arasynda uzaklyklar, takmynan deňdir. Şonuň üçin hem suwuklyklaryň üýtgewsiz öz göwrümi bardyr. Suwuklyklaryň we gazlaryň häsiýetlerinde düýpli tapawutlaryň barlygyna seretmezden, birnäçe mehaniki hadysalarda, olaryň häsiýetleri şol bir parametrler we deňlemeler bilen añladylýar. Mehanikanyň gazlary we suwuklyklary öwrenýän bölümine **gidroaeromehanika** diýilýär. Onda birmeňzeş usullar bilen gazlaryň we suwuklyklaryň hereketi we deňagramlylygy, özara täsirleri, olaryň gaty jisimler bilen täsirleri öwrenilýär.

Mehanikada gazlar ýa-da suwuklyklar ýerleşen giňişligine üznüksiz ýaýran, bütewi sreda hökmünde kabul edilýär. Suwuklyklaryň dykyzlygy basyşa bagly kän üýtgemeýär. Gazlaryň dykyzlygy bolsa basyşa baglydyr. Birnäçe meseleler çözülende suwuklyklaryň we gazlaryň gysylmasyny hasaba almasaň hem bolýandygy tejribelerde anyklanandyr we şol sebäpli gysylmaýan suwuklyk diýilýän düşünje girizilýär hem-de ondan peýdalanylýar. Dynçlykda duran suwuklygyň içine ΔS meýdanly ýuka plastinka ýerleşdirsek, onuň iki tarapynadan ΔF güýç täsir edýär. Bu iki güýjüň ululyklary deňdir we ugurlary garşylyklydyrlar. Şol sebäpli plastinka dynçlykda galýar.

Berlen ΔS meýdança suwuklyk tarapyndan täsir edýän ΔF güýjüň şol meýdanyň ululygyna gatnaşygy bilen ölçenýän fiziki ululyga suwuklygyň basyşy diýilýär:

$$p = \frac{\Delta F}{\Delta S}. \tag{7.1}$$

Basyşyň ölçeg birligi paskaldyr (Pa). $1N$ normal güýç bilen $1m^2$ meydana täsir edilende ýüze çykýan basyş 1 paskaldyr.

Deňagramlaşan haldaky gazlar we suwuklyklar üçin basyş **Paskalyň kanunyna** boýun egýär: **dynçlykdaky suwuklygyň (gazyň) islendik nokadynda basyş hemme tarapa deň ugrukdyrylandyr we deň geçirilýändir.**

Dynçlykdaky suwuklygyň agramynyň onuň basyş döretmek täsirine seredeliň. Deňagramly halda suwuklykda gorizontal ugur boýunça basyş üýtgemeýär. Şol sebäbe görä suwuklygyň üsti gorizontal ýagdaýda bolýar. Eger suwuklyk gysylmaýan bolsa, onda onuň dykyzlygy basyşa bagly däldir. Suwuklyk sütüniniň beýikligini h, kese-kesiginiň meýdanyny S, dykyzlygyny ρ bilen belläliň.

Beýle suwuklyk sütüniniň agramy $P = \rho g S h$.

Onuň aşaky esasa edýän basyşy $P = \frac{\rho}{S} S g h = \rho g h.$

Bu ýerde g – erkin gaçmanyň tizlenmesi. Görnüşi ýaly basyş beýiklige gönümel baglydyr. $\rho g h$ basyşa **gidrostatiki basyş** diýilýär.

Soňky formula laýyklykda suwuklygyň aşaky gatlaklaryndaky basyş güýji ýokarky gatlaklardakydan uludyr. Şonuň üçin hem suwa çümdürilen jisime ýokaryk ugrukdyrylan **Arhimediň güýji** täsir edýär.

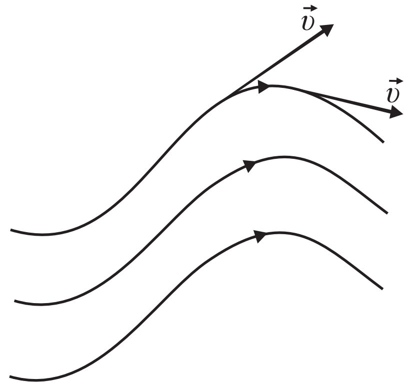
Arhimediň kanuny: suwuklyga (gaza) çümdürilen jisim öz göwrümine deň göwrümli suwuklygy (gazy) gysyp çykarýar we oňa şol göwrümdäki suwuklygyň (gazyň) agramyna deň bolan we ýokarlygyna ugrykdyrylan F_A güýç täsir edýär:

$$F_A = \rho g V, \tag{7.2}$$

bu ýerde V – suwa çümdirilen jisimiň göwrümi, F_A – Arhimediň güýji.

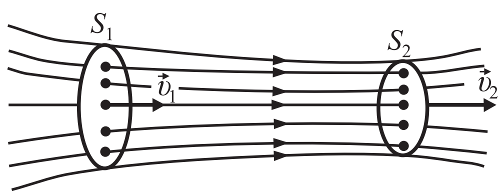
7.2. Suwuklyklaryň hereketiniň we deňagramlylygynyň deňlemesi

Suwuklykda ugurdaş hereket edýän bölejikleriň bileligine **akym** diýilýär. Suwuklygyň hereketi grafikde **akym çyzyklary** bilen aňladylýar. Akym çyzyklarynyň islendik nokadyna geçirilen galtaşma bilen suwuklygyň tizliginiň wektory gabat gelýär. Akym çyzyklarynyň gürlüginiň bahasy, ýagny çyzyklaryň sanynyň perpendikulýar tekizligiň meýdanyna bolan gatnaşygy, tizligiň uly ýerinde ýokarydyr we tersine tizligiň kiçi ýerinde pesdir. Akym çyzyklary suwuklygyň hereketiniň ýagdaýyny görkezýär (*7.1-nji çyzgy*).



7.1-nji çyzgy

Akym çyzyklary bilen gurşalan suwuklygyň bölegine **akym turbasy** diýilýär. Eger akym çyzyklarynyň görnüşi we ýerleşişi üýtgemeýän bolsa hem-de dürli nokatlaryň tizlikleri hemişelik bolsa, onda şeýle akyma **durnukly** ýa-da **stasionar akym** diýilýär. Haýsy hem bolsa bir akym turbasyny alalyň we onda iki sany S_1 we S_2, kese-kesigi saýlalyň (*7.2-nji çyzgy*).Wagtyň dt_1 aralygynda S_1 kese-kesikden suwuklygyň $S_1 dt_1 \upsilon_1$ göwrümi geçer. Diýmek, 1 sekuntda S_1 kesikden suwuklygyň $S_1\upsilon_1$ göwrümi geçer. Bu ýerde υ_1 – tizlik, ýagny S_1 kesikdäki suwuklygyň tizligi. Bir sekuntda S_2 kesikden geçjek suwuň göwrümi $S_2\upsilon_2$ bolar.



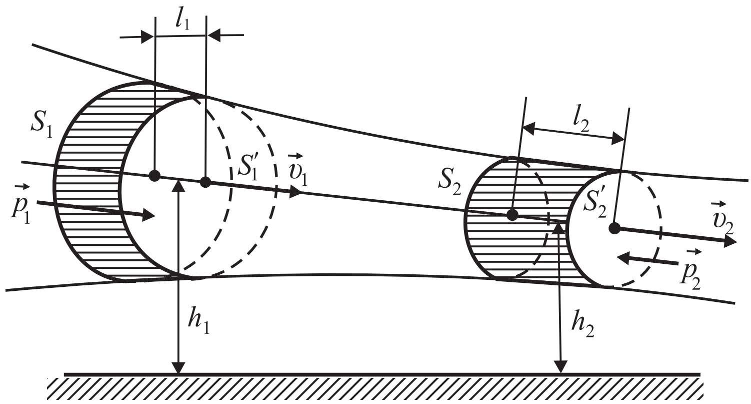
7.2-nji çyzgy

Bu ýerde υ_2 – kesigi S_2 meýdana deň bolan ýerdäki suwuklygyň tizligi. Suwuklygy gysylmaýan diýip kabul etsek, onda S_1 we S_2 kesiklerden geçen suwuklyklaryň göwrümleri deň bolar, ýagny

$$S_1\upsilon_1 = S_2\upsilon_2 = const. \tag{7.3}$$

Bu deňliklerden görnüşi ýaly, gysylmaýan suwuklyk üçin akym turbasynyň islendik ýerindäki tizligiň turbanyň kese-kesigine köpeltmek hasyly hemişelik ululykdyr. Bu gatnaşyga gysylmaýan suwuklyklar üçin **üznüksizligiň deňlemesi** diýilýär.

Içki sürtülmesi ýok bolan suwuklyklara **ideal suwuklyklar** diýilýär. Tebigatda ideal suwuklyklar ýokdur. Emma şeýle-de bolsa bu kanunalaýyklyklary ideal suwuklyk üçin tapyp, soňra hakyky suwuklyklar üçin düzediş girizmek üçin ulanmak amatly modeldir. Bu modelde akym çyzyklary bilen bölünýän birmeňzeş tizlikli böleklere gatlak görnüşde seredilýär. Hereket netijesinde gatlaklary bölýän üste galtaşýan çyzyk boýunça güýç ýüze çykýan bolsa, ol güýçler içki sürtülme



7.3-nji çyzgy

döredýärler. Içki sürtülme güýçleri ýüze çykarýan suwuklyklara **şepbeşik suwuklyklar** diýilýär.

Stasionar akymly ideal suwuklygyň akym tizliginden S_1 we S_2 kese-kesikleri saýlap alalyň (*7.3-nji çyzgy*).

Suwuklyk çepden saga akýar diýeliň. Goý, S_1 kesikdäki tizlik $\vec{\upsilon}_1$, basyş p_1, belentligi bolsa h_1 bolsun. Meňzeşlikden peýdalanyp S_2 kesik üçin υ_2 tizligi, p_2 basyşy we h_2 belentligi belläliň. Tükeniksiz kiçi dt wagtyň dowamynda suwuklyk S_1 we S_2 kesiklerdäki suwuklyk S_1' we S_2' kesiklere süýşüpdir diýeliň. Energiýanyň saklanma kanuny esasynda gysylmaýan ideal suwuklyk üçin doly energiýanyň üýtgemegi $E_2 - E_1$, massasy m bolan suwuklygy süýşürmek üçin edilen A işe deňdir:

$$E_2 - E_1 = A. \tag{7.4}$$

Bu ýerde E_1 we E_2 ideal suwuklygyň S_1 we S_2 kesiklerindäki doly energiýasy. Başga tarapdan bu iş dt wagtda S_1 we S_2 kesikleriň arasyndaky ähli suwuklygy süýşürmek üçin edilen işe deňdir. m massaly suwuklygy S_1 kesikden S_1' kesige geçirmek üçin suwuklyk $l_1 = \upsilon_1 dt$ aralyga süýşmeli, S_2 kesikden S_2' kesige geçmek üçin bolsa $l_2 = \upsilon_2 dt$ aralyga süýşmeli:

$$A = F_1 l_1 + F_2 l_2, \tag{7.5}$$

bu ýerde $F_1 = p_1 S_1$ we $F_2 = -p_2 S_2$. Dürli ugurlara ugruganlygy üçin güýçleriň alamaty garşylyklydyr.

E_1 we E_2 doly energiýalar m massaly suwuklygyň potensial we kinetik energiýalarynyň jemine deňdir:

$$E_1 = \frac{m\upsilon_1^2}{2} + mgh_1, \tag{7.6}$$

$$E_2 = \frac{m\upsilon_2^2}{2} + mgh_2. \tag{7.7}$$

(7.6) we (7.7) deňlikleri (7.4) deňlige goýup we (7.4) hem-de (7.5) deňlikleri deňeşdirip alarys:

$$\frac{m\upsilon_1^2}{2} + mgh_1 + p_1S_1\upsilon_1 dt = \frac{m\upsilon_2^2}{2} + mgh_2 + p_2S_2\upsilon_2 dt. \qquad (7.8)$$

Üznüksizligiň $S\upsilon = const$ (7.3) deňlemesine görä suwuklygyň göwrümi üýtgemeýär, ýagny $dV = S_1V_1dt = S_2V_2dt$.

Onda (7.8) deňligiň iki tarapyny-da göwrüme bölüp, $\frac{m}{V}$ dykyzlygyň ýerine ρ dykyzlygy goýup, (7.8) deňlikden alarys:

$$\frac{\rho\upsilon_1^2}{2} + \rho gh_1 + \rho_1 = \frac{\rho\upsilon_2^2}{2} + \rho gh_2 + \rho_2.$$

Kese-kesikleriň erkin saýlanyp alynandygyny göz öňünde tutup, soňky deňlemäni

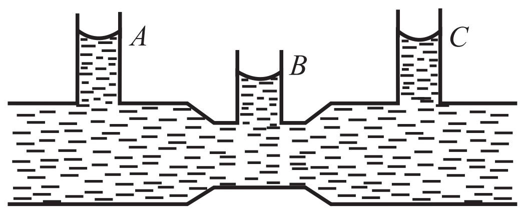
$$\frac{\rho\upsilon^2}{2} + \rho gh + p = const \qquad (7.9)$$

görnüşde ýazyp bileris. Bu aňlatma rus alymy D.Bernulli (1700–1782) tarapyndan çykarylandygy hasaba alnyp, oňa **Bernulliniň deňlemesi** diýilýär. Bu deňleme şepbeşikligi gaty ýokary bolmadyk real suwuklyklar üçin hem ýerine ýetýär.

(7.9) formuladaky p ululyga **statiki basyş** diýilýär. Bu basyş akýan suwuklygyň öz ýuwup geçýän jisimleriniň üstüne edýän basyşdyr. $\frac{\rho\upsilon^2}{2}$ ululyga **dinamiki basyş** diýilýär. *pgh* ululyk bolsa **gidrostatiki basyşdyr**.

Gorizontal ýerleşen ($h_1 = h_2$) akym turbasy üçin (7.9) formula

$$\frac{\rho\upsilon^2}{2} + p = const \qquad (7.10)$$



7.4-nji çyzgy

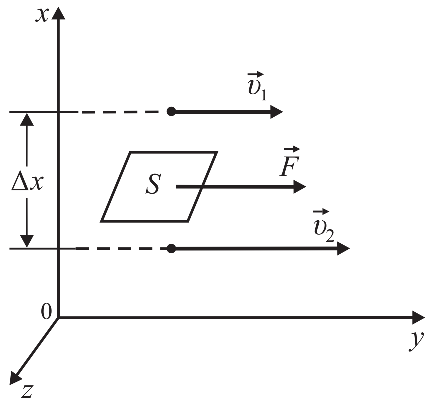
görnüşi alýar. Bu ýerde $\frac{\rho\upsilon^2}{2} + p = p_0$ ululyga doly basyş diýilýär. Bernulliniň deňlemesinden we $S\upsilon = const$ üznüksizligiň deňlemesinden ýogynlygy üýtgeýän gorizontal turbanyň kese-kesikleriniň dürli ýerlerinde suwuklygyň tizliginiň hem dürlüdigi görünýär. Turbanyň dar ýerlerinde suwuklygyň tizligi ýokarydyr. Turbanyň giň ýerlerinde bolsa statiki basyş ýokarydyr we tizlik pesdir. Muny dürli kese-kesikli turba manometrleri dakyp görmek bolar (*7.4-nji çyzgy*). Turbanyň dar ýerindäki *B* manometrdäki suwuklygyň derejesi giň ýerlerdäki *A* we *C* manometrdäki suwuklygyň derejelerinden pesdir.

Dinamiki basyşyň suwuklygyň (gazyň) tizligine baglylygy Bernulliniň deňlemesiniň kömegi bilen suwuklygyň akyş tizligini kesgitlemäge mümkinçilik berýär.

Akymyň tizliginiň ýokary ýerinde statiki basyş pes bolany üçin howada ýokary tizlik bilen akdyrylýan suwuklyga howanyň garyşýandygyna we suwuň köpürjikleýändigine durmuşda köp gabat gelinýär.

7.3. Şepbeşiklik. Suwuklygyň akymlary

Şepbeşiklik – suwuklygyň bir böleginiň başga bölegine görä akmagyna garşylyk döredýänligi netijesinde ýüze çykýan häsiýetdir. Oňa içki sürtülme-de diýilýär. Şepbeşiklik real suwuklyklaryň hemmesine mahsusdyr.



7.5-nji çyzgy

Akýan suwuklygy şertli birnäçe gatlaga bölsek, şol gatlaklaryň arasynda, gatlaklaryň araçäk üstüne galtaşma boýunça ugrukdyrylan güýçler ýüze çykýar. Pes tizlikli gatlak tarapyndan ýokary tizlikli gatlaga saklaýjy güýçler täsir edýär. Bu güýçleriň ululygy üstleriň meýdanyna baglydyr. Olar şepbeşikligi döredýär. Aralyklary Δx deň bolan, $\vec{\upsilon}_1$ we $\vec{\upsilon}_2$ tizlikler bilen hereket edýän iki sany gatlak 7.5-nji çyzgyda görkezilendir. Eger tizlikleriň tapawudyny $\Delta\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_1 - \vec{\upsilon}_2$ bilen bellesek we x okunyň tizlikleriň ugruna perpendikulýardygyny göz öňünde tutsak, onda $\dfrac{\Delta\upsilon}{\Delta x}$ ululyk bir gatlakdan beýleki gatlaga geçilendäki tizligiň üýtgemesini görkezýär we bu ululyga **tizligiň gradiýenty** diýilýär. Bu ýerde içki sürtülme güýjüniň ululygy

$$F = \eta\left|\frac{\Delta\upsilon}{\Delta x}\right|S \qquad (7.11)$$

deňlik bilen kesgitlenýär. Proporsionallyk koeffisiýenti η suwuklygyň tebigatyna baglydyr. Oňa **dinamiki şepbeşiklik ýa-da şepbeşiklik koeffisiýenti** diýilýär.

Şepbeşikligiň ölçeg birligi paskal · sekuntdyr ($Pa \cdot s$).

Tizligiň gradienti bire, galtaşýan üstleriň meýdany 1 m^2, gatlaklaryň arasyndaky sürtülme güşji $1N$ bolan suwuklygyň şepbeşikligi $1Pa \cdot s$.

Şepbeşiklik temperatura baglydyr. Suwuklyklarda şepbeşiklik temperaturanyň ýokarlanmagy bilen peselýär, gazlarda bolsa artýar.

Bu bolsa suwuklyklarda we gazlarda şepbeşikligi döredýän sebäpleriň dürlüdigini görkezýär.

Suwuklyklaryň iki hili akyşy bardyr. Eger suwuklyklardan şertli alnan gatlaklar biri-biri bilen garyşman akýan bolsa, onda beýle akyma **laminar (gatlaklanç) akym** diýilýär. Eger-de gatlaklar garyşyp akýan bolsa **turbulent (köwlenmeli) akym** diýilýär.

Suwuklyklaryň **laminar akymy** pes tizliklerde ýüze çykýar. Turbadan akýan suwuklygyň daşky gatlagy suwuklygyň we turbanyň molekulalarynyň dartyşma güýçleri netijesinde hereketsizdir. Içki gatlaklaryň tizlikleri bolsa turbadan daşlaşdygyça ýokarlanýarlar. Iň ýokary tizlik turbanyň oky boýunça hereket edýän gatlaga degişlidir.

Turbulent akymda suwuklygyň bölejikleriniň hereket tizlikleriniň ugryna perpendikulýar bolan düzüjiler ýüze çykýar. Netijede bölejikler bir gatlakdan beýlekä geçmäge ukyply bolýar we turbanyň kese-kesiginiň köp böleginde tizlikler birmeňzeş bolýar. Turbanyň diwarynyň golaýynda tizligiň gradientiniň ýokary bolmagy köwlenmeli akym döremegine getirýär.

Suwuklykda gaçýan kiçijik sferik jisimiň tizligini ölçemek şepbeşikligi kesgitlemäge mümkinçilik berýär. Bu usula **Stoksyň usuly** diýilýär.

Suwuklykda gaçýan şara üç güýç täsir edýär:

$P = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho g$ – agyrlyk güýji (ρ – şaryň dykyzlygy, r – şaryň radiusy);

$F_A = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho' g$ – Arhimediň güýji (ρ' – suwuklygyň dykyzlygy) we

$F = 6\pi\eta r\upsilon$ – Stoks tarapyndan kesgitlenen garşylyk güýji.

Şaryň deňölçegli hereketinde $P = F_A + F$ ýa-da

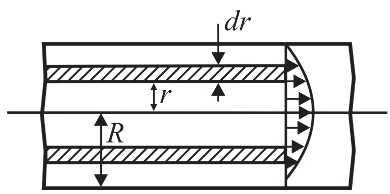
$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho g = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho' g + 6\pi\eta r\upsilon,$$

bu ýerden

$$\eta = \frac{2(\rho - \rho')gr^2}{9\upsilon}. \tag{7.12}$$

Bu formula şaryň suwuklykdaky gaçyş tizligini ölçemek bilen şepbeşikligi kesgitlemäge mümkinçilik berýär.

Şepbeşikligi kesgitlemegiň ýene-de bir usulyna **Puazeýliň usuly** diýilýär. Ol kapilýarda suwuklygyň laminar akymyna esaslanandyr. Suwuklykda r radiusly we dr galyňlykly silindri böleliň (*7.6-njy çyzgy*). Bu silindrik üste içki sürtülme güýji täsir edýär:



7.6-njy çyzgy

$$F = -\eta\frac{d\upsilon}{dr}dS = -\eta 2rl\frac{d\upsilon}{dr}.$$

Bu ýerde dS – silindriň gapdal üsti. Minus alamaty radius ulalanda tizligiň peselýändigini görkezýär.

Durnukly akym üçin içki sürtülmäniň güýji silindriň uçlaryndaky basyşlaryň tapawudynyň güýji bilen deňagramlaşýar:

$$-\eta 2\pi rl\frac{d\upsilon}{dr} = \Delta p\pi r^2,$$

bu ýerden

$$d\upsilon = -\frac{\Delta p}{2\eta l}rdr.$$

Turbanyň diwarlarynyň ýanynda, ýagny $r = R$ bolanda, tizligiň bahasyny nola deňläp, integrirlemek netijesinde alarys:

$$\upsilon = \frac{\Delta p}{4\eta l}(R^2 - r^2)$$

Bu ýerden tizligiň parabola boýunça paýlanýandygy we turbanyň merkezi okunda onuň iň uly baha eýe bolýandygy görünýär (*7.6-njy çyzgy*). t wagtyň dowamynda turbadan aşakdaky mukdardaky suw akyp geçýär:

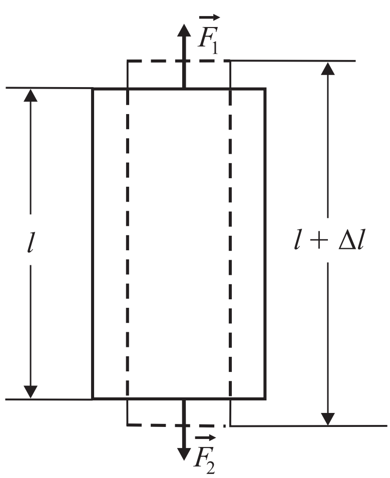
$$V = \int_0^R \upsilon t 2\pi r dr = \frac{2\pi\Delta pt}{4\eta l}\int_0^R r(R^2 - r^2)dr = \frac{\pi\Delta pt}{2\eta l}\left[\frac{r^2R^2}{2} - \frac{r^4}{4}\right]_0^R = \frac{\pi R^4\Delta pt}{8\eta l}.$$

Bu ýerden şepbeşiklik $\eta = \frac{\pi R^4 \Delta pt}{8Vl}$. Bu formula şepbeşikligi kesgitlemäge mümkinçilik berýär. Oňa **Puazeýliň formulasy** diýilýär.

7.4. Gaty jisimleriň deformasiýasy

Güýç täsir etmegi netijesinde tebigatdaky ähli jisimler formalaryny we ölçeglerini üýtgedýärler, ýagny deformirlenýärler. Güýjüň täsiri aýrylandan soň başky formasyny we ölçeglerini alýan jisimlere **maýyşgak jisimler** diýilýär. Şeýle deformasiýa bolsa **maýyşgak deformasiýa** diýilýär. Daşky güýçleriň täsiri aýrylandan soň hem jisimde saklanýan deformasiýa **plastiki deformasiýa** diýilýär. Hakyky jisimleriň deformasiýasy plastiki deformasiýa degişlidir. Emma deformasiýa galyndysy juda az bolsa, ony hasaba alman, deformasiýany maýyşgak diýip hasaplamak hem bolar.

Tebigatda süýnme, gysylma, gozganma, egrelme we towlanma deformasiýalary gabat gelýär. Maýyşgaklyk teoriýasy deformasiýalary süýnmäniň we gysylmanyň üsti bilen aňladyp bolýandygyny subut edýär.



7.7-nji çyzgy

l uzynlykly S kese-kesikli silindriň okuna parallel gönükdirilen $\vec{F_1}$ we $\vec{F_2}$ ($F_1 = F_2 = F$) güýçler goýlanda deňdeş silindriň uzynlygy Δl aralyga üýtgeýär diýeliň (*7.7-nji çyzgy*). Süýnmede Δl položitel, gysylmada bolsa otrisatel alamat bilen alynýar. Kese-kesigiň birlik meýdanyna düşýän güýje **naprýaženiýe** diýilýär:

$$\sigma = \frac{F}{S}. \qquad (7.14)$$

Eger güýç üste perpendikulýar goýlan bolsa, oňa normal naprýaženiýe, üste galtaşma boýunça goýlan bolsa, tangensial naprýaženiýe diýilýär.

Deformasiýany mukdar taýdan häsiýetlendirýän ululyga otnositel deformasiýa diýilýär. Ol süýnme üçin

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \tag{7.15}$$

gatnaşyk bilen aňladylýar. Gysylma deformasiýa üçin $\varepsilon' = \frac{\Delta d}{d}$. Bu ýerde d – silindriň diametri, ε bilen ε' ululyklaryň alamatlary dürlüdir.

Iňlis alymy R.Guk (1638-1703) tarapyndan uly bolmadyk maýyşgak süýnme deformasiýasy üçin

$$\sigma = E\varepsilon \tag{7.16}$$

gatnaşyk tejribe üsti bilen tapyldy. Bu ýerde E – Ýunguň moduly. (7.16) formuladan görnüşi ýaly, Ýunguň moduly san taýdan silindri iki esse uzaldyp biljek napryaženiýa deňdir. Köp jisimler bu napryaženiýa çydamaýar. Muňa seretmezden Ýunguň moduly deformasiýany häsiýetlendirýän oňat görkeziji bolup hyzmat edýär. (7.14), (7.15) we (7.16) formulalardan

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma}{E} = -\frac{F}{ES}$$

ýa-da

$$F = \frac{ES}{l}\Delta l = k\Delta l \tag{7.17}$$

gatnaşyklary almak bolýar. Bu ýerde k – maýyşgaklyk koeffisiýenti.

Gaty jisimleriň maýyşgak deformasiýasy Gukyň kanunyna belli bir çäge çenli, ýagny uly bolmadyk napryaženiýelerde boýun egýär. Uly napryaženiýelerde maýyşgak kem-käsleýin saklanýan hem bolsa, Gukyň kanuny bozulýar. Has uly napryaženiýelerde jisimler weýran bolýar. Jisimiň weýran bolmagyna getirýän napryaženiýa **berklik çägi** diýilýär.

II bölüm

MOLEKULÝAR FIZIKA WE TERMODINAMIKA

VIII BAP. MOLEKULÝAR-KINETIKI TEORIÝA

8.1. Fizikanyň statistiki we termodinamiki kanunlaýyklyklary

Molekulýar fizika jisimleriň agregat hallarynyň we häsiýetleriniň, olaryň gurluşyna, düzümindäki bölejikleriň özara täsirleşmelerine we olaryň hereketleniş aýratynlyklaryna baglylygyny öwrenýän ylymdyr.

Ähli jisimleriň tertipsiz ýylylyk hereketinde bolan atomlardan, molekulalardan ýa-da ionlardan ybaratdygynyň subut edilendigine köp wagt geçdi. Bölejikleriň hereketine esaslanyp, maddanyň gurluşyny öwrenýän fizikanyň bölümine molekulýar-kinetiki teoriýa diýilýär. Bu teoriýanyň düýbüni tutmakda we ony ösdürmekde M. W. Lomonosow, R. Boýl, E. Mariot, D. Joul, R. Klauzius, D. K. Makswell, L. Bolsman we başgalar uly hyzmatlar görkezdiler.

Molekulýar-kinetik teoriýanyň fizika ylmynyň ösmegindäki ähmiýeti molekulalaryň hereketiniň häsiýeti bilen dahylly fiziki hadysalara bir nukdaý nazardan garamaga ýardam edenligindedir. Dürli agregat haldaky jisimleriň aýratynlyklary gazlarda, suwuklyklarda we gaty jisimlerde molekulalaryň hereketindäki häsiýet tapawutlyklary arkaly düşündirilýär. Molekulalaryň arasynda dartyşma we itekleşme güýçleriň bolmagy, olaryň ýakyn arada has güýçli täsirleşmegine, uzak arada bolsa, takmynan, deňölçegli göni hereket etmeklerine getirýär. Şoňa görä-de **gazlarda** molekulalar tertipsiz ýylylyk hereketiniň netijesinde has seýrek çaknyşyp, suwuklyklara we gaty jisimlere garanyňda, ep-esli aralyga erkin hereket edýärler.

Gaty jisimlerde molekulalaryň özara dartyşma we itekleşme güýçleri takmynan deňdir we olar diňe öz deňagramlylyk orunlarynyň golaýynda yrgyldaýarlar. Olaryň giňişlikde ýerleşişlerine **kristallik gözenek**, deňagramlylyk orunlaryna bolsa kristallik **gözenegiň düwünleri** diýilýär.

Suwuklygyň molekulalarynyň ýylylyk hereketi aram häsiýetdedir. Olar käte deňagramly orunda yrgyldap, durnukly ýagdaýy eýeleseler, käte bolsa molekulalaryň ölçegleri ýaly aralyga süýşüp bilýärler. Şeýlelikde molekulalar hem yrgyldaýarlar hem-de gabyň göwrüminde haýaljakdan ornuny üýtgedýärler. Gazlaryň, suwuklyklaryň we gaty jisimleriň düzüji bölejikleriniň ýokarda agzalan hereketine **ýylylyk hereketi** diýilýär. Islendik jisimde atomlaryň we molekulalaryň sany ägirt köpdür. Mysal üçin, $1 m^3$ gazda 10^{25} töweregi, suwuklykda we gaty jisimde bolsa

10^{28} töweregi molekula bardyr. Şoňa görä-de klassyky mehanikanyň usullaryny ulanyp, her molekulanyň hereket deňlemesini düzmek, olaryň traektoriýasyny, tizligini we ornyny kesgitlemek asla mümkin däldir. Sebäbi olaryň üýtgemesi tötänleýindir.

Örän köp bölejiklerden düzülen makroskopik sistemanyň fiziki häsiýetleri biri-biriniň üstüni ýetirýän iki usul – **statistiki** we **termodinamiki usullar** arkaly öwrenilýär. Fizikanyň şeýle usullardan peýdalanýan bölümlerine, degişlilikde **statistiki fizika** we **termodinamika** diýilýär.

Statistiki usul ähtimallyk teoriýasyny ulanmaklyga we öwrenilýän sistemanyň gurluşyna degişli kesgitli bir modeli ulanmaga esaslanandyr. Koordinatalary we impulslary tötänleýin bolan köpsanly bölejikleriň wagtyň islendik pursatynda özlerini köpçülikleýin alyp barşyna degişli özboluşly statistiki kanunalaýyklyklar ýüze çykýar. Mysal üçin, temperatura baglylykda gaza degişli molekulalaryň ýylylyk hereketiniň tizliginiň orta bahasyny we olaryň energiýasyny kesgitläp bolýar. Statistiki usul ulanylanda bölejikleriň umumy hereketiniň aýratynlyklaryny hasaba almaly. Netijede her bir aýratyn bölejigiň hereket kanunlary bütin sistema üçin ortalaşdyrylandan soň, statistiki usulda alnan bölejikler sistemasynyň häsiýetleri kesgitlenýär.

Termodinamiki usulda öwrenilýän jisimleriň içki gurluşy we her bir bölejigiň hereketiniň aýratynlyklary hasaba alynmaýar. Termodinamiki usul sistemada bolup geçýän energiýanyň öwrülişik şertleriniň we mukdar gatnaşyklarynyň derňewine esaslanýar. Dürli hadysalara gatnaşýan sistemalar üçin energiýanyň dürli görnüşleriniň öwrülişiklerini öwrenmek ol sistemalaryň fiziki häsiýetlerini öwrenmäge mümkinçilik berýär.

Özara täsirleşýän, öz aralarynda we daşky sreda bilen energiýa alyş-çalyşygyny edýän makraskopik jisimleriň toplumyna **termodinamiki sistema** diýilýär. **Termodinamiki usulyň esasy maksady termodinamiki sistemanyň halyny kesgitlemekdir.** Sistemanyň haly makroskopik termodinamiki parametrler (halyň parametrleri) bilen kesgitlenýär.Termodinamiki sistemany häsiýetlendirýän umumylaşdyrylan fiziki ululyklara termodinamiki parametrler diýilýär. Adatça parametrler hökmünde **temperatura, basyş** we **göwrüm** alynýar. Termodinamiki parametrler: **ekstensiw** we **intensiw** diýen iki topara bölünýär. Ekstensiw parametrler berlen termodinamiki sistemadaky maddanyň mukdaryna proporsionaldyr. Intensiw parametrler maddanyň mukdaryna bagly bolmaýar. Ekstensiw parametriň iň ýönekeýi V göwrümdir. Intensiw parametre basyş p we temperatura T degişlidir.

$$p = \frac{dF_n}{dS}$$

görnüşde aňladylýan fiziki ululyga basyş diýilýär. Bu ýerde dF_n – jisimiň üstüniň tükeniksiz kiçi (dS) meýdanyna täsir edýän normal güýjüň moduly. Temperatura diýen düşünjäniň diňe sistema deňagramlyk halda bolanda manysy bardyr. Parametrleri we daşky sredanyň täsirleri üýtgewsiz bolan, şeýle hem içinde hiç hili akym bolmadyk (mysal üçin, energiýanyň ýa-da maddanyň akymy) termodinamiki sistemanyň halyna **deňagramly hal** diýilýär.

Deňagramly halda termodinamiki sistemanyň hemme böleklerinde temperatura deňdir. Temperatura sistemany emele getirýän atomlaryň, molekulalaryň we beýleki bölejikleriň ýylylyk hereketiniň intensiwligini häsiýetlendirýär.

Ýüz graduslyk halkara şkalasynda temperatura Selsiniň gradusynda (ºC) ölçenilýär we t bilen bellenilýär. Bu şkala boýunça normal basyşda ($1{,}01325 \cdot 10^5$ Pa) buzyň ereme we suwuň gaýnama temperaturalary, degişlilikde 0º we 100ºC deňdir.

Temperaturanyň termodinamiki şkalasynda temperatura kelwinde (K) ölçenilýär we T bilen bellenilýär. Bu temperatura **termodinamiki temperatura** diýilýär. Termodinamiki temperatura bilen selsiý şkalasynyň temperaturasy şeýle baglanyşdyrylýar:

$$T = (t + 273{,}16)K.$$

$T = 0$ K temperatura (selsiý şkalasynda $t = -$ 273,16ºC) absolýut nol temperatura ýa-da temperaturanyň termodinamiki şkalasynyň noly diýilýär. Deňagramlyk ýagdaýda bolan termodinamiki sistemanyň hemme parametrleri erkindir. Şeýle sistemanyň içki parametrleri diňe onuň daşky parametrlerine we temperatura baglydyr.

8.2. Molekulýar-kinetik düşünjeler. Ideal gazyň hal deňlemesi

Sistemanyň islendik termodinamiki parametrini erkin üýtgeýän parametrler bilen baglanyşdyrýan deňlemä hal deňlemesi diýilýär. Bir hilli madda üçin p basyşy, V göwrümi we T temperaturany baglanyşdyrýan deňleme termodinamiki hal deňlemesidir:

$$f(p, V, T) = 0. \tag{8.1}$$

Termodinamiki hal deňlemesini ulanmak üçin iň ýönekeý model bolup ideal gaz hyzmat edýär. Molekulalarynyň hususy göwrümleri hasaba alardan kiçi hem-de olaryň arasynda diňe absolýut maýyşgak çakyşmalar bolup bilýän gaza ideal gaz diýilýär. Hakyky gazyň molekulalarynyň arasy näçe daş bolsa, ýagny molekulalaryň gürlügi ýa-da dykyzlygy näçe pes bolsa, şonça-da ol ideal gaz modeline golaýdyr. Ideal gaz üçin **Klapeýronyň deňlemesi diýip** atlandyrylýan gaz halynyň deňlemesine seredeliň:

$$\frac{pV}{T} = C = const. \tag{8.2}$$

Bu deňlikden görnüşi ýaly, berlen massaly gaz üçin basyşyň we göwrümiň köpeltmek hasylynyň termodinamiki temperatura gatnaşygy hemişelik ululykdyr.

Gaz hemişeligi bolan C gazyň himiki düzümine baglydyr we onuň massasyna göni proporsionaldyr. Gazyň udel göwrüminiň $V_{mol} = \frac{V}{m}$ formulasyndan peýdalansak, Klapeýronyň deňlemesini şeýle ýazmak bolar:

$$pV_{mol} = BT. \tag{8.3}$$

Bu ýerden $B = C/m$ – udel gaz hemişeligi. Ol gazyň diňe himiki düzümine baglydyr.

Maddanyň mukdarynyň kesgitlemesine görä, islendik gazyň bir molynda molekulalaryň sany N_A deňdir. Bu sana $N_A = 6{,}02 \cdot 10^{23}\ mol^{-1}$ – Awogadronyň hemişeligi diýilýär. Eger bir molekulanyň massasyny m_0 bilen bellesek, onda maddanyň islendik mukdarynyň massasy

$$m = m_0 N_A \nu = \mu\nu$$

bolar. Bu ýerde ν – maddadaky mollaryň sany, $\mu = n_0 N_A$ – gazyň molýar massasy. Ol gazyň massasynyň ondaky maddanyň mukdaryna ν bolan gatnaşygyna deňdir. $V_m = \frac{V}{\nu}$ ululyga **molýar göwrüm** diýilýär. Molýar göwrümi ulanyp (8.2) deňlikden alarys:

$$pV_m\nu = CT \qquad \text{ýa-da} \qquad pV_m = RT. \tag{8.4}$$

Bu ýerde $R = \frac{C}{\nu} = \mu B$ – uniwersal gaz hemişeligi.

Awogadronyň kanuny. Hemişelik basyşda we temperaturada dürli gazlaryň molýar göwrümleri deňdir. Normal şertlerde islendik gazyň bir molunyň göwrümi 22,4 · 10^{-3} m^3/mol bolýar.

Bu kanunyň we (8.4) deňligiň esasynda, molýar gaz hemişeliginiň (R) hemme gazlar üçin deňdigi alynýar. Şonuň üçinem oňa uniwersal gaz hemişeligi diýilýär. Onuň san bahasy $R = 8{,}31\ J/(mol \cdot K)$ tejribede kesgitlenendir. Islendik massaly gaz üçin (8.4) deňligi şeýle ýazmak bolar:

$$pV = \frac{m}{\mu}RT. \tag{8.5}$$

Gaz halynyň şu görnüşdäki deňlemesine **Klapeýron-Mendeleýewiň deňlemesi** diýilýär. Bu deňlikden dykyzlyk üçin alarys:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{p\mu}{RT} = \frac{p}{BT}. \tag{8.6}$$

(8.4) deňlik ýene-de bir görnüşde ulanylýar. Ony almak üçin Bolsmanyň hemişeligi $k = R/N_A = 1{,}38 \cdot 10^{-23}\ J/K$ diýen ululyk girizilýär. (8.4) deňlikden alarys:

$$p = \frac{kN_A}{V_m}T = kn_0T. \tag{8.7}$$

Bu ýerde $n_0 = \dfrac{N_A}{V_m}$ – gaz molekulalarynyň konsentrasiýasy. (8.7) deňlikden görnüşi ýaly hemişelik temperaturada ideal gazyň basyşy molekulalaryň konsentrasiýasyna ýa-da gazyň dykyzlygyna göni proporsionaldyr. Ýapyk gapda ýerleşdirilen gaz gabyň içini tutuşlygyna eýeleýär. Gaz gabyň içinde giňelmäge ymtylyp, onuň diwarlaryna basyş edýär. Gazyň giňelmäge ymtylmagy molekulalaryň **ýylylyk hereketi** bilen düşündirilýär. Molekulalar hereket edip, gabyň diwarlaryna absolýut maýyşgak urlup impuls berýärler we basyş döredýärler. Temperatura ýokarlandygyça gaz molekulalarynyň tizligi-de ýokarlanýar. Şoňa göräde ýokary temperaturada gaz molekulalary diwara has ýokary impuls bilen ýygy-ýygydan urulýarlar. Bu bolsa temperaturanyň ýokarlanmagy bilen basyşyň artmagyna getirýär.

8.3. Ähtimallyk we fluktuasiýa

Gaz molekulalarynyň ýylylyk hereketi tertipsiz (haotik) hereketdir. Bu hereket üçin hiç bir ugruň artykmaçlygy ýokdur. Molekulalaryň arasyndaky çaknyşmalar olaryň tizliginiň ugruny we ululygyny üýtgedip durýar. Eger biziň bir molekulanyň hereketini synlamaga mümkinçiligimiz bolsa, onda onuň wagtyň geçmegi bilen, göwrümiň dürli ýerlerinde deň derejede bolýandygyny göreris. Şeýle bir hyýaly tejribä seredeliň. Goý, göwrüm üç sany öýjüge bölünen bolsun. Gaz molekulalarynyň dürli reňklere boýalan 3 sanysyny synlap bilýäris diýeliň. Birinji, ikinji we üçünji öýjüklerde 3 sany bellikli molekulalar dürli utgaşmalarda ýerleşip bilerler. Tejribede hem şeýle bolýanlygy subut edilendir. Wagtyň geçmegi bilen göwrümiň dürli öýjüklerinde molekulalaryň mümkin bolan hemme utgaşmalaryny görmek bolar. Diýmek, her öýjükde belli bir molekulanyň ýa-da bellikli molekulalaryň utgaşmalarynyň bolmagynyň mümkinçiligi deňdir. Berlen anyk şertlerde bir hadysanyň ýüze çykmagyny häsiýetlendirmek üçin matematikada hadysanyň **ähtimallygy** (ω) diýen düşünje girizilýär. Meselem, N sany öýjüklere bölünen göwrümiň bir öýjüginde öwrenilýän bir molekulanyň bolmagynyň ähtimallygy

$$\omega = \frac{1}{N} \tag{8.8}$$

deňlik bilen aňladylýar. Has seýreklendirilen gazlarda molekulalaryň göwrümde deň derejede paýlanylyşy bozulýar. Bu ýagdaýda göwrümiň dürli ýerlerinde gazyň dykyzlygy dürli bolýar we onuň ortaça bahasyndan tapawutly bolýar. Temperatura, basyş we beýleki fiziki ululyklar hem göwrümiň dürli ýerlerinde tapawutly bolup bilýärler. Bu hadysa **fluktuasiýa** diýilýär. Dürli fiziki ululyklaryň fluktuasiýasyna bolsa, degişlilikde dykyzlygyň, temperaturanyň we ş.m. fluktuasiýasy diýilýär.

Gazlaryň häsiýetlerini statistiki usul esasynda öwrenýän teoriýa molekulýar-kinetik teoriýa diýilýär. Gazlaryň kinetiki teoriýasy klassyky statistiki fizikanyň şu aşakdaky tekrarlamalaryna esaslanandyr:

a) Bölejikler sistemasynda impulsyň, impulsyň momentiniň, energiýanyň, elektrik zarýadynyň (zarýadly bölejikleriň sistemasy üçin) we bölejikleriň sanynyň (himiki we beýleki özgerişlikler ýok bolsa) saklanma kanuny ýerine ýetýär;

b) Sistemanyň bölejikleriniň her birini aýratynlykda belläp bolýar, ýagny olary biri-birinden tapawutlandyryp bolýar;

ç) Giňişlige we wagta baglylykda sistemada bolup geçýän fiziki hadysalar üznüksizdir (meselem, molekulanyň energiýasy daşky täsire baglylykda islendik ululyga üýtgäp bilýär);

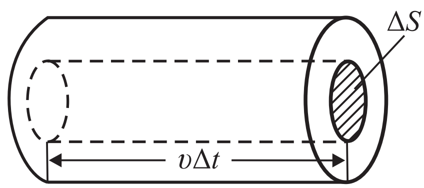
d) Sistemanyň göwrüminiň çäklerinde sistemanyň islendik bölejigi beýleki bölejikler bilen baglanyşyksyz koordinatanyň islendik bahalaryny alyp bilýär.

8.4. Gabyň diwaryna gazyň basyşy. Molekulýar-kinetik teoriýanyň esasy deňlemesi

Ideal gazlaryň basyşyny hasaplamak molekulýar-kinetik teoriýanyň esasy meselesi bolup durýar. Basyş gazyň molekulalarynyň gabyň diwarlaryna urulmagy netijesinde ýüze çykýar. Molekulalaryň diwarlar bilen çaknyşmasynyň sany olaryň özara çaknyşmasynyň sanyndan has azdyr. Ideal gazyň molekulalarynyň özara çaknyşmasynyň basyşa täsiriniň ýokdugyny J.Makswell subut etdi. Şeýle-de basyş molekulalaryň diwara urluşynyň häsiýetine (urgynyň maýyşgak we maýyşgak dälligine) bagly däldir. Bir atomly ideal gaza seredeliň. Gabyň diwarynda ΔS tükeniksiz kiçi meýdany alalyň we oňa täsir edýän basyşy hasaplalyň. Diwar bilen çaknyşan her bir m_0 massaly molekula oňa

$$m_0\vec{\upsilon} - (-m_0\vec{\upsilon}) = 2m_0\vec{\upsilon} \qquad (8.9)$$

impulsy berýär. Bu ýerde υ – gaz molekulasynyň tizligi (*8.1-nji çyzgy*). Δt wagtda ΔS meýdança diňe esasy ΔS, beýikligi $\upsilon\Delta t$ bolan silindiriň içindäki molekulalar degip bilýärler. Beýle molekulalaryň sany $n\Delta S\upsilon\Delta t$ deňdir (n – birlik göwrümdäki molekulalary sany).



8.1-nji çyzgy

Hakykatda molekulalar ΔS meýdança dürli burçlar bilen urulýarlar. Molekulalaryň tizlikleri hem deň däldir. Hasaby ýönekeýleşdirmek üçin molekulalaryň tertipsiz hereketine özara perpendikulýar üç ok boýunça hereket hökmünde garalyň. Munuň üçin saýlanyp alnan ok boýunça molekulalaryň diňe 1/3-i hereket edýär diýip kabul edeliň. Şol bir tarapa bolsa molekulalaryň 1/6 bölegi hereket edýän bolsun. Onda bir tarapa hereket edip, Δt wagtda ΔS meýdança urulýan molekulalaryň sany $\frac{1}{6}n\Delta S\upsilon\Delta t$ bolar. Meýdança bilen çakyşma wagtynda molekulalar oňa

$$\Delta P = 2m_0\upsilon\frac{1}{6}n\Delta S\upsilon\Delta t = \frac{1}{3}nm_0\upsilon^2\Delta S\Delta t$$

impulsy berýär. Onda gazyň diwara edýän basyşy:

$$p = \frac{\Delta P}{\Delta t \Delta S} = \frac{1}{3} n m_0 \upsilon^2. \qquad (8.10)$$

Eger V göwrümde $\upsilon_1, \upsilon_2, ..., \upsilon_n$ tizlikli N molekula bar bolsa, onda molekulalar köplügini häsiýetlendirmek üçin **orta kwadrat tizligi** ulanmak amatlydyr. Ol şeýle kesgitlenilýär:

$$\upsilon_{kw} = \sqrt{\frac{1}{N} \Sigma \upsilon_i^2}. \qquad (8.11)$$

(8.11) deňligi göz öňünde tutup, (8.10) deňlikden alarys:

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \upsilon_{kw}^2.$$

Bu ýerde $n = N/V$ deňligi ulanyp, alarys:

$$pV = \frac{1}{3} N m_0 \upsilon_{kw}^2 \qquad (8.12)$$

ýa-da

$$pV = \frac{2}{3} N \frac{m_0 \upsilon_{kw}^2}{2} = \frac{2}{3} E, \qquad (8.13)$$

bu ýerde E – hemme molekulalaryň öňe hereketiniň energiýalarynyň jemi. (8.12) we (8.13) manydaş aňlatmalara **molekulýar-kinetik teoriýanyň esasy deňlemesi** diýilýär. Molekulalaryň hereketiniň hemme ugurlary hasaba alnanda-da ýokarky formulalar alynýar. Gazyň massasynyň $m = Nm_0$ bolýandygyny hasaba alyp, (8.12) deňligi şeýle ýazmak bolar:

$$pV = \frac{1}{3} m \upsilon_{kw}^2.$$

Eger bir mol gaz üçin $m = \mu$ bolsa, onda $pV_m = \frac{1}{3} \mu \upsilon_{kw}^2$ alarys, bu ýerde V_m– molýar göwrüm. Klapeýron-Mendeleýewiň deňlemesi ($pV_m = RT$) esasynda alarys

$$RT = \frac{1}{3} \mu \upsilon_{kw}^2.$$

Bu ýerden

$$\upsilon_{kw} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}. \qquad (8.14)$$

Ýene-de N_A Awogadronyň sanyny ulanyp, molýar massany $\mu = m_0 N_A$ görnüşde ýazyp, (8.14) deňlikden alarys:

$$\upsilon_{kw} = \sqrt{\frac{3RT}{m_0 N_A}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}, \qquad (8.15)$$

bu ýerde $k = R/N_A$ – Bolsmanyň hemişeligi. (8.15) formula degişli san bahalary goýup hasaplasak, otag temperaturasynda orta kwadrat tizligiň bahalary kislorod üçin 480 m/s, wodorod üçin 1900 m/s bolar. Suwuk geliýniň temperaturasynda (4K) bu tizlikler, degişlilikde 40 we 160 m/s deňdir. (8.13) we (8.14) deňliklerden peýdalanyp, ideal gazyň bir molekulasy üçin öňe bolan hereketiň orta kinetik energiýasyny tapalyň:

$$\varepsilon_0 = \frac{E}{N} = \frac{m_0 \upsilon_{kw}^2}{2N} = \frac{3}{2}kT. \qquad (8.16)$$

Bu energiýa termodinamiki temperatura göni proporsionaldyr we diňe şoňa baglydyr. Soňky deňlikden görnüşi ýaly $T = 0\ K$ bolanda öňe hereketiň kinetik energiýasy nola deň bolar, diýmek basyş hem nola deň bolar. Şeýlelikde, termodinamiki temperatura ideal gazyň molekulalarynyň öňe hereketiniň kinetik energiýasyny häsiýetlendirýär. (8.16) deňlik temperaturanyň molekulýar-kinetik teoriýasynda düşündirilişini görkezýär.

Ideal gazlarda köp sanly çaknyşmalar zerarly molekulalaryň tizlikleri ugruny we ululygyny üýtgedip durýarlar. Ýöne molekulalaryň hereketiniň bitertipdigini nazara alsak, hemme ugurlar hereket üçin deň ähtimallyklydyr. Şeýle bolansoň, islendik ugur boýunça, ortaça, molekulalaryň deň mukdary hereket edýär.

IX BAP. STATISTIKI PAÝLANYŞLAR

9.1. Makswelliň paýlanyşygy

Molekulýar-kinetik teoriýanyň esasynda çaknyşma zerarly molekulalaryň tizlikleri nähili üýtgeýän hem bolsa, deňagramly halda gazyň m_0 massaly molekulalarynyň orta kwadrat tizligi hemişelikdir we $\upsilon_{kw} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$ formula bilen kesgitlenýär. Bu ýagdaý, deňagramly haldaky gaz üçin molekulalaryň tizlikler boýunça paýlanşygynyň durnukly, wagta görä üýtgemeýän statistiki kanuna boýun egýänligi bilen düşündirilýär. Bu kanuny ähtimallyk teoriýasy esasynda J.Makswell ýüze çykardy.

Kanun ýüze çykarylanda gaz N sany köp mukdardaky meňzeş molekulalardan durýar diýip kabul edilýär. Molekulalar üznüksiz, bitertip ýylylyk hereketinde we olara hiç hili meýdan güýçleri täsir etmeýär diýlip kabul edilýär. Makswelliň kanuny **molekulalaryň tizlik boýunça paýlanyş funksiýasy** diýilýän $f(\upsilon)$ funksiýanyň üsti bilen aňladylýar. Tizlikleriň üýtgeýän aralygyny tükeniksiz kiçi $d\upsilon$ ululykly böleklere böleliň. Her aralyga düşýän molekulalaryň sanyny $dN(\upsilon)$ bilen belläliň. $f(\upsilon)$ funksiýa tizlikleri υ-den $\upsilon + d\upsilon$ çenli bolan molekulalaryň $\frac{dN(\upsilon)}{N}$ otnositel sanyny kesgitleýär.

Onda alarys:

$$\frac{dN(\upsilon)}{N} = f(\upsilon)d\upsilon.$$

Bu ýerden

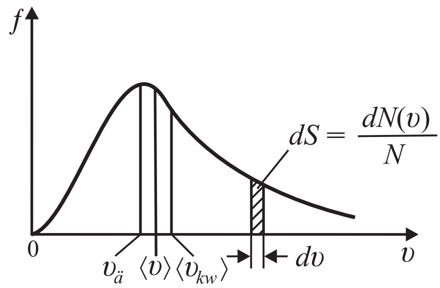
$$f(\upsilon) = \frac{dN(\upsilon)}{Nd\upsilon}$$

Ähtimallyk teoriýasynyň usullaryndan peýdalanyp, Makswell $f(\upsilon)$ funksiýany aşaky görnüşde tapdy:

$$f(\upsilon) = 4\pi\left(\frac{m_0}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}} \upsilon^2 e^{-\frac{m_0\upsilon^2}{2kT}}. \qquad (9.1)$$

Bu deňlik ideal gazyň molekulalarynyň tizlikler boýunça paýlanyş kanunydyr. (9.1) aňlatmadan görnüşi ýaly, funksiýa molekulanyň massasyna we temperatura baglydyr. Bu funksiýanyň grafiginiň umumy görnüşi 9.1-nji çyzgyda görkezilendir.

Tizlikleri υ-den $\upsilon + d\upsilon$ aralyga çenli bolan molekulalaryň otnositel dN/N sany 9.1-nji çyzgydaky tegmillenen meýdana deňdir. Grafikden görnüşi ýaly, tizlik nola ($\upsilon \to 0$) ýa-da tükeniksizlige ($\upsilon \to \infty$) ymtylanda paýlanyş funksiýasy nola ymtylýar. Funksiýanyň iň uly bahasy iň ähtimal diýilýän $\upsilon_ä$ tizlige degişlidir. Molekulalaryň esasy böleginiň tizligi iň ähtimal (*9.1-nji çyzgy*) tizliginiň töweregindäki bahalara eýedir we $\upsilon_ä$ tizlige görä baglanyşygy aňladýan egri simmetrik däldir. Tizligiň iň ähtimal $\upsilon_ä$ bahasyny tapmak üçin (9.1) aňlatmanyň υ görä birinji önümini alyp, ony nola deňleýäris.



9.1-nji çyzgy

Onda

$$\frac{d}{d\upsilon}\left(\upsilon^2 e^{-\frac{m_0\upsilon^2}{2kT}}\right) = 2\upsilon\left(1 - \frac{m_0\upsilon^2}{2kT}\right)e^{-\frac{m_0\upsilon^2}{2kT}} = 0.$$

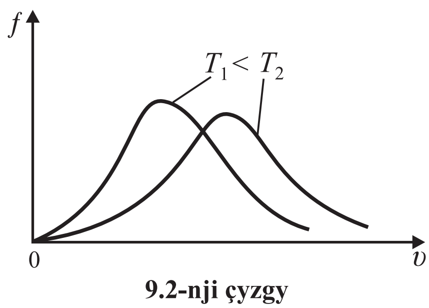
Bu ýerden

$$\upsilon = \upsilon_ä = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}}$$

ýa-da

$$\upsilon_ä = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}}. \qquad (9.2)$$

Temperaturanyň ýokarlanmagy bilen iň ähtimal tizligiň bahasynyň ulaljakdygy we saga süýşjekdigi görünýär (*9.2-nji çyzgy*). Emma egri çyzygyň aşagyndaky meýdan üýtgemän galýar. Sebäbi molekulalaryň umumy sany temperaturanyň üýtgemegi bilen üýtgemeýär. Şonuň üçin temperaturanyň ýokarlanmagy bilen egri çyzyk peselýär we giňelýär. (9.1) aňlatmadan molekulalaryň öňe hereketi üçin **orta arifmetik tizlik** hasaplanýar:



9.2-nji çyzgy

$$\langle \upsilon \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}}. \tag{9.3}$$

Arifmetiki tizlik iň ähtimal tizlikden 1,13 esse uludyr: $\langle \upsilon \rangle = 1{,}13\upsilon_ä$ orta kwadrat tizlik bolsa 1,22 esse uludyr:

$$\upsilon_{kw} = 1{,}22\upsilon_ä$$

Şu usul bilen molekulalaryň energiýa boýunça paýlanyşyny kesgitläp bolýar. Energiýa boýunça paýlanyşyk N sanly ideal gaz molekulalarynyň haýsy böleginiň $\left(\frac{dN(\varepsilon)}{N}\right)$ kinetik energiýasynyň ε-den $\varepsilon + \Delta\varepsilon$ aralykdadygyny görkezýär:

$$dN(\varepsilon) = Nf(\varepsilon)d\varepsilon = \frac{2N}{\sqrt{\pi}}(kT)^{-\frac{3}{2}}\varepsilon^{-\frac{1}{2}}e^{\frac{\varepsilon}{kT}}d\varepsilon, \tag{9.4}$$

bu ýerde $f(\varepsilon)$ funksiýa molekulalaryň energiýa boýunça paýlanyşyk funksiýasy diýilýär.

9.2. Barometrik formula. Bolsmanyň paýlanyşygy. Mikrohallaryň ähtimallygy. Effuziýa

Şu wagta çenli öwrenilen kanunalaýyklyklarda gaz molekulalaryna daşky güýçler täsir etmeýär diýip kabul edilendir. Bu ýagdaýda gaz molekulalary bütin göwrüm boýunça deň paýlanmaly. Emma hakykatda gaz molekulalaryna Ýeriň dartyş güýji täsir edýär we başga güýçleriň täsir etmegi hem mümkin. Ýeriň dartyş güýjüniň täsiri bilen termodinamiki deňagramlylyk haldaky gaz üçin basyşyň üýtgeýşi **barometrik formula** diýlip atlandyrylýan aşakdaky formula bilen aňladylýar:

$$p = p_0 e^{-\frac{m_0 gh}{kT}},$$

bu ýerde p – gazyň h belentlikdäki basyşy, p_0 – gazyň Ýeriň üstündäki basyşy, g – erkin gaçmanyň tizlenmesi.

Hemişelik temperaturada basyşyň gaz molekulalarynyň konsentrasiýasyna proporsionaldygyny ($p = n_0kT$) göz öňünde tutup alarys:

$$n = n_0 e^{-\frac{m_0 gh}{kT}}. \tag{9.5}$$

(9.5) formula daşky **potensial meýdanda gaz molekulalarynyň paýlanyşyny** görkezýän **Bolsmanyň kanunynyň** matematiki aňladylyşydyr. Bu formuladaky m_0gh ululyk Ýeriň golaýyndaky molekulanyň potensial energiýasydyr. Islendik potensial meýdan üçin bu energiýany degişli potensial energiýa bilen çalşyp, (9.5) formulany ulanmak bolar.

Mälim bolşy ýaly, islendik pursat üçin her bir gaz molekulasynyň kesgitli koordinatalary we tizligi bardyr. Molekulanyň şu halyny **mikrohal** diýip kabul edeliň. Wagtyň geçmegi bilen molekula ýene-de öňki mikrohalyna gelip bilýär.

Uzak t wagtyň dowamynda molekula şol bir mikrohalda jemi Δt wagtlap boldy diýeliň. Onda $\frac{\Delta t}{t}$ gatnaşyga **mikrohalyň ähtimallygy** diýilýär. Mikrohalyň ähtimallygy $\omega = \frac{\Delta t}{t}$ **Gibbsiň formulasy** bilen kesgitlenýär:

$$\omega = Ae^{-\frac{\varepsilon}{kT}}, \tag{9.6}$$

bu ýerde ε – molekulanyň energiýasy, A – molekulalaryň ýerleşişlerine bagly koeffisiýent. Bu koeffisiýentiň ululygy deň bolanda mikrohallaryň ähtimallygy diňe energiýa baglydyr we Gibbsiň formulasyndan gornüşi ýaly, Bolsmanyň formulasyna meňzeşdir. Ýöne Bolsmanyň kanuny gysga wagt pursatynda köp sanly molekulalaryň paýlanyşyna seredýär. Gibbsiň kanuny bolsa bir molekula barada maglumat berip bilýär.

Indi, gaz molekulalarynyň akymynyň kiçijik deşikden geçişine seredeliň. Kiçijik deşikden gazyň haýal akmagyna **effuziýa** diýilýär. Effuziýanyň iki görnüşine seredeliň.

1. Gaz molekulalarynyň erkin ylgaw ýolunyň uzynlygy deşigiň diametrinden has uly. Bu ýagdaý gazyň basyşynyň kiçi bahalarynda bolýar we oňa molekulalaryň özara çakyşmasy uly täsir etmeýär. Wagt birliginde deşikden geçýän gazyň massasy aşakdaky formula bilen kesgitlenýär:

$$m = (p_1 - p_2)S\sqrt{\frac{\mu}{2\pi RT}}, \tag{9.7}$$

bu ýerde S – deşigiň meýdany; p_1 we p_2 – degişlilikde deşigiň iki tarapyndaky basyş. Şu esasda, effuzion usul bilen kiçi basyşlar ölçelýär.

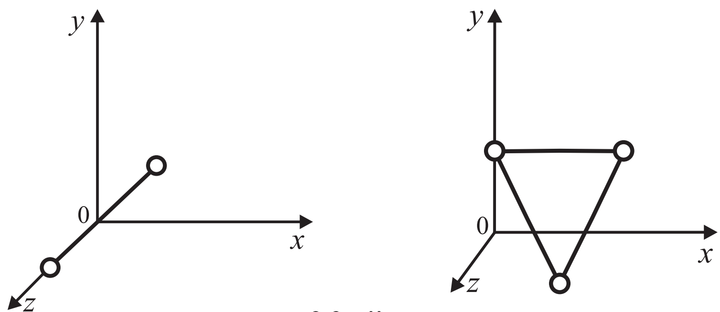
2. Gazyň basyşy uly bolanda molekulalaryň erkin ylgaw ýolunyň uzynlygy kiçi bolýar. Bu ýagdaýda gazyň darajyk deşikden geçişi gidrodinamikanyň kanunlary boýunça geçýär. Şu esasda gazyň basyşynyň wagta baglylykda üýtgeýşi öwrenilýär.

Çaknyşmaýan molekulalaryň wakuumdaky ugrukdyrylan akymyna **molekulýar desseler** diýilýär. Molekulalaryň tizliklerini, çaknyşmada bolup geçýän hadysalary, şeýle hem spin we magnit momentleri bilen baglanyşykly we ş.m. häsiýetleri öwrenmek üçin molekulýar desselerden peýdalanylýar.

9.3. Molekulalaryň energiýasynyň erkinlik dereje boýunça paýlanyşygy

Molekuklýar fizikada molekulalaryň energiýasynyň olaryň **erkinlik derejesi** boýunça paýlanyşynyň aýratyn ähmiýeti bardyr. **Jisimiň giňişlikdäki ornuny doly kesgitlemek üçin gerek bolan baglanyşyksyz koordinatalaryň iň az sanyna erkinlik derejesiniň sany** diýilýär. Meselem, giňişlikde erkin hereket edýän material nokadyň ýagdaýy üç sany koordinata (x, y, z) bilen kesgitlenýän bolsun. Diýmek, onuň erkinlik derejesiniň sany üçe deňdir. Eger material nokat tekizlikde ýa-da göni çyzygyň ugry boýunça hereket edýän bolsa, onda erkinlik derejesiniň sany, degişlilikde ikä we bire deň bolar. Şeýlelikde molekulýar fizikada biratomly gazyň molekulasynyň erkinlik derejesiniň sany üçe deň diýip kabul edilýär ($i = 3$).

Klassyky fizikada iki atomly molekula özara berk baglanyşan iki sany material nokat ýaly kabul edilýär. Bu ýagdaýda üç sany koordinata molekulanyň diňe massa merkeziniň giňişlikdäki ýagdaýyny kesgitläp bilýär. Iki atomly molekulanyň giňişlikdäki ýagdaýyny doly kesgitlemek üçin ýene-de iki sany erkinlik derejesi gerek bolýar. 9.3-nji çyzga seredeliň. Çyzgydan görnüşi ýaly molekulanyň oky boýunça aýlanmagy onuň giňişlikdäki ýagdaýyny üýtgetmeýär. Diýmek, iki atomly molekulanyň bäş erkinlik derejesi bardyr ($i = 5$). Olaryň üçüsi koordinata oklary boýunça herekete, ikisi bolsa aýlanma herekete degişlidir.



9.3-nji çyzga

Üç we ondan-da köp atomly molekulalar üçin erkinlik derejesiniň sany alta deňdir ($i = 6$). Sebäbi beýle molekulalaryň giňişlikde aýlanyp, ornuny üýtgetmesini üç erkin koordinata kesgitleýär. Elbetde, gürrüň ideal gazlar barada gidýänligi üçin, bu ýerde hakyky gazlaryň molekulalaryndaky yrgyldyly hereket hasaba alynmaýar. Ideal gazyň bir molekulasynyň öňe hereketiniň kinetik energiýasynyň

$$\langle \varepsilon_0 \rangle = \frac{3}{2}kT$$

deňlik bilen aňladylýanlygyny göz öňünde tutsak, erkinlik derejesiniň her birine düşýän energiýa şeýle kesgitlener:

$$\langle \varepsilon_1 \rangle = \frac{\langle \varepsilon_0 \rangle}{3} = \frac{1}{2}kT. \tag{9.8}$$

Klassyky statistiki fizikada erkinlik derejeleri boýunça energiýanyň paýlanyşy barada kanun bar. Ol kanuna Bolsmanyň kanuny diýilýär.

Bolsmanyň kanuny. Deňagramlylyk halynda bolan statistiki sistemada öňe hereketiň we aýlanma erkinlik sanynyň hersine, ortaça $kT/2$ energiýa düşýär, her bir yrgyldy erkinlik derejesine bolsa kT energiýa düşýär. Yrgyldyly hereketde potensial energiýanyň hem täsiri bolany üçin orataça energiýa iki esse artyk bolýar.

Şeýlelikde, molekulanyň orta kinetik energiýasyny

$$\langle \varepsilon_1 \rangle = \frac{i}{2}kT \quad (9.9)$$

deňlik bilen aňlatmak bolar. Bu ýerde i – öňe hereketiň, aýlanmanyň we yrgyldynyň ikeldilen erkinlik derejeleriniň jemidir:

$$i = i_{\ddot{o}\check{n}e} + i_{a\acute{y}l} + 2i_{yr}. \quad (9.10)$$

Ideal gaz üçin molekulalaryň arasyndaky täsir güýçleriniň ýoklugy üçin potensial energiýanyň nola deňligini göz öňüne tutsak, içki energiýa üçin aňlatma alyp bileris. Bir molekulanyň $\langle \varepsilon \rangle$ kinetik energiýasyny Awogadronyň sanyna köpeldip, bir mol gazyň içki energiýasyny alarys:

$$U_m = \frac{i}{2}N_A kT.$$

Bu ýerden $kN_A = R$ bolany üçin

$$U_m = \frac{i}{2}RT \quad (9.11)$$

aňlatmany alarys. ν *mol* gaz üçin:

$$U = \nu\frac{i}{2}RT = \frac{m}{\mu}\frac{i}{2}RT, \quad (9.12)$$

bu ýerde $\nu = \frac{m}{\mu}$; m – gazyň massasy; μ – molýar massa.

X BAP. TERMODINAMIKANYŇ BIRINJI BAŞLANGYJY

10.1. Termodinamiki sistemanyň içki energiýasy. Gazyň göwrümi üýtgände edilýän iş. Termodinamikanyň birinji başlangyjy

Mehaniki energiýasy hemişelik bolan, emma içki energiýasy üýtgäp bilýän termodinamiki sistema seredeliň. Termodinamiki sistemanyň içki energiýasynyň üýtgetmegi üçiň onuň üstünde iş etmek ýa-da oňa ýylylyk bermek gerek. Eger silindirdäki gaz porşeniň kömegi bilen gysylsa, gazyň üstünde iş edildigi bolar. Onuň temperaturasy ýokarlanar we gazyň içki energiýasy artar. Sistemanyň içki energiýasyny gyzdyrmak netijesinde hem artdyryp bolar. Bu ýerden mehaniki energiýanyň ýylylyk energiýasyna, ýylylyk energiýanyň bolsa mehaniki energiýa öwrülip bilýänligi görünýär. Aýdylanlardan belli bolşy ýaly, energiýany bir jisimden başga bir jisime iş etmek netijesinde we ýylylyk görnüşinde bermek bolar. **Termodinamiki sistemalar üçin energiýa öwrülişiklerinde energiýanyň saklanma kanunyna termodinamikanyň birinji başlangyjy diýilýär.** Goý, porşenli silindriň içindäki U içki energiýaly gaza Q ýylylyk mukdary berlen bolsun. Sistema daşyndan berlen ýylylyk mukdary položitel alamat bilen alynýar. Şeýle hem položitel alamat bilen sistemanyň daşky güýçleriň garşysyna eden işi alynýar. Onda sistemanyň içki energiýasynyň üýtgemesini (ΔU) bilen billäp ($\Delta U = U_2 - U_1$), energiýanyň öwrülme we saklanma kanuny esasynda alarys:

$$Q = \Delta U + A. \tag{10.1}$$

Bu deňlik termodinamikanyň birinji başlangyjynyň matematiki aňladylyşydyr. Bu esasda termodinamikianyň birinji başlangyjyna aşakdaky kesgitlemäni bermek bolar: **sistema berlen ýylylyk mukdary onuň içki energiýasynyň artmagyna we daşky güýçleriň garşysyna iş etmäge doly sarp edilýär.**

Sistema tükeniksiz kiçi ýylylyk mukdary berlen ýagdaý üçin (10.1) deňlikdeň alarys:

$$dQ = dU + dA, \tag{10.2}$$

bu ýerde dQ – tükeniksiz kiçi ýylylyk mukdary, dU – içki energiýanyň tükeniksiz kiçi üýtgemesi, dA – tükeniksiz kiçi iş. Aňlatmadaky dQ we dA-nyň doly differensial däldigi göz öňünde tutulyp, (10.3) deňlik şu görnüşde hem ýazylýar:

$$\delta Q = dU + \delta A. \tag{10.3}$$

Eger termodinamiki sistema periodiki başky ýagdaýyna dolanyp gelýän bolsa, onda $\Delta U = 0$ bolar. Beýle prosese ýapyk aýlawly proses diýilýär. Ýapyk aýlawly proses üçin

$$A = Q.$$

Ýagny daşky güýçleriň garşysyna edilen iş daşky sistemadan alnan ýylylyk mukdaryna deňdir. Içki energiýanyň üýtgemesi noldan uly bolanda $A < Q$ bolar. Diýmek, sistemanyň daşky güýçlere garşy edýän işi hiç wagt alnan ýylylyk mukdaryndan köp bolup bilmez. Mysal üçin, **hiç bir ýylylyk maşyny alan ýylylyk mukdaryndan artykmaç iş edip bilmez.** Termodinamikanyň birinji başlangyjynyň şunuň ýaly kesgitlemesi hem bardyr. Bu kesgitleme hemişelik işleýän hereketlendirijiniň bolup bilmejekdigini görkezýär.

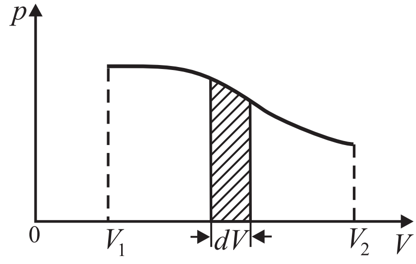
Goý, porşenli silindriň içindäki gaz göwrümini üýtgedip, porşeni dl aralyga süýşüripdir diýeliň. Edileň işiň formulasyny ýazalyň:

$$dA = Fdl = pSdl = pdV, \tag{10.4}$$

bu ýerde S – porşeniň meýdany, $Sdl = dV$ – sistemanyň göwrüminiň üýtgemesi. Gaz göwrümini V_1-den V_2-ä çenli üýtgedende doly işi şeýle tapmak bolar:

$$A = \int_{V_1}^{V_2} pdV. \tag{10.5}$$

Bu aňlatma gaz, suwuk we gaty hallardaky jisimleriň ähli üçin dogrudyr. Bu işiň grafikde aňladylyşyna seredeliň. 10.1-nji çyzgyda basyşyň göwrüme baglylygynyň grafigi görkezilendir.



10.1-nji çyzgy

Gabyň göwrümi dV ululyga üýtgände edilen iş tegmillenen meýdançanyň ululygyna deňdir. Gazyň göwrümi V_1-den V_2-ä çenli üýtgändäki edilen iş absissa okundaky, V_1 we V_2-ä degişli göni çyzyklar hem $p(V)$ egri çyzyk bilen çäklendirilen meýdana deňdir. Grafikde diňe ýylylyk deňleşikli prosesler görkezilýär. Deňleşiksiz proses üçin parametr diýen düşünje ulanylmaýar. Ähli real prosesler denleşiksizdir. Diňe haýal üýtgeyän prosesler üçin deňleşiksizligi hasaba almazlyk kabul edilendir.

10.2. Ideal gazyň içki energiýasy we ýylylyk sygymy

Adaty şertlerde massasy 1 *kg* maddany 1*K* gyzdyrmak üçin gerek bolan ýylylyk mukdaryna **udel ýylylyk sygymy** diýilýär:

$$c = \frac{dQ}{mdT}.$$

Udel ýylylyk sygymynyň ölçeg birligi: $J/kg \cdot K$.

1 *mol* maddany 1*K* gyzdyrmak üçin gerek bolan ýylylyk mukdaryna **molýar ýylylyk sygym** diýilýär:

$$C_m = \frac{dQ}{\nu dT}, \tag{10.6}$$

bu ýerde $\nu = \dfrac{m}{\mu}$ – maddadaky mollaryň sany. Bir mol gaz üçin $\nu = 1$ bolýandygyny göz öňünde tutup ýazmak bolar:

$$C_m = \frac{dQ}{dT} \quad \text{ýa-da} \quad dQ = C_m dT.$$

Soňky aňlatmany we gazyň göwrümi üýtgände edilýän işiň

$$A = pdV \tag{10.7}$$

formulasyny göz öňünde tutup, 1 *mol* gaz üçin termodinamikanyň birinji başlangyjyny ýazalyň:

$$C_m dT = dU_m + pdV_m. \tag{10.8}$$

Izohorik proses üçin göwrümiň hemişelikdigini göz öňünde tutup, deňlikden alarys:

$$C_V dT = dU_m.$$

Bu aňlatmadan kesgitlenýän C_V ýylylyk sygyma **hemişelik göwrümdäki molýar ýylylyk sygym** diýilýär:

$$C_V = \frac{dU_m}{dT}. \tag{10.9}$$

Içki energiýanyň üýtgemesiniň $dU_m = \dfrac{i}{2}RdT$ aňlatmasyňdan peýdalanyp, alarys:

$$C_V = \frac{iR}{2}. \tag{10.10}$$

(10.8) deňlikden izobarik prosess üçin molýar ýylyyk sygymy tapalyň:

$$C_p = \frac{dU_m}{dT} + \frac{pdV_m}{dT}.$$

Içki energiýanyň diňe temperatura baglydygyny göz öňünde tutup, alarys, $\frac{dU_m}{dT} = C_V$. Klapeýron – Mendeleýewiň $pdV_m = RT$ deňlemesini differensirläliň: $pdV_m = RdT$.

Soňky aňlatmalardan peýdalanyp, alarys:

$$C_p = C_V + R \tag{10.11}$$

Bu aňlatma **Maýeriň deňlemesi** diýilýär. Görnüşi ýaly, C_p hemişe C_V-den uludyr.

(10.10) we (10.11) deňliklerden alarys:

$$C_p = \frac{i+2}{2}R. \tag{10.12}$$

(10.10) we (10.12) deňliklerden görnüşi ýaly, C_p we C_V diňe erkinlik derejesiniň sanyna baglydyr. Bu tekrarlama bir atomly gaz üçin temperaturanyň giň aralygynda dogrudyr. Emma iki atomly gaz üçin ýylylyk sygymlary temperatura bagly bolýar. Bu gabat gelmezligiň sebäbi molekulalaryň yrgyldyly hereketine degişli erkinlik derejeleriň hasaba alynmanlygy bilen düşündirilýär.

10.3. Dürli prosesler üçin termodinamikanyň birinji başlangyjynyň ulanylyşy

Izohorik proses ($V = const$). Izohorik prosesde göwrümiň üýtgemeýänligi üçin termodinamikanyň 1-nji başlangyjyny:

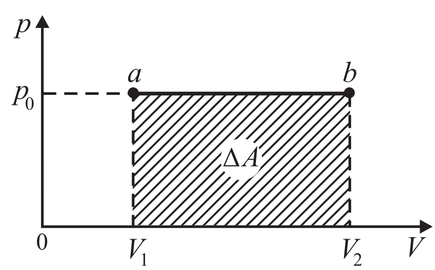
$$dU_m = C_V dT$$

görnüşde ýazmak bolar. Izohorik prosesde islendik massaly gaz üçin termodinamikanyň 1-nji başlangyjy aşakdaky ýaly ýazylýar:

$$dQ = dU = \frac{m}{\mu} C_V dT. \tag{10.13}$$

Izobarik proses ($p = const$). Bu prosesiň diagrammasy 10.2-nji çyzgydaky ab göni bilen aňladylýar. Gazyň V_1 göwrümden V_2 göwrüme çenli izobarik giňelende edýän işi

$$A = \int_{V_1}^{V_2} pdV = p(V_2 - V_1) \tag{10.14}$$



10.2-nji çyzgy

deňlik bilen aňladylýar. Bu iş çyzgydaky tegmillenen meýdan bilen kesgitlenýär. Klapeýron-Mendeleýewiň deňlemesini *a* we *b* nokatlara degişli hallar üçin ýazalyň:

$$pV_1 = \frac{m}{\mu}RT_1,$$

$$pV_2 = \frac{m}{\mu}RT_2,$$

bu ýerden

$$V_2 - V_1 = \frac{m}{\mu}\frac{R}{p}(T_2 - T_1).$$

Bu aňlatmany (10.14) deňlige goýup alarys:

$$A = \frac{m}{\mu}R(T_2 - T_1). \qquad (10.15)$$

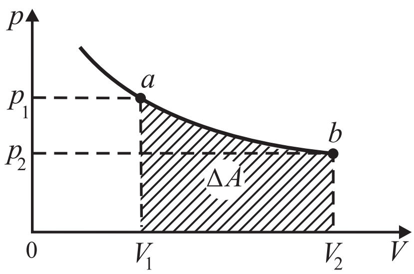
Deňlikden görnüşi ýaly, molýar gaz hemişeligi 1 *mol* gazyň temperaturasy 1*K* gyzanda gazyň giňelme işine deňdir. Izobarik prosesde gaza berlen ýylylyk mukdary şeýle kesgitlenýär:

$$\delta Q = \frac{m}{\mu}C_p dT.$$

Gazyň içki energiýasynyň artmagy:

$$dU = \frac{m}{\mu}C_V dT.$$

Izotermik proses ($T = const$). Ideal gazlar üçin izotermik prosesde Boýl-Mariottyň kanuny ýerine ýetýär: $pV = const$. Bu prosesiň izotermasy 10.3-nji çyzgydaky ýaly bolýar.



10.3-nji çyzgy

Izotermik prosesde temperaturanyň hemişelikdigi üçin gazyň içki energiýasy üýtgemän galýar:

$$dU = \frac{m}{\mu}C_V dT = 0.$$

Gaza berlen ähli ýylylyk mukdary daşky işe sarp bolýar, ýagny

$$Q = A. \qquad (10.16)$$

Izotermik prosesde gazyň giňelende edýän işini tapalyň:

$$A = \int_{V_1}^{V_2} pdV. \qquad (10.17)$$

Klapeýron-Mendeleýewiň deňlemesinden *p*-niň bahasyny tapyp, (10.17) deňlige goýalyň:

$$p = \frac{m}{\mu V}RT.$$

$$A = \int_{V_1}^{V_2} \frac{m}{\mu} RT \frac{dV}{V} = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1} = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{p_1}{p_2}. \tag{10.18}$$

Bulary (10.16) deňlige goýup alarys:

$$Q = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1} = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{p_1}{p_2}. \tag{10.19}$$

Diýmek, izotermik prosesi saklamak üçin gaz giňelip näçe iş eden bolsa, gaza şonça ýylylyk mukdaryny bermeli.

Adiabatik proses (dQ = 0). Termodinamiki sistema bilen daşky sredanyň arasynda ýylylyk alyşmasy bolmaýan proseslere adiabatik proses diýilýär. Gazyň tiz gysylmagy bilen giňelmegi adiabatik prosese degişli hasap edilýär. Gazyň tiz gysylmagy we giňelmegi bolsa içinden ýandyrylýan hereketlendirijilerde, sowadyjylarda we ş.m. ulanylýar. Adiabatik prosesde iş içki energiýanyň hasabyna edilýär. Şonuň üçin hem termodinamikanyň birinji başlangyjy

$$dA = -dU \tag{10.20}$$

görnüşde ýazylýar. Bu ýerde

$$dA = pdV = -\frac{m}{\mu} C_V dT. \tag{10.21}$$

Klapeýron-Mendeleýewiň deňlemesini differensirläp alarys:

$$pdV + Vdp = \frac{m}{\mu} RdT. \tag{10.22}$$

(10.22) deňligi (10.21) deňlige bölüp alarys:

$$\frac{pdV + Vdp}{pdV} = -\frac{R}{C_V} = -\frac{C_p - C_V}{C_V},$$

bu ýerde $\frac{C_p}{C_V} = \gamma$ – Puassonyň koeffisiýenti. Ol ölçegsiz ululykdyr. Oňa **adiabatanyň görkezijisi** hem diýilýär.

Soňky deňliklerden alarys:

$$\frac{dp}{p} = -\gamma \frac{dV}{V}.$$

Bu deňligi, degişlilikde p_1 we p_2, V_1 we V_2 çäklerde integrirläp we potensirläp alarys:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma} \quad \text{ýa-da} \quad p_1 V_1^{\gamma} = p_2 V_2^{\gamma}.$$

Bu ýerden

$$pV^{\gamma} = const. \tag{10.23}$$

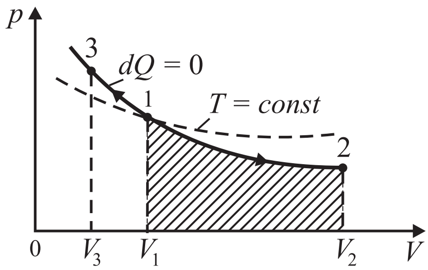
Bu deňlemä **Puassonyň deňlemesi** diýilýär. Klapeýron-Mendeleýewiň deňlemesini ulanyp, Puassonyň deňlemesini başga görnüşlerde-de ýazmak bolar:

$$Tp^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} = const, \quad VT^{\frac{1}{\gamma-1}} = const, \tag{10.24}$$
$$TV^{\gamma-1} = const, \quad T^{\gamma}p^{\gamma-1} = const.$$

Puassonyň koeffisiýentini şeýle kesgitlemek hem bolýar:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{i+2}{i}. \tag{10.25}$$

Bir atomly gazlar (Ne, He we ş.m.) üçin $\gamma = 1{,}67$, iki atomly gazlar (H_2, N_2, O_2 we ş.m.) üçin $\gamma = 1{,}4$. Bu sanlar tejribede alnan bahalar bilen oňat gabat gelýär. Adiabatik prosesi grafiki şekillendirýän çyzyga adiabata diýilýär.



10.4-nji çyzgy

10.4-nji çyzgydaky p bilen V-niň baglanyşygynda adiabata üznüksiz çyzyk bilen görkezilendir. Şol çyzgyda 1 nokada degişli temperatura üçin izoterma hem üzük çyzyk bilen görkezilendir. Puassonyň koeffisiýenti γ birden uly bolany üçin adiabatanyň çyzygy has eňňitdir.

Adiabatik prosesde gaz giňelende temperatura peselýär we basyş izotermik prosesdäkä görä tiz peselýär.

Çyzgydaky 1 we 2 nokatlaryň arasyna degişli adiabata üçin gazyň işini hasaplalyň. Ol çyzgydaky tegmillenen meýdana deňdir.

Iş üçin ýazylan:

$$A = \frac{m}{\mu} C_V (T_1 - T_2)$$

formuladan $C_p - C_V = R$ we $\gamma = \dfrac{C_p}{C_V}$ aňlatmalary ulanyp alarys:

$$C_V = \frac{R}{\gamma - 1}.$$

$$A = \frac{m}{\mu}\frac{R}{\gamma-1}(T_1 - T_2) = \frac{p_1 V_1}{\gamma-1}\left[1 - \frac{T_2}{T_1}\right]. \tag{10.26}$$

(10.23) deňlikden peýdalanyp alarys:

$$\frac{T_2}{T_1}\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}.$$

Adiabatik prosesde işiň formulalaryny aşakdaky görnüşlerde ýazyp bolar:

$$A = \frac{p_1 V_1}{\gamma-1}\left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}\right], \tag{10.27}$$

$$A = \frac{p_1 V_1}{\gamma-1}\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right]. \tag{10.28}$$

Adiabatik prosesde gaz giňelendäki edilen işiň izotermik prosesdäkiden azdygy 10.4-nji çyzgydan görünýär. Munuň sebäbi adiabatik prosesde deňlemäniň temperaturanyň peselmegi bilen baglanyşyklydyr. Izotermik prosesde bolsa temperaturany hemişelik saklamak üçin sistema daşyndan ýylylyk berlip durulýar.

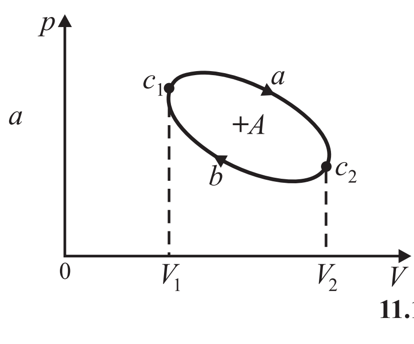
XI BAP. TERMODINAMIKI PROSESLER. TERMODINAMIKANYŇ IKINJI BAŞLANGYJY. ENTROPIÝA

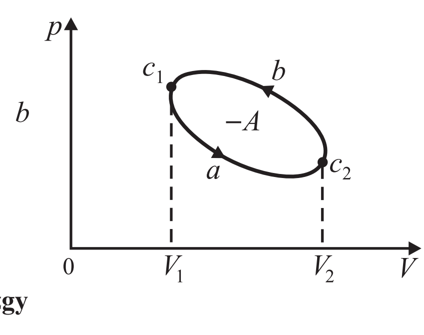
11.1. Aýlawly prosesler

Sistemanyň yzygider birnäçe hallarda bolup, başky halyna öwrülip gelmegine **aýlawly proses** diýilýär. Aýlawly prosesler $p-V$, $p-T$ we ş.m. diagrammalarda görkezilýär. Aýlawly prosesiň başky we ahyrky hallarynyň şol bir nokada düşýänligi üçin, onuň diagrammasy ýapyk çyzyk şekilinde bolýar. Aýlawly prosesi amala aşyrýan we beýleki jisimler bilen energiýa alyş-çalyş edýän jisime **işçi jisim** diýilýär. Ähli ýylylyk maşynlarynyň esasy bolup, aýlawly prosesler hyzmat edýär. Daşyndan alnan ýylylygyň hasabyna periodiki täsir bilen iş edýän hereketlendirijilere **ýylylyk maşynlary** diýilýär. Olara içinden ýandyrylýan hereketlendirijiler, bug we gaz turbinalary, sowadyjy maşynlar we ş.m. degişlidir.

Ideal gaz üçin aýlawly prosesleriň 11.1-nji çyzgydaky diagrammalaryna seredeliň. Ideal gazyň aýlawly prosesini gazyň c_1 haldan c_2 hala çenli giňelmegi (c_1ac_2) we c_2 haldan c_1 hala çenli gysylmagy (c_2bc_1) diýen iki prosese bölmek bolar.

Gaz giňelende ($dV > 0$) $V_1c_1ac_2V_2$ figuranyň meýdanyna deň bolan A_1 položitel iş edýär. Gaz gysylanda bolsa ($dV < 0$) daşky güýçler gaza täsir edip, $A_2' = -A_2$ iş edýärler. Onuň bahasy bolsa $V_2c_2bc_1V_1$ figuranyň meýdanyna deň bolýar. Gazyň bir aýlawly prosesde edýän işi $A = A_1 + A_2$. Ol iş noldan uludyr we 11.1-nji *a* çyzgydaky ac_2bc_1a figuranyň meýdanyna deňdir. Sereden aýlawly prosesimiz (*11.1-nji a çyzgy*) dürs aýlawly prosesdir. Dürs aýlawly proses ýylylyk maşynlarynda ulanylanda daşyndan alnan ýylylyk mukdary işçi jisime berilmek bilen, onuň bir bölegi iş netijesinde daşky jisimlere geçirilýär. 11.1-nji *b* çyzgydaky aýlawly prosesde gazyň





11.1-nji çyzgy

jemi işi otrisateldir we ac_1bc_2 figuranyň (*11.1-nji b çyzgy*) meýdanyna deňdir. Beýle aýlawly prosese ters aýlawly proses diýilýär. Sowadyjylarda bolup geçýän prosesler ters prosesdir. Ters aýlawly prosesde daşky güýçleriň hasabyna işçi jisim ýylylyk energiýasynyň bir bölegini has gyzgyn jisime berýär. Aýlawly prosesde sistemanyň başky ýagdaýyna öwrülip gelýänligi sebäpli, sistemanyň içki energiýasy üýtgemeýär. Onda termodinamikanyň birinji başlangyjyny şeýle ýazmak bolar:

$$A = Q. \tag{11.1}$$

Aýlawly prosesde sistemanyň ýylylygy alýandygyny we berýändigini göz öňünde tutsak

$$A = Q_1 - Q_2,$$

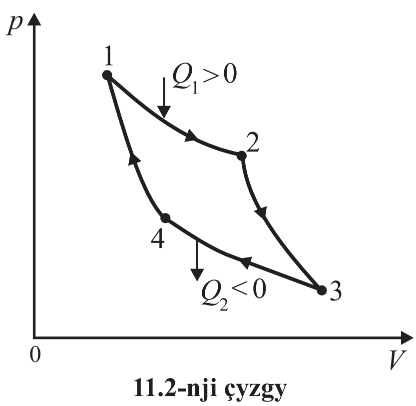
bu ýerde Q_1 – sistemanyň alan ýylylyk mukdary; Q_2 – sistemanyň beren ýylylyk mukdary. Şonuň üçin hem aýlawly prosesiň peýdaly täsir koeffisiýenti diýen düşünje girizilýär:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}. \tag{11.2}$$

Eger termodinamiki proses ilki dürs ugur boýunça, soňra ters ugur boýunça geçip bilýän bolsa, onda bu prosese **öwrülişikli proses** diýilýär. Sistema başky ýagdaýyna dolanyp gelýänligi sebäpli, öwrülişikli proses sebäpli daşky sredada hiç hili özgerişlik bolmaýar. Bu şertleriň ýerine ýetmeýän proseslerine **öwrülişiksiz proses** diýilýär. Termodinamiki prosesiň öwrülişikliligi onuň islendik aralyk hallarynda deňleşikliligini aňladýar. Bu bolsa termodinamiki deňleşikliligiň esasy şertidir. Hakyky prosesleriň deňleşikli däldigi sebäpli, öwrülişikli prosesler tebigatda duş gelmeýär. Emma bu düşünjäni girizmegiň düşünmegi aňsatlaşdyrýan model hökmünde ähmiýeti uludyr.

11.2. Karnonyň aýlawly prosesi. Iň uly peýdaly täsir koeffisiýent

S. Karno tarapyndan öwrenilip, Karnonyň **aýlawly prosesi** adyny alan (1924 ý), öwrülişikli aýlawly prosese seredeliň. Bu aýlawly proses dört ýönekeý prosesden durýar: iki izotermiki, iki adiabatiki proses. Karnonyň aýlawly prosesi termodinamikanyň we ýylylyk tehnikasynyň ösüşinde uly rol oýnady. 11.2-nji çyzgyda ideal gaz üçin Karnonyň dürs aýlawly prosesi görkezilendir. Bu ýerde ideal gaz işçi jisimdir. Aýlawly proses aşakdaky proseslerden durýar: T_1 temperaturada 1-2 izotermiki giňelme, 2-3 adiabatiki giňelme, T_2 temperaturada 3-4 izotermiki gysylyş we 4-1 adiabatiki gysylyş.



11.2-nji çyzgy

Karnonyň aýlawly prosesini şeýleräk göz öňüne getirmek bolar. Goý, silindrdäki gaz süýşýän porşeniň kömegi bilen giňeldilýän bolsun. 1-2 prosesiň izotermiki bolmagy üçin gazyň temperaturasy hemişelik bolmaly. Munuň üçin gyzdyryjydan peýdalanylýar. Gyzdyryjynyň wezipesi gazyň temperaturasyny 1-2 proses döwründe hemişelik saklamakdan ybaratdyr. Onuň üçin gyzdyryjy 1-2 proses döwründe gaza Q_1 ýylylyk mukdaryny berýär ($Q_1 > 0$). 2-3 proses adiabatiki bolany üçin ol döwürde gazy gowy üzňeleşdirmek gerek bolýar. 3-4 proses izotermiki gysylyşdyr. Onda $T_2 < T_1$ bolýar. Bu proses döwründe gaz Q_2 ýylylyk mukdaryny berýär ($Q_2 < 0$). Bu ýylylygyň berilýän jisimine sowadyjy diýilýär. 4-3 aralykda gaz ýene-de üzňeleşdirilýär we adiabatiki gysylyş netijesinde başky halyna getirilýär. Karnonyň dürs aýlawly prosesinde işçi jisiminiň işi Q_1 we Q_2 ýylylyklaryň tapawudyna deňdir:

$$A = Q_1 - Q_2.$$

Edilen A iş gyzdyryjydan alnan ýylylyk mukdaryndan kiçidir. Bu netije Karnonyň islendik dürs aýlawly prosesi üçin dogrudyr.

Şonuň ýaly aýlawly proses üçin termiki peýdaly täsir koeffisiýenti (PTK) aşakdaky ýaly kesgitlenýär:

$$\eta_k = \frac{A}{Q_1}.$$

Işiň ýerine ýylylyklaryň tapawudyny alalyň. Onda:

$$\eta_k = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}. \tag{11.3}$$

PTK aýlawly prosesiň peýdalylyk derejesini görkezýär.

Izotermiki prosesde içki energiýanyň üýtgemeýänligini göz öňünde tutsak, bu prosesdäki alnan ýa-da berlen ýylylyk mukdary gaz giňelendäki ýa-da gysylandaky edilen işe deňdir. Onda:

$$A_{1-2} = \frac{m}{\mu} RT_1 \ln\frac{V_2}{V_1} = Q_1, \tag{11.4}$$

$$A_{3-4} = \frac{m}{\mu} RT_2 \ln\frac{V_4}{V_3} = Q_2.$$

Adiabatiki prosesler üçin adiabatanyň deňlemelerini ulanalyň:

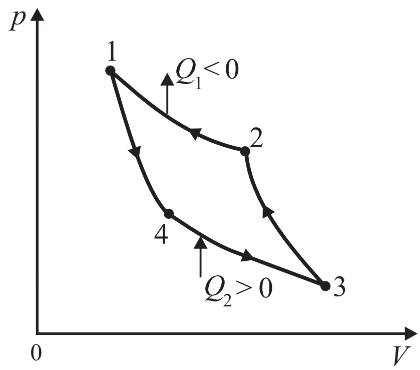
$$T_1 V_2^{\gamma-1} = T_2 V_3^{\gamma-1}; \quad T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_4^{\gamma-1}.$$

Bu ýerden

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_4}{V_3}. \tag{11.5}$$

(11.4) we (11.5) deňliklerden peýdalanyp, (11.3) deňlikden alarys:

$$\eta_k = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{\frac{m}{\mu} RT_1 \ln\frac{V_2}{V_1} - \frac{m}{\mu} RT_2 \ln\frac{V_4}{V_3}}{\frac{m}{\mu} RT_1 \ln\frac{V_2}{V_1}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \tag{11.6}$$



11.3-nji çyzgy

Soňky deňlikden görnüşi ýaly, Karnonyň aýlawly prosesinde PTK-ny temperaturalaryň üsti bilen hem kesgitlemek bolýar. Gyzdyryjynyň we sowadyjynyň temperaturasynyň tapawudy näçe uly bolsa PTK şonça-da uludyr. Ýylylyk maşynlary döredilende bu şert birinji nobatda göz öňünde tutulýar.

Karnonyň ters aýlawly prosesi 11.3-nji çyzgyda görkezilendir. Munda gaza Q_2 ýylylyk berlip, ondan Q_1 ýylylyk alynýar. Netijede:

$$Q_1 < 0, \quad Q_2 > 0.$$

Daşky güýçleriň hasabyna ýylylyk sowuk jisimden gyzgyn jisime geçirilýär. Sowadyjy maşynlar şu düzgünde işleýärler.

11.3. Termodinamikanyň ikinji başlangyjy. Entropiýa

Termodinamiki hadysalary öwrenmek üçin termodinamikanyň birinji başlangyjy ýeterlik däldir Termodinamikanyň birinji başlangyjy termodinamikanyň hadysalary üçin energiýanyň saklanma we öwrülme kanunlaryny aňlatmak bilen, hadysanyň bolup geçýän ugruny görkezmeýär. Şonuň üçin hem fizikanyň ösüş taryhynda ýylylyk hereketlendirijileriniň işiniň derňewi netijesinde termodinamikanyň ikinji başlangyjy baradaky netijä gelnipdir.

Ýylylyk hereketlendirijileriniň PTK-synyň formulasyndan görnüşi ýaly gyzdyryjydan alnan Q_1 ýylylyk mukdarynyň bir bölegi bolan Q_2 ýylylyk mukdary sowadyja berilýär we iş bu iki ýylylyk mukdarynyň tapawudynyň hasabyna edilýär. Sowadyja berilýän Q_2 ýylylyk mukdary näçe az bolsa, şonça-da ýylylyk maşynynyň PTK-sy ýokary bolýar. Emma köp sanly tejribeleriň görkezişi ýaly, PTK-ny bire golaýlaşdyrmak gaty kyn bolýar. Onuň bire deň bolmagy mümkin däldir.

Fransuz alymy S. Karno (1814) ilkinji bolup şu netijä geldi. Soňra fransuz alymlary Klauzius (1850) we Kelwin (1852) bu netijäni tassykladylar.

Şeýlelikde termodinamikanyň ikinji başlangyjyny şeýle aňlatmak bolar: **gyzdyryjydan alnan ýylylyk mukdarynyň hemmesini işe öwürýän, periodiki gaýtalanýan prosesi almak mümkin däldir.**

Gyzdyryjydan alnan ähli ýylylyk işe öwrülýän bolsa sowadyjy gerek bolmazdy. Hereketlendirijide bir ýylylyk çeşmesi bolardy. Munuň ýaly hyýaly hereketlendirijä **ikinji hilli hemişelik hereketlendiriji** diýilýär. Kelwin we Plank termodinamikanyň ikinji başlangyjyny şeýle aňlatdylar: 1) **Ikinji hilli hemişelik hereketlendiriji mümkin däldir.** 2) **Ýeke-täk netijesi: gyzdyryjydan alnan ýylylygy ekwiwalent işe öwürýän proses mümkin däldir.**

Termodinamikanyň ikinji başlangyjyndan görnüşi ýaly ýylylygy doly işe öwürmek mümkin däldir. Ýagny energiýanyň bir bölegi energiýa öwrülişigine ukypsyz bolup galýar. Muňa **energiýanyň dargamagy** diýilýär. Energiýanyň dargamagyny mukdar taýdan häsiýetlendirýän funksiýa **entropiýa** diýilýär.

Karnonyň öwrülişikli aýlawly prosesine seredeliň. PTK-nyň formulalaryndan peýdalansak

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Bu ýerden

$$1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}; \quad \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1};$$

$$\frac{Q_2}{T_2} = \frac{Q_1}{T_1}, \quad \frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} = 0. \qquad (11.7)$$

Q/T gatnaşyga **getirme ýylylyk** (ýylylygyň her $1K$-e degişli bahasy) diýilýär. (11.7) deňlemede Q_1 işçi jisimiň gyzdyryjydan alan ýylylygydyr. Q_2 sowadyja berlen ýylylykdyr. Sowadyjy hem işçi jisime ýylylyk berýär diýip hasaplap, ýöne ony otrisatel alamat bilen alyp, (11.7) deňligi aşakdaky görnüşde ýazmak bolar:

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0. \qquad (11.8)$$

Bu ýerden, Karnonyň aýlawly prosesi üçin **getirme ýylylyklaryň algebraik jemi nola deň** diýen netijäni almak bolar.

Eger aýlawly prosesiň tükeniksiz kiçi prosesiniň dowamynda ýylylyk geçirijiligi netijesinde temperatura üýtgemän galýar diýip kabul etsek, onda her bir elementar proses üçin (11.8) deňligi aşakdaky görnüşde ýazmak bolar:

$$\sum \frac{\Delta Q}{T} = 0.$$

Bu ýerden doly aýlawly proses üçin almak bolar:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0.$$

Eger, soňky aňlatmadan görnüşi ýaly, ýapyk kontur boýunça alnan integral nola deň bolsa, onda bu aňlatma haýsy hem bolsa bir funksiýanyň doly differensialydyr we sistemanyň halynyň haýsy ýol bilen üýtgeýänligine bagly däldir. Diýmek, gözlenýän funksiýany S bilen belläp alarys:

$$\frac{\delta Q}{T} = dS. \qquad (11.9)$$

Termodinamiki funksiýa bolan S **entropiýa** diýlip atlandyrylýar. Entropiýa diýen düşünje Klauzius tarapyndan girizilendir. Jisimiň her bir halyna degişli entropiýanyň kesgitli bahasy bardyr. Aýlawly prosesde, jisimiň ýene-de öňki halyna aýlanyp gelýändigini göz öňünde tutsak, bu proses üçin entropiýanyň üýtgemän galýandygyna göz ýetirmek bolar:

$$\Delta S = 0. \tag{11.10}$$

Madda halynyň deňlemesi belli bolanda 1 *mol* ideal gaz üçin entropiýanyň hasaplanyşyna seredeliň. Termodinamikanyň birinji başlangyjy esasynda

$$dQ = C_V dT + pdV.$$

Bu bahany (11.9) deňlige goýup alarys:

$$dS = C_V \frac{dT}{T} + p\frac{dV}{T}.$$

Bu ýerden basyşy gaz halynyň deňlemesini ulanyp çalşyralyň. Onda:

$$dS = \left(C_V \frac{dT}{T} + \mu R \frac{dV}{V}\right). \tag{11.11}$$

Eger bu differensialdan kesgitsiz integral alsak, onda entropiýanyň bahasyny integrirleýiş hemişeligi çenindäki takyklyk bilen kesgitläp almak bolar:

$$S = \int dS = C_V \ln T + \mu R \ln V + const.$$

Tejribede diňe entropiýanyň üýtgemesini kesgitläp bolýar. (11.11) deňlikden iki hal üçin kesgitli integraly ulanyp, entropiýanyň üýtgemesini kesgitlemek bolar:

$$S_2 - S_1 = C_V \ln \frac{T_2}{T_1} + \mu R \ln \frac{V_2}{V_1}. \tag{11.12}$$

Bu deňlik ideal gaz üçin entropiýanyň üýtgemesiniň aňladylyşydyr. Temperatura ýokarlananda ýa-da göwrüm ulalanda entropiýanyň artjakdygy bu formuladan görünýär. Diýmek, jisime ýylylyk berilse, onuň entropiýasy artýar. Jisim sowadylanda $dQ < 0$ bolýanlygy üçin entropiýa kemelýär ($dS < 0$). Öwrülişikli adiabatiki proses üçin ýylylyk çalyşygy nola deň: $dQ = 0$. Bu ýagdaýda $dS = 0$ we entropiýa üýtgewsiz galýar. Şonuň üçin hem bu prosese **izoentropik proses** diýilýär.

Entropiýa hem içki energiýa ýaly sistemanyň hal funksiýasydyr. **Sistemanyň entropiýasy oňa girýän jisimleriň entropiýalarynyň jemine deňdir.** Ýylylyk çalşygy bolan öwrülişikli prosesde ýylylyk berýän jisimiň entropiýasy artýar, ýylylyk alýan jisimiňki bolsa kemelýär. Netijede, tutuş sistemanyň entropiýasy üýtgemeýär. Hakyky proseslerde öwrülişiklä golaý prosesler bar hem bolsa, doly öwrülişikli proses ýokdur. Gazyň mysalynda, öwrülişiksiz proses öz-özünden göwrümiň giňelmegi, gyzgyn jisimden sowuk jisime ýylylygyň geçmegi bolýar. Netijede, göwrüm giňelmesi we temperaturanyň peselmesi bolup geçýär.

Bu üýtgeşmeler bolsa (11.12) deňlik esasynda ýapyk sistema üçin entropiýanyň köpelmegine getirýär. Muňa entropiýanyň artma prinsipi diýilýär. Şu esasda termodinamikanyň ikinji başlangyjyna başgaça kesgitleme berilýär: **makroskopiki sistemalarda diňe entropiýanyň ulalmagyna getirýän prosesleriň bolmagy mümkindir.** Entropiýanyň fiziki esaslaryny P. Bolsman we U. Gibbs görkezdi.

Makraskopik jisimlerde bolup geçýän hadysalary mikroskopik hadysalaryň derňewi esasynda düşündirýän statistiki fizika laýyklykda, entropiýa **statistiki agram** bilen baglanyşykda düşündirilýär:

$$S = k\ln P,$$

bu ýerde P – statistiki agram, k – Bolsmanyň hemişeligi. Statistiki agram sistemanyň berlen makroskopiki halyny mikroskopiki amala aşyrmalaryň sanyna proporsionaldyr. Ýapyk sistema üçin berlen makrohalyň termodinamiki ähtimallygy W statistiki agrama göni praporsionaldyr. Onda $S \sim k\ln W$.

Şeýlelikde **entropiýa sistemanyň has ähtimal hala geçmäge ymtylýandygyny görkezýär.** Iň ähtimal hal deňleşikli haldyr.

Ýapyk sistema uzak wagtyň dowamynda deňleşikli hala geçýär.

XIX asyryň ortalarynda termodinamikanyň ikinji başlangyjyna nädogry düşünmek esasynda, nemes fizigi R. Klauzius Älemiň "ýylylyk ölümi" diýen teoriýany öňe sürmek bilen, "wagtyň geçmegi bilen Älemde ähli zatlaryň temperaturasy deňleşer" diýen pikire geldi. Soňra bu pikiriň ýalňyşlygy barada köp taglymatlar öňe sürüldi. Ýalňyşlygynyň sebäbi R.Klauziusyň Älemi ýapyk sistema hökmünde kabul etmek bilen, onuň entropiýasynyň artyp, deňleşikli ýagdaýa geljekdigini ykrar edýänligidir. Hakykatda bolsa, Älemi ýapyk sistema hökmünde kabul etmek ýalňyşdyr. Älem wagt we giňişlik nukdaý nazaryndan çäksizdir, "ýylylyk ölümi" teoriýasy bolsa mümkin däldir.

XII BAP. GEÇIRILIŞ HADYSALARY

12.1. Diffuziýa, ýylylyk geçirijilik we içki sürtülme

Deňagramsyz sistemada bolup geçýän hadysalary öwrenýän statistiki fizikanyň bölümine **fiziki kinetika** diýilýär. Deňagramlylygy bozulan sistema hemişe deňagramly ýagdaýa geçmäge ymtylýar. Bu geçiş entropiýanyň ösmegine getirýär we ol öwrülişiksiz prosesdir. Diýmek, fiziki kinetikanyň öwrenýän hadysalary öwrülişiksiz proseslerdir.

Deňagramlylyk bozulanda sistemada molekulalaryň, ýylylygyň, elektrik zarýadynyň we ş.m. akymy ýüze çykýar. **Akym bilen baglanyşykly hadysalara geçiriliş hadysalary diýilýär.** Deňleşikligi sähelçe bozulan sistemalarda üç sany geçiriliş hadysasy ýüze çykýar: **diffuziýa, ýylylyk geçiriliş** we **içki sürtülme** (şepbeşiklik).

Örän kiçi göwrümli, molekulalarynyň konsentrasiýalary n we $n + dn$ bolan iki sany göwrüme seredeliň. Eger olaryň arasyndaky uzaklygy dx diýip bellesek, onda dn/dx konsentrasiýanyň üýtgeýiş tizligini häsiýetlendirer. Bu gatnaşyga **konsentrasiýanyň gradiýenti** diýilýär. x okuň ugry diffuziýanyň ugry bilen gabat gelse, dn/dx otrisatel ululyk bolar. Madda pes konsentrasiýaly tarapa süýşer. Bu ähli molekulalaryň bir tarapa hereket edýändigini aňlatmaýar. Molekulalaryň hereketi dürli tarapa ugrykldyrylandyr. Emma agzalan ugur boýunça molekulalaryň süýşmeginiň ähtimallygy ýokarydyr. Eger akymyň ugruna perpendikulýar ýagdaýda S hyýaly meýdançany ýerleşdirsek, onda meýdançadan ýokary konsentrasiýaly tarapdan pes konsentrasiýaly tarapa geçýän molekulalaryň sany ters ugur boýunça geçýän molekulalaryň sanyndan köpdür. Diffuziýanyň esasy kanuny: **wagt birliginde x oka perpendikulýar meýdançadan geçýän molekulalaryň massasy konsentrasiýanyň otrisatel gradiýentine** göni proporsionaldyr:

$$M = -D\frac{dn}{dx}S, \tag{12.1}$$

bu ýerde D – **diffuziýa koeffisiýenti**. (12.1) deňlik tejribe üsti bilen alnan formuladyr. Oňa **Fikiň kanuny** diýilýär.

Sistemanyň dürli nokatlarynda temperaturalaryň tapawudy bar bolsa, ýylylyk geçirilişi bolýar. Goý, aralary dx bolan iki nokadyň temperaturalary, degişlilikde T we $T + dT$ bolsun. dT/dx gatnaşyk temperaturanyň peseliş çaltlygyny görkezer. Bu gatnaşyga **temperaturanyň gradiýenti** diýilýär. Temperaturalar deňleşen şertinde öňki ýokary temperaturaly tarapdan ýylylyk geçmesi kesiler. ***S* meýdançadan perpendikulýar ugur boýunça wagt birliginde geçýän ýylylyk mukdaryna ýylylyk akymy diýilýär:**

$$q = -\chi\frac{dT}{dx}S, \tag{12.2}$$

bu ýerde q – ýylylyk akymy, χ – ýylylyk geçirijilik koeffisiýenti. (12.2) formuladan görnüşi ýaly ýylylyk geçirjiligi temperaturanyň gradiýentine göni proporsionladyr. Bu deňlik Furýeniň kanunydyr.

Suwuklyk ýa-da gaz bir tarapa hereket edende wagtyň geçmegi bilen onuň gatlaklarynyň tizlikleriniň deňleşmesi bolup geçer. Ýokary tizlikli gatlaklaryň tizligi peseler. Pes tizlikli gatlaklaryň tizligi bolsa ýokarlanar. Bu hadysa **içki sürtülme** ýa-da şepbeşiklik arkaly ýüze çykýar diýlip düşündirilýär.

x okuň ugry boýunça hereket edýän suwuklyga ýa-da gaza seredeliň. Gatlaklaryň tizlikleri dürli diýip kabul edeliň. y okuň ugrunda alnan aralygy dy bolan iki gatlakdaky tizlikleriň tapawudy $d\upsilon$ bolsun. Onda $d\upsilon/dy$ **tizligiň gradiýenti** bolar. Suwuklygy ýa-da gazy herekete getirýän sebäp ýok bolanda gatlaklaryň tizlikleri deňleşip başlaýar. Tizlikleriň deňleşmesi içki sürtülme güýjüň hasabyna bolýar. Onuň ululygy

$$F = -\eta\frac{d\upsilon}{dy}S, \tag{12.3}$$

bu ýerde η – **dinamiki şepbeşiklik**. Minus alamaty sürtülme güýji bilen tizligiň ugurlarynyň garşylyklydygyny görkezýär.

12.2. Deňleşiş wagty

Deňleşiksiz sistemada ýylylyk deňleşigi dürli wagtlarda bolup geçýär. Meselem, gyzgyn demri suwa oklasak, deňleşik gysga wagtda bolup geçýär. Emma gyzgyn kerpiç howada haýal sowaýar. Kislorod bilen azot gysga wagtda garyşýar we deňleşiklilik döreýär. Emma mis kuporosynyň ergininiň deňleşiklili ýagdaýa geçmegi üçin köp wagt gerek bolýar. Molekulalaryň tizlikleriniň deňleşmesine hem şuňa meňzeş mysallar getirmek bolar. Dürli maddalar üçin deňleşme wagtyny takyk kesgitlemek mümkin däldir. Sebäbi ol maddanyň formasyna we göwrüm ölçeglerine baglydyr.

Bu mesele umumy görnüşde çözülende diffuziýa üçin deňleşiş wagty şeýle kesgitlenýär:

$$t = k_1 \frac{L^2}{D}, \tag{12.4}$$

bu ýerde k_1 – sistemanyň geometrik aýratynlyklaryna bagly koeffisiýent we berlen sistema üçin hemişelikdir. L – deňleşmäniň bolup geçýän oblastynyň ölçegi, D – diffuziýa koeffisiýenti.

Temperaturanyň deňleşiş möhleti

$$t = k_2 \frac{L^2}{\lambda} \tag{12.5}$$

formula bilen kesgitlenýär. Bu ýerde $\lambda = \dfrac{\chi}{\rho C_p}$, ρ – dykyzlyk, C_p – hemişelik basyşdaky udel ýylylyk sygym, k_2 – sistemanyň geometrik aýratynlyklaryna bagly koeffisiýent, χ – ýylylyk geçirijilik koeffisiýenti.

Tizlikleriň deňleşiş möhleti

$$t = k_3 \frac{L^2}{\nu} \tag{12.6}$$

formula bilen kesgitlenýär. Bu ýerde $\nu = \dfrac{\eta}{\rho}$ – **kinetik sepbeşiklik koeffisiýenti**, η – dinamiki şepbeşiklik koeffisiýenti, k_3 – sistemanyň geometrik aýratynlyklaryna bagly koeffisiýent.

12.3. Molekulanyň erkin ýolunyň uzynlygy

Maddalarda molekulalaryň sanynyň köplügi, molekulalaryň hasaba alarlyk göwrümi eýelemegi hereket netijesinde olaryň yzygiderli çaknyşyp durmagyna getirýär. Iki çaknyşmanyň aralygynda molekulalar deňölçegli we göni hereket edýär diýip hasaplanylýar.

Erkin hereket sebäpli bir çaknyşmadan beýleki çaknyşma çenli molekulanyň geçen λ ýoluna **erkin ýoluň uzynlygy** diýilýär. Bu aralyk dürli bahalara eýe bolup biler. Şonuň üçinem gazlaryň kinetiki teoriýasynda erkin ýoluň ortaça $\langle\lambda\rangle$ uzynlygy diýlip atlandyrylýan düşünje girizilýär. $\langle\lambda\rangle$ gaz molekulalarynyň ählisini häsiýetlendirýän ululykdyr. Molekulýar-kinetik teoriýa esasyndaky hasaplamalar erkin ýoluň ortaça uzynlygy üçin aşakdaky formulany berýär:

$$\langle\lambda\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}\,\pi d^2 n_0}, \tag{12.7}$$

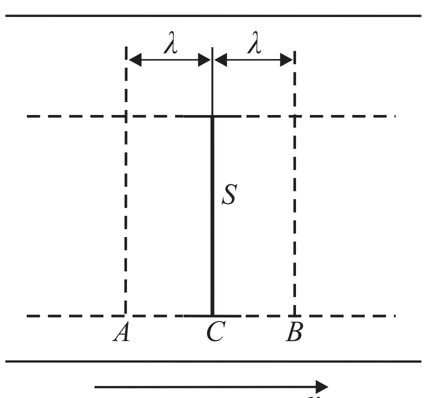
bu ýerde n_0 – gaz molekulalarynyň konsentrasiýasy; d – molekulanyň effektiw diametri.

Molekulalaryň çaknyşmasy diýen düşünjä molekulalaryň bir-birine degmegi diýip düşünmek nädogrudyr. Fizikanyň elementar kursundan belli boluşy ýaly, molekulalaryň aradaşlygyna baglylykda çekişme we itekleşme güýçleri ýüze çykýar we molekulalaryň galtaşmagynyň öňüni alýar. Şonuň üçinem iň golaý ýerleşen molekulalaryň merkezleriniň arasyndaky uzaklyga **effektiw diametr** (d) diýilýär. Ol molekulalaryň hakyky diametrinden uludyr. Effektiw diametriň kömegi bilen hasaplanylan kesige molekulanyň **effektiw kesigi** diýilýär. Sistemanyň deňleşiksiz haldan deňleşikli hala geçiş prosesine **relaksasiýa** prosesi diýilýär. Şeýle geçiş üçin sarp bolýan wagta relaksasiýa wagty diýilýär. Haýsy hem bolsa bir fiziki ululygyň deňleşiklik halyndan gyşarmagynyň e (natural logarifmiň esasy) esse peselmegi üçin gerek bolan wagt **relaksasiýa wagty** diýip kabul edilendir. Sistemanyň her bir parametriniň relaksasiýa wagty üýtgeşikdir. Tutuş sistemanyň relaksasiýa wagty iň uly baha eýedir.

12.4. Gazlarda geçiriliş hadysasynyň molekulýar-kinetik teoriýasy

Gazlaryň kinetik teoriýasynyň esasynda diffuziýa üçin Fikiň formulasynyň alnyşyna we diffuziýa koeffisiýentiniň molekulalaryň erkin ýolunyň ortaça uzynlygy bilen baglanyşygyna seredeliň.

12.1-nji çyzgyda görkezilen S meýdanly kesikden t wagtyň dowamynda sag tarapa n_1 molekula, çep tarapa bolsa n_2 molekula geçýär diýip alalyň. x okuň ugry boýunça gazyň konsentrasiýasy peselýän bolsa ($n_1 > n_2$), meýdançadan ortaça $\langle\lambda\rangle$ uzaklykda sagda we çepde ýerleşen molekulalar S meýdança çenli çaknyşmasyz gelip ýetýärler (Gelejekde $\langle\lambda\rangle$-ni λ we $\langle\upsilon\rangle$ orta arifmetik tizligi υ görnüşde ýazarys).



12.1-nji çyzgy

S meýdançadaky gaz molekulalarynyň konsentrasiýasyny n_0 diýip kabul edeliň. A kesikde molekulalaryň konsentrasiýasy C kesikdäkiden $\frac{\Delta n_0}{\Delta x}\lambda$ ululykça köpdür. B kesikde bolsa tersine

$\frac{\Delta n_0}{\Delta x}\lambda$ ululykça azdyr. Bu ýerde $\frac{\Delta n_0}{\Delta x}$ – birlik göwrümdäki molekulalaryň sanynyň x okuň ugry boýunça birlik aralyga süýşülendäki üýtgemesi. Molekulalaryň hereketiniň bitertipliligini göz öňünde tutup, x ugur boýunça hereket edýän molekulalaryň sanyny, takmynan ähli molekulalaryň sanynyň 1/6-ine deň diýip kabul edeliň. Molekulalaryň orta arifmetik tizligini υ bilen belgilesek, onda t wagtyň dowamynda S meýdançadan geçjek gazyň göwrümi υtS bolar. Onda

$$n_1 = \frac{1}{6}\left(n_0 + \frac{\Delta n_0}{\Delta x}\lambda\right)\upsilon tS,$$

$$n_2 = \frac{1}{6}\left(n_0 + \frac{\Delta n_0}{\Delta x}\lambda\right)\upsilon tS,$$

bu ýerden

$$n_1 - n_2 = \frac{1}{6}2\frac{\Delta n_0}{\Delta x}\lambda\upsilon tS = \frac{1}{3}\lambda\upsilon\frac{\Delta n_0}{\Delta x}St.$$

S meýdançadan geçen gazyň massasy $\Delta m = (n_1 - n_2)m_0$ bolar. Bu ýerde m_0 – bir molekulanyň massasy. Soňky deňliklerden alarys:

$$\Delta m = \frac{1}{3}\lambda\upsilon\frac{\Delta n_0 m_0}{\Delta x}St,$$

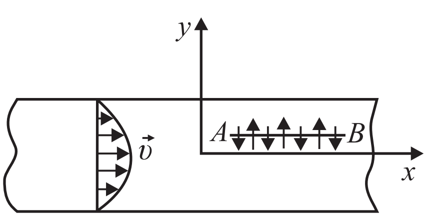
bu ýerde $\frac{\Delta n_0 m_0}{\Delta x} = \frac{\Delta\rho}{\Delta x}$ – gazyň dykyzlygynyň gradiýentidir: $m_0\Delta n_0 = \Delta\rho$ – birlik göwrümdäki gaz massasynyň x okuň ugry boýunça birlik aralyga süýşendäki dykyzlygynyň üýtgemesidir. Soňky deňligi diffuziýa üçin ýazylan Fikiň formulasy bilen deňeşdirsek, diffuziýa koeffisiýenti üçin alarys:

$$D = \frac{1}{3}\upsilon\lambda, \tag{12.8}$$

bu ýerde υ – molekulanyň orta arifmetik tizligi, λ – molekulanyň erkin ýolunyň ortaça uzynlygy.

Molekulanyň orta arifmetik tizliginiň $\upsilon = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$ formula, erkin ýoluň ortaça uzynlygynyň (12.7) formula bilen kesgitlenýändigini göz öňünde tutsak, diffuziýa koeffisiýenti $\sqrt{T}$-e göni proporsionaldyr we basyşa ters proporsionaldyr.

Indi içki sürtülmäniň arifmetik tizlige we erkin ýoluň ortaça uzynlygyna baglylygyna seredeliň. Goý, turba boýunça gazyň akyş tizligi merkeze golaýlaşdygyça artýan bolsun (*12.2-nji çyzgy*). Diýmek, gatlaklaryň tizligi deň däldir. Eger turbada AB araçägi alsak, onda gaz molekulalarynyň tizligi araçägiň aşagynda ýokarsyna görä uludyr.



12.2-nji çyzgy

Akymyň ugry boýunça S meýdançany alyp, diffuziýa seredenimizdäki ýaly pikir ýöredip, impuls üçin aşakdaky deňligi ýazmak bolar:

$$Ft = \frac{1}{3} m_0 n_0 \lambda \upsilon \frac{\Delta u}{\Delta z} St,$$

bu ýerde u – gazyň akyş tizligi. Soňky deňlikden alarys:

$$F = \frac{1}{3} m_0 n_0 \lambda \upsilon \frac{\Delta u}{\Delta z} S.$$

Bu deňligi içki sürtülmäniň

$$F = \eta \frac{\Delta u}{\Delta s} S$$

formulasy bilen deňeşdirip alarys:

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \lambda \upsilon, \qquad (12.9)$$

bu ýerde $\rho = m_0 n_0$ – gazyň dykyzlygy.

Gazyň molekulýar-kinetik teoriýasyny ulanyp, ýylylyk geçirijiligi üçin aşakdaky formulany almak bolar:

$$q = \frac{1}{3} C_V \rho \lambda \upsilon \frac{\Delta T}{\Delta x} St.$$

Bu deňligi ýylylyk geçirijiligi üçin Furýeniň formulasy bilen deňeşdirip, ýylylyk geçirijiliginiň koeffisiýenti üçin

$$\chi = \frac{1}{3} C_V \rho \lambda \upsilon \qquad (12.10)$$

deňligi alarys.

(12.8), (12.9) we (12.10) formulalardan görnüşi ýaly, geçiriliş hadysalarynyň koeffisiýentleri orta arifmetiki tizlige we molekulanyň erkin ýolunyň ortaça uzynlygyna göni proporsionaldyr. Bu formulalar molekulalaryň erkin ýolunyň ortaça uzynlygyny, orta arifmetik tizligi kesgitlemäge mümkinçilik berýär. Molekulýar-kinetik teoriýanyň bu netijeleri ýokary takyklyk bilen tapawutlanmasa-da birnäçe peýdaly netijeler almaga mümkinçilik berýär.

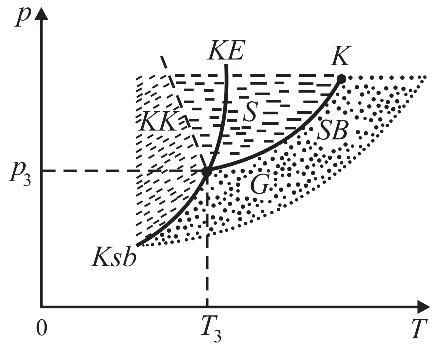
XIII BAP. HAKYKY GAZLAR, SUWUKLYKLAR WE GATY JISIMLER

13.1. Faza we faza öwrülişikleri

Maddanyň fiziki häsiýetleri boýunça biri-birinden tapawutlanýan termodinamiki deňleşikli hallaryna faza diýilýär. Suwly ýapyk gapda iki hili faza bolýar. Biri suw, beýlekisi bolsa suw buglarynyň howa bilen garyndysydyr. Eger suwa bölejik buz oklaýsak, onda üç faza alarys. Bu ýerde buz suwuň gaty fazasydyr. Faza düşünjesini maddanyň agregat haly bilen garyşdyrmaly däldir. Şol bir agregat halyndada madda dürli modifikasiýalarda, diýmek dürli fazalarda bolup bilýär. Mysal üçin, buz bäş dürli modifikasiýada bolup bilýär. Maddanyň bir fazadan beýleki faza geçmegine **faza öwrülişigi** diýilýär. Faza öwrülişigi maddanyň hil taýdan üýtgemegine getirýär. Gaty jisimiň suwuklyga we buga öwürülmegi ýa-da tersine gaty jisimiň bir kristallik gurluşdan başga bir kristallik gurluşa geçmegi faza öwrülişiginiň mysalydyr. Faza öwrülişikleri iki hili bolup bilýär. Ýylylygy bölüp çykarmak ýa-da siňdirmek bilen bolup geçýän faza öwrülişiklerine **birinji hilli faza öwrülişikleri** diýilýär. Bugarma, ereme, kristallaşma we ş.m. oňa mysal bolup biler. Öwrülişik netijesinde çykarylýan ýa-da siňdirilýän ýylylyk mukdaryna **faza öwrülişiginiň ýylylygy** diýilýär. Birinji hilli faza öwrülişik entropiýanyň we göwrümiň üýtgemegi bilen hemişelik temperaturada bolup geçýär. Meselem, ereme temperaturasynda gaty madda gyzmaklygyny bes edýär. Berlen ýylylyk mukdary onuň kristallik gurluşyny bozmaklyga sarp bolýar. Tertipli kristallik gurluş bitertip ýagdaýa geçýär. Netijede entropiýa artýar. Kristallaşmada bolsa kristallik gurluşy emele getirmek üçin madda ýylylygy özüne siňdirýär. Ýylylyk bölüp çykarmak we siňdirmek bilen bagly bolmadyk faza öwrülişigine **ikilenji hilli faza öwrülişigi** diýilýär. Bu öwrülişikde göwrüm we entropiýa üýtgewsiz galýar, ýylylyk sygymy çalt üýtgeýär. Maddalaryň degişli temperaturada ferromagnit haldan paramagnit hala geçmegi ikinji faza öwrülişiginiň mysalydyr. Pes temperaturalarda käbir maddalar aşageçiriji hala geçip, elektrik garşylygyny doly ýitirýärler. $T \approx 3K$ töweregi temperaturada geliý aşa akyjylyk häsiýetine eýe bolup, içki sürtülmesiz madda öwrülýär. Bu öwrülişikler hem ikinji faza öwrülişigine degişlidir. Köp fazaly sistemada şol bir wagtda termodinamiki deňagramlylykdaky fazalaryň bolmagyna **fazalaryň deňagramlylygy** diýilýär. Ýapyk gapda ýerleşen suw özüniň doýgun bugy bilen degişli şertlerde fazalaryň deňleşikli şertlerini ýüze çykarýar. Ereme temperaturasynda bir sistemany emele getirýän buz we suw hem fazalaryň deňleşikliliginiň mysalydyr. Dürli konsentrasiýaly garyşmaýan suwuklyklaryň bileliginde hem fazalaryň deňleşikliligi bolýar. Suw bilen trietileniň garyndysy munuň mysalydyr.

Fazalaryň deňleşikliliginiň şerti Gibbsiň fazalar üçin düzgüni bilen kesgitlenýär: ***K* düzüjiden durýan maddada şol bir wagtda *K* + 2 – den köp deňleşikli faza bolup bilmeýär.** Sistemadaky fazalaryň deňleşikliligini bozman üýtgäp bilýän fiziki parametriň sany $K + 2 - \varphi$. Bu ýerde φ – deňleşikli fazalaryň sany. Meselem, iki düzüjili sistemada üç faza dürli temperaturalarda deňleşikli halda bolup biler, ýöne basyş we düzüjileriň konsentrasiýasy berlen temperatura bilen kesgitlenýär.

Haly häsiýetlendirýän dürli parametrlere (T, p we ş.m.) baglylykda deňleşikli halyň geometrik şekillendirmesine **hal diagrammasy** diýilýär. Sistema diňe himiki taýdan arassa bir düzüjiden durýan bolsa faza **agregat haly** bilen gabat gelýär. Bu ýagdaý üçin hal diagrammasy p we T koordinatalarynda gurulýar (*13.1-nji çyzgy*). Diagrammada alnan islendik nokat basyşyň we temperaturanyň berlen bahasyndaky deňleşikli haly şekillendirýär. Diagrammadaky çyzyklara faza deňleşikliliginiň



13.1-nji çyzgy

egri çyzyklary diýilýär. Olar bugarmanyň egrisi (SB), eremäniň egrisi (KE) we sublimasiýa egri çyzygy (Ksb) görnüşde çyzylýar. Bu egriler meýdany üç oblasta bölýärler.

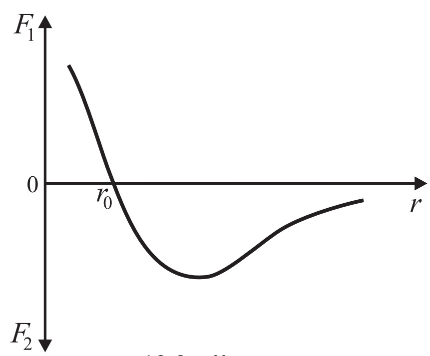
Ol oblastlar gaty (KK), suwuk (S) we gaz görnüşdäki (G) fazalaryň bolýan şertlerine (basyşyna we temperaturasyna) degişlidir. Üç egri çyzygyň birleşýän T_3 nokady bir wagtda üç fazanyň deňagramlykda bolýan şertini (basyşyny we temperaturasyny) görkezýär. Bu nokada **üç hal nokady** diýilýär. Her maddanyň diňe bir üç hal nokady bardyr. Suwuň üç hal nokadyna $T = 273{,}16$ K temperatura degişlidir. Bu temperatura Selsiniň şkalasynda 0,01°C degişlidir. Şol bir madda üçin iki faza deňleşikliliginiň egri çyzygyny hasaplamagyň usullary termodinamikada berilýär. Faza öwrülişiginiň basyşyň üýtgemegine bolan baglanyşygy deňleşikli geçýän proses üçin aşakdaky aňlatma görnüşinde berilýär:

$$dT = \frac{T(V_2 - V_1)}{L} dp,$$

bu ýerde L – faza öwrülişiginiň ýylylygy (meselem, bugarmanyň, eremäniň ýylylygy) $V_2 - V_1$ – birinji fazadan ikinji faza geçilende maddanyň göwrüminiň üýtgemesi, T – geçiş temperaturasy (izotermik proses). Bu aňlatma Klapeýron-Klauziusyň deňlemesi diýilýär. Ol egrileriň ýapgytlylygyny kesgitlemäge mümkinçilik berýär. L we T-niň položiteldigini göz öňünde tutsak, ýapgytlyk $V_2 - V_1$ tapawudyň alamaty bilen kesgitlenýär. Suwuklyk bugaranda we gaty madda bug halyna geçende (sublimasiýa) göwrüm ulalýar. $\frac{dT}{dp} > 0,$ onda bu proseslerde faza öwrülişiginiň amala aşmagy bilen basyş ulalsa, temperatura hem ulalmaly ýa-da tersine basyşyň peselmegi bilen temperatura hem peselmeli (Ksb we SB egriler). Eremekde hem köplenç maddalaryň göwrümi ulalýar, diýmek $\frac{dT}{dp} > 0$. Bu bolsa ýene-de öňki netijämizi berýär (Ksb egri). Käbir maddalaryň (H_2O, Ge, çoýun we başgalar) suwuk fazasynyň göwrümi gaty fazasynyň göwrüminden kiçi bolýar, diýmek $\frac{dT}{dp} < 0$. Bu ýagdaý basyş ulalanda temperaturanyň peselmegine getirýär (üzük egri çyzyk). 13.1-nji çyzgydan görünişi ýaly bugarma egrisi SB **kritiki nokat** diýilýän K nokada degişli basyşyň we temperaturanyň bahalaryndan ýokarky bahalarda suwuklygyň gaza geçmegi we tersine geçiş üznüksizdir. Bu geçiş faza öwrülişigi däldir. Kristallik halyň gaz ýa-da suwuklyk görnüşe geçmegi bolsa hemişe fazalaýyn öwrülişikdir. Şonuň üçinem *Ksb* we *KE* egriler hiç ýerde üzülmeýärler. Eremegiň egri çyzygy tükeniksizlige çenli dowam edýär, sublimasiýanyň egri çyzygy bolsa $p = 0$ we ($T = 0$ K) nokada gelýär.

13.2. Hakyky gazlar. Wan-der-Waalsyň deňlemesi

Ozal belläp geçişimiz ýaly, ideal gaz özara baglanyşyksyz, haotik hereket edýän molekulalaryň toplumydyr. Onuň molekulalarynyň göwrümi we molekulalaryň arasyndaky täsir güýçleri hasaba alynmaýar. Pesräk temperaturada we basyşda seýreklendirilen hakyky gazlar häsiýetleri boýunça ideal gazlara golaýdyr. Ýokary basyşlarda gazyň dykyzlygynyň artýanlygy zerarly gaz molekulalarynyň hususy göwrümini hasaba almak zerur bolýar. Şeýle hem gaz molekulalary biri-birine golaý ýerleşende olaryň arasyndaky täsir güýçleri köpelýär. Gaz molekulalarynyň özara täsir güýçleriniň uzaklyga baglylykda üýtgeýşi 13.2-nji çyzgyda görkezilendir. Bu ýerde F_2 – dartyşma, F_1 – itekleşme güýçleri. Grafikden görnüşi ýaly, molekulalaryň arasyndaky uzaklyga baglylykda täsir güýçleri molekulalaryň itekleşmesine we dartyşmasyna getirip bilýär. Real gazlar üçin gaz halynyň deňlemesi ýazylanda molekulalaryň göwrümi we özara täsiri hasaba alynýar. Bir mol gaz üçin ideal gaz halynyň deňlemesini



13.2-nji çyzgy

$$pV = RT \qquad (13.1)$$

görnüşde ýazalyň. Hakyky gaz üçin molekulalaryň göwrümini hasaba alyp, oňa proporsional bolan b ululyk tutuş V göwrümden aýrylýar, ýagny, $V - b$ görnüşde aňladylýar, bu ýerde b – molekulalaryň hususy göwrümi. Hakyky gazlarda molekulalaryň arasyndaky uzaklyk dartyşma güýçlerini ýüze çykarýar. Bu dartyşma güýçler zerarly goşmaça basyş ýüze çykýar. Şonuň üçin (13.1) formuladaky basyşyň üstüne $p_0 = a/V^2$ bolan goşmaça basyş goşulýar. Bu ýerde a – gazyň tebigatyna bagly hemişelik. Agzalan düzedişleri (13.1) deňlemä girizip Wan-der-Waalsyň deňlemesini alarys:

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT. \qquad (13.2)$$

(13.2) formuladaky a we b ululyklar tejribe üsti bilen kesgitlenýär we şol bir gaz üçin hemişelik ululyklardyr.

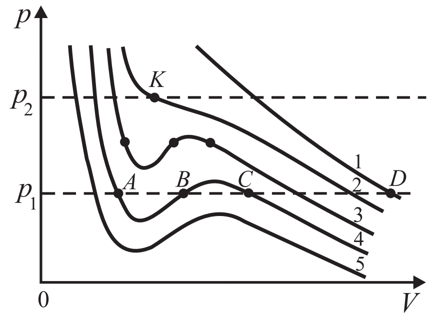
Islendik m massaly gaz üçin (13.2) deňlikden alarys:

$$\left(p + v^2 \frac{a}{V^2}\right)(V - vb) = vRT, \qquad (13.3)$$

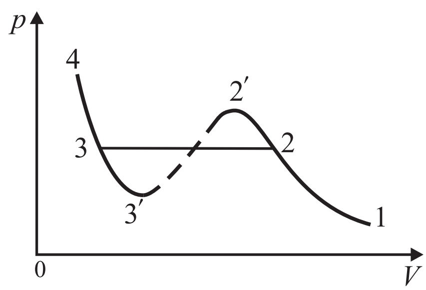
bu ýerde $v = \dfrac{m}{\mu}$ – mollaryň sany.

(13.3) aňlatma göwrüme görä üçünji derejeli deňlemedir. Basyşyň we temperaturanyň berlen bahalarynda onuň üç köki bar. Onuň iki köki kompleks görnüşde hem bolup biler. Eger göwrümiň hakyky ululykdygyny göz öňünde tutsak, onda p we T-niň bahalary üçin V-niň bir ýa-da üç bahasy bolup biler.

(13.3) deňlemäni izotermalary gurup derňemek amatlydyr. Temperaturanyň $T_1 > T_2 > T_3 > T_4 > T_5$ bahalary üçin 1, 2, 3, 4, 5 izotermalary guralyň (*13.3-nji çyzgy*). Bu izotermalara **Wan-der-Waalsyň izotermalary** diýilýär. Çyzgydan görnüşi ýaly, ýokary temperaturada (1 izoterma) AD izobara izotermany diňe bir nokatda kesýär. Diýmek, (13.3) deňlemäniň bir köki bardyr. Madda bir fazalydyr we gaz görnüşindedir. 2, 3, 4, 5 izotermalarda egremli ýerler bardyr. 4 izotermany AD izobara üç nokatda kesip geçýär. Diýmek, göwrümiň üç hakyky bahasy bardyr. Bu bolsa basyşyň we temperaturanyň belli bahasyna üç hili göwrüm degişli bolup, şol bir wagtda maddanyň üç fazada bolup bilýändigini görkezýär. Temperaturanyň ýokarlanmagy bilen 5 izotermadan 4, 3 we beýlekilere geçilmegi izotermodaky egremli ýerleriň tekizlenmegine getirýär. A we C nokatlaryň aralary golaýlaşyp bir K nokada birleşýär. K nokada degişli temperatura **kritiki temperatura** diýilýär. Indi irland alymy T. N. Endrýus tarapyndan kömürturşy gaz üçin tejribede alnan izoterma seredeliň (*13.4-nji çyzgy*). Izotermada 1-2 uçastok bir fazaly gaz halyna degişli bolmak bilen, Boýl-Mariottyň kanunyna takmynan gabat gelýär. 2-3 uçastokda göwrümiň kiçelmegi hemişelik basyşda bolup geçýär. 2-2′, 3-3′ uçastoklar tebigatda bolup geçmeýär. Ony ýörite tejribäniň kömegi bilen almak bolýar. 2-2′ uçastok **aşadoýgun buga**, 3-3′ **aşagyzgyn suwuklyga** degişlidir. Bu durnuksyz hallara **metastabil hal** diýilýär. 2-3 uçastokda maddanyň agregat halynyň üýtgemegi, ýagny gazyň suwuklyga öwrülmegi bolup geçýär. Bu şertde gaz doýgun bug halynda bolýar. Bu uçastok iki fazaly hala degişlidir, 3 nokatda ähli gaz suwuklyga öwrülýär. Kritiki temperaturadan (K) aşakda köp sanly izotermalar geçirip, grafikde iki fazaly bölegi bölüp

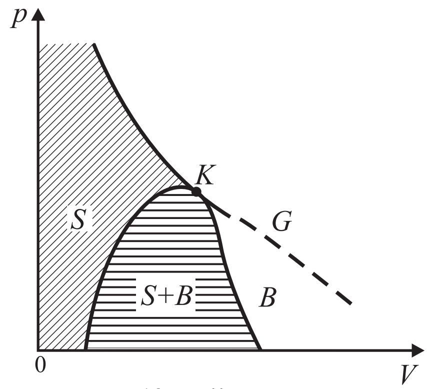


13.3-nji çyzgy



13.4-nji çyzgy

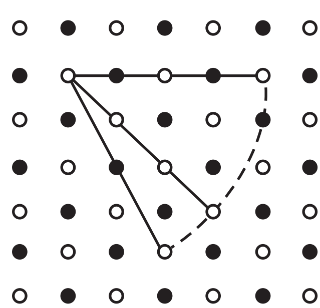
almak bolar (*13.5-nji çyzgy*). Çyzgydaky $S + B$ meýdan suwuklykdan we bugdan durýan iki fazaly hala degişlidir. Ondan çepde suwuklyk (S) haly we sagda bug (B) haly görkezilendir. Has sagyrakda bolsa gaz haly (G) görkezilendir. Bug halyndaky maddany gazdan tapawutlylykda izotermiki gysmak bilen suwuklyga öwürmek mümkin. Gazy bolsa kritiki temperaturadan ýokarda gysmak bilen suwuklyga öwürmek mümkin däldir. Gazlary suwuk görnüşe diňe kritiki temperaturadan pes temperaturalarda öwrüp bolýar.



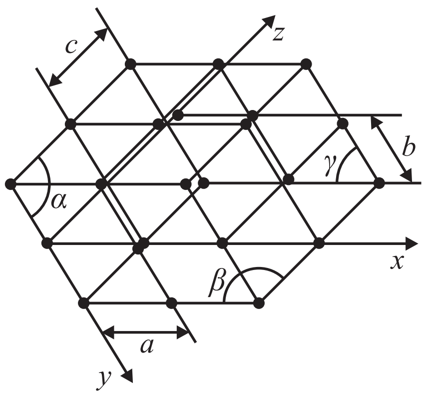
13.5-nji çyzgy

13.3. Kristallaryň gurluşy

Gaty jisimler suwuk we gaz halyndaky maddalardan tapawutlylykda öz göwrümlerini, görnüşlerini üýtgewsiz saklaýarlar. Bu häsiýet gaty jisimleriň molekulalarynyň özara täsir güýçleriniň ululygy bilen düşündirilýär. Tebigatda ýaýran gaty jisimleriň köpüsi **kristallik jisimlerdir**. Düzüji bölejikleriň (atomlaryň, molekulalaryň, ionlaryň) tertipli ýerleşmegi netijesinde kristallar dogry geometrik görnüşe eýe bolýarlar. Üç ugur boýunça alnanda düzüji bölejikleriň tertipli ýerleşip emele getirýän gurluşyna **kristallik gözenek** diýilýär. Her bir bölejigiň ýerleşýän ýerine bolsa, **kristallik gözenegiň düwüni** diýilýär. Kristallik jisimler **monokristallar we polikristallar** diýen iki topara bölünýärler. Bir meňzeş utgaşykly (tertipli ýerleşen) kristallik gözeneklerden durýan gaty jisimlere **monokristallar** diýilýär. Köp sanly tertipsiz utgaşan monokristallaryň toplumlarynyň bitewiligine **polikristallar** diýilýär. Meselem, dürli dag jynslary, metallar we splawlar polikristallardyr. Tebigatda minerallaryň monokristallary köp gabat gelýär. Olaryň daşky görnüşiniň hem dogry geometrik görnüşe gabat gelýäni seýrek däldir. Tebigatda gabat gelýän monokristallaryň iň irileri buzuň, nahar duzynyň, island şpatynyň we ş.m. kristallarydyr. Monokristallar emeli usul bilen hem alynýar. Kristallaryň esasy aýratynlygynyň biri onuň mehaniki, ýylylyk, elektrik, optiki we beýleki häsiýetleriniň kristallografiki ugurlara baglylygydyr. Bu häsiýete **anizotropiýa** diýilýär. Kristalda dürli ugurlar boýunça alnan deň aralyklarda bölejikleriň sanynyň deň däldigi anizotropiýany ýüze çykarýar. Mysal üçin, 13.6-njy çyzgyda monokristallyň bir tekizligi we dürli ugurlary boýunça bölejikleriň gürlüginiň deň däldigi görkezilendir. Bu ugurlar boýunca bölejikleriň gürlüginiň deň däldigi fiziki ululyklaryň deň bolmazlygyna getirýär.


13.6-njy çyzgy

Polikristallarda monokristallik toplumlaryň köplügi zerarly fiziki ululyklar dürli ugurlar boýunça deňdirler. Bu häsiýete **izotroplyk** diýilýär. Kristallik gözenegiň shematik şekili 13.7-nji çyzgyda görkezilendir. Giňişlikde şeýle gözenekleriň köp gezek gaýtalanmasy kristaly emele getirýär.



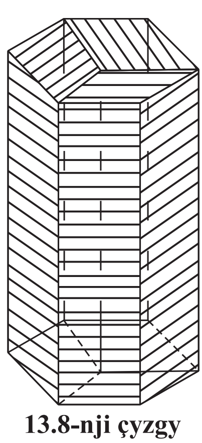
13.7-nji çyzgy

Çyzgydaky parallelepipede gözenegiň sada **öýjügi** diýilýär. Ony häsiýetlendirmek üçin 6 ululyk: 3 sany (a, b, c) gapyrga we 3 sany (α, β, γ) burç alynýar.

Bu ululyklara gözenegiň parametrleri diýilýär. Kristallik gözeneklerde simmetriýanyň dürli görnüşleri bolup bilýär. Giňişlikde käbir süýşmeleriň netijesinde gözenegiň öz-özi bilen gabat geliş häsiýetine **kristallik gözenegiň simmetriýasy** diýilýär. Bu ýerde giňişlikdäki süýşme diýip parallel orun üýtgeme, aýlanma, zerkal serpikme we bularyň dürli kombinasiýasy bolup biler. Meselem, bir sada öýjük belli bir aralyga parallel süýşürilende kristallik gözenekde translasion göçürme simmetriýasy bardyr. Eger öýjük käbir burça öwürilip, ol ýene-de giňişlik gözeneginde öňkisi ýaly orny eýelese, onda bu kristalda aýlanma simmetriýasy bardyr. Sada öýjügiň öwrülme okuna simmetriýa oky diýilýär. Rus alymy E.S. Fýodorowyň subut edişi ýaly, kristallik gözeneklerde 230 dürli simmetriýa bolup bilýär. Muňa başgaça kristallik gözenekleriň 230 dürli giňişlikleýin toparlary bardyr diýilýär.

Simmetriýanyň ösüş tertibinde ýerleşdirilen kristallografik sistemalara seredeliň.

1. Triklin şekilli sistema. Bu sistema üçin $a \neq b \neq c$: $\alpha \neq \beta \neq \gamma$. Sada öýjügiň şekili gyşykburçly parallelepipeddir.


13.8-nji çyzgy

2. Monoklin şekilli sistema. Gapyrgalar bir-birine deň däldir. Iki burç gönüdir, üçünji burç 90°-dan tapawutlydyr: $a \neq b \neq c$; $\alpha = \beta = 90° \neq \gamma$. Sada öýjügiň şekili esasy parallelogram bolan göni prizma ýalydyr.

3. Romb şekilli sistema. Hemme burçlar deň, gapyrgalaryň uzynlyklary dürli: $a \neq b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90°$. Sada öýjük góniburçly parallelopipeddir.

4. Tetroganal şekilli sistema. Hemme burçlar göni, iki gapyrga deň: $a = b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90°$. Sada öýjük esasy kwadrat bolan göni prizmadyr.

5. Romboedrik şekilli ýa-da trigonal sistema. Hemme gapyrgalary we burçlary deň, emma göni däl. $a = b = c$; $\alpha = \beta = \gamma \neq 90°$. Sada öýjükde formulirlenen kub görnüşindedir.

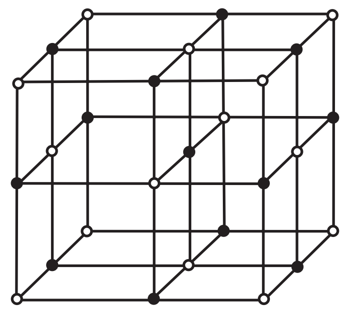
6. Geksogonal şekilli sistema. Gapyrgalary we burçlary aşakdaky şertleri kanagatlandyrýar: $a = b \neq c$; $\alpha = \beta = 90°$; $\gamma = 60°$. Üç sada öýjügi bile degşirip goýsak, 13.8-nji çyzgydaky ýaly altyburçly prizma bolar.

7. Kub şekilli sistema. Gapyrgalary, burçlary deň we göni: $a = b = c$; $\alpha = \beta = \gamma = 90°$. Sada öýjügi kub şekilindedir.

Kristallik gözenegiň düwünlerinde bölejikleriň ýerleşişine we olaryň özara täsirine baglylykda kristallar **ionly, atomly kristallar, metallik** we **molekulýar** kristallar diýilýän dört bölege bölünýärler.

1. Ionly kristallar. Kristallik gözenegiň düwünlerinde dürli alamatly ionlar ýerleşýärler. Olaryň arasynda elektrostatik dartyşa güýçleri täsir edýärler. Bu baglanyşyga **geteropolýar** (dürli polýarlykly) ýa-da **ion baglanyşygy** diýilýär.

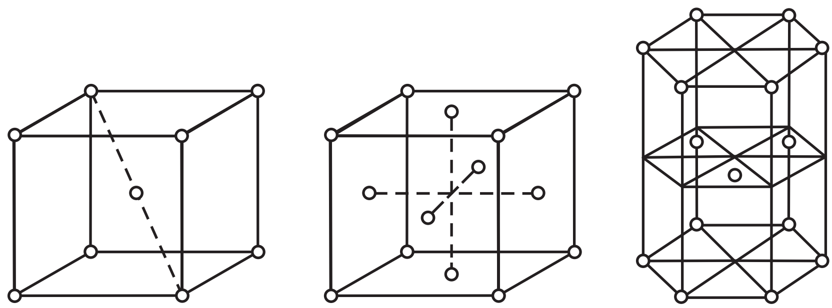
Nahar duzunyň (NaCl) kristallik gözenegine seredeliň (*13.9-njy çyzgy*). Bu gözenek ionlaryň kristalynyň gowy mysalydyr we kub şekilli sistema degişlidir. Çyzgyda garalanmadyk tegelejikler bilen položitel zarýadly natriniň iony, garalanan tegelejikler bilen bolsa otrisatel zarýadly hloryň iony görkezilendir. NaCl gaz halynda natriý bilen hloryň hersiniň bir atomyndan durýan molekulalardan ybaratdyr. Gaty halynda bolsa, görşümiz ýaly, düzüminde molekula bolmadyk ionlaryň kristallaryny emele getirýär. Bu ýerde tutuş kristaly bir ummasyz molekula hökmünde göz öňüne getirmek bolar.



13.9-njy çyzgy

2. Atomly kristallar. Giňişlik gözeneginiň düwünlerinde neýtral atomlar ýerleşýärler. Neýtral atomlaryň baglanyşygyna **gomeopolýar** ýa-da **kowalent baglanyşyk** diýilýär. Bu baglanyşyk Kulon güýçleriniň hasabyna däldir. Bu ýerde baglanyşyga her atomdan bir elektron gatnaşýar we jübüt elektronlaryň baglanyşygyny üpjün edýär. Bu baglanyşyk kwant mehanikanyň esaslary diýilýän bölümde doly düşündirilýär. Gemeopolýar baglanyşyk walent elektronlaryň üsti bilen amala aşyrylýar. Şonuň üçin hem her bir atom üçin baglanyşykly goňşy atomlaryň sany atomyň walent elektronlarynyň sanyna deňdir. Almaz bilen grafit atomly kristallara degişlidir. Olaryň ikisi hem uglerodyň atomlaryndan ybarat bolup, kristallik gurluşlaryna görä tapawutlanýarlar. Bu kristallaryň giňişlik gözenekleriniň dürlüligi olaryň dürli fiziki häsiýetleri ýüze çykarmaklygyna getirýär.

3. Metallik kristallar. Giňişlik gözeneginiň her düwnünde metalyň bir iony ýerleşýär. Olaryň aralarynda bolsa kristal emele gelende atomlardan aýrylan erkin elektronlar hereket edýärler. Bu ýerde otrisatel zarýadly erkin elektronlar položitel zarýadly ionlaryň giňişlikde öz orunlarynda bolmaklygyny üpjün edýärler. Şol bir wagtyň özünde ionlar elektronlary kristallyň içinden goýbermän saklaýarlar. Köplenç, metallaryň giňişlik gözenekleri üç görnüşde bolýar: **göwrümleýin**



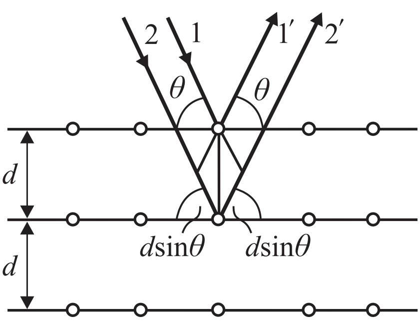
a *b* *ç*

13.10-njy çyzgy

merkezleşdirilen kub (*13.10-njy a çyzgy*), **ýanlaýyn granlary merkezleşdirilen kub** (*13.10-njy b çyzgy*) we **dykyz geksogonal gözenek** (*13.10-njy ç çyzgy*).

4. Molekulýar kristallar. Giňişlik gözenekleriniň düwünlerinde molekulalar ýerleşýärler. Molekulalaryň arasyndaky dartyşma güýçleri kristallik gözenegi dargamakdan saklaýarlar. Bu güýçlere Wan-der Waals güýçleri diýilýär. Molekulýar kristallara gaty halyndaky H_2, N_2, O_2, CO_2, H_2O kristallar degişlidir.

Materiallaryň kristallik gurluşyny öwrenmek üçin rentgen, elektron, neýtron arkaly strukturalary seljermegiň usullary ulanylýar. Bu usullar peýdalanylanda rentgen, elektron, neýtron şöhleleriniň intensiwliginiň giňişlik gözenegi boýunça dürli ugra üýtgemesi öwrenilýär. Bu usullaryň esasynda şöhleleriň difraksion gözenekdäki difraksiýasy durýar. Giňişlikdäki kristallik gözenekde rentgen şöhlesiniň difraksiýasyny öwrenmegiň ýönekeý usuly G. W. Wulf we G we Ý. Breggler tarapyndan tapyldy. Olaryň görkezişi ýaly, difraksiýa şöhleleriň parallel kristallografik tekizliklerden serpikmesi netijesinde bolýar. Kristaly parallel kristallografik tekizlikleriň jemi ýaly göz öňüne getireliň. Olaryň aralyklaryny d bilen belläliň (*13.11-nji çyzgy*). Parallel monohromatik rentgen şöhlesi 1, 2 tekizliklere θ burç bilen düşýär. Bu burça **typma burçy** diýilýär. Düşen şöhle atomlary oýandyrýar we olardan kogerent ikilenji şöhleler (1′, 2′) (serpikme şöhleleri) çykyp, interferensiýa emele getirip bilýär. Käbir ugurlarda serpikýän şöhleleriň fazasy gabat gelýär we maksimal depginlilik alynýar.



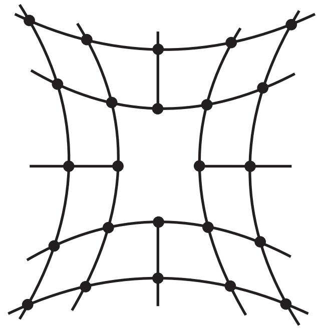
13.11-nji çyzgy

Bu şert $2d\sin\theta = m\lambda$ (m = 1, 2, 3, ...) görnüşde ýazylýan Wulf-Bregleriň formulasyny kanagatlandyrýar. Bu ýerde λ – şöhläniň tolkun uzynlygy. Islendik tolkun uzynlygynda we typma burçunda bu şert ýerine ýetmeýär. Şonuň üçinem kristaly öwürmek we her hili uzynlykly tolkunlary peýdalanmak gerek bolýar.

θ, m we λ-nyň dürli bahalary Wulf-Breggleriň formulasy arkaly kristallik tekizlikleriň arasyndaky d aralygy tapmaga mümkinçilik berýär. Bu usula rentgenostruktur derňew diýilýär. Rentgen şöhlesine derek elektronlaryň we neýtronlaryň akymyny ulanmak bilen hem maddalaryň gurluşy öwrenilýär. Bu usullara elektronografiýa we neýtronografiýa diýilýär.

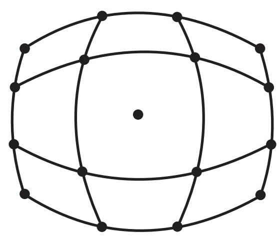
13.4. Kristallaryň deffektleri

Real kristallaryň gurluşynda ideal tertip bolmaýar. Onuň haýsy-da bolsa bir böleginde tertibiň bozulmasy gabat gelýär. Bölejikleriň ýerleşişiniň bozulan ýerine kristallik gözenegiň deffekti diýilýär. Deffektler **makrodeffektlere** hem **mikrodeffektlere** bölünýär. Kristallaryň emele gelmek prosesinde emele gelýän deffektlere (jaýryklara, deşiklere we ş.m.) makroskopik deffektler diýilýär. Tertipliligiň mikroskopik ýoýulmagy netijesinde ýüze çykýan deffektlere bolsa mikroskopiki deffektler diýilýär. Mikrodeffektler nokatlanç hem çyzyklanç deffektlere bölünýärler.



13.12-nji çyzgy

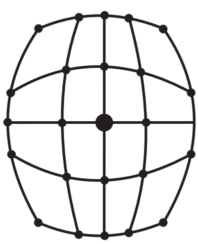
Nokatlanç deffektler **wakansiýa, düwünara atom** we **garyndy atomy** diýen üç görnüşe bölünýärler. Kristallik gözenekde atomyň ýetmezçilik etmegi netijesinde ýüze çykýan deffekte wakansiýa diýilýär (*13.12-nji çyzgy*). Kristallik gözenekde düwünleriň arasyndaky giňişlige artykmaç atom ornaşsa muňa düwünara atom deffekti diýilýär (*13.13-nji çyzgy*).



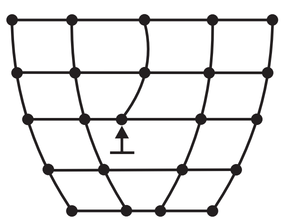
13.13-nji çyzgy

Giňişlik gözeneginde kristallyň we atomyň keseki atom bilen çalşyrylmagyna garyndy atom deffekti diýilýär (*13.14-nji çyzgy*). Bu agzalan deffektler kristallyň periodlarynyň birnäçesiniň bozulmagyna getirýär, emma daş aralyga olaryň zyýany ýetmeýär.

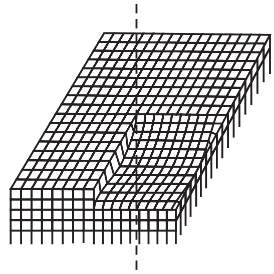
Käbir göni çyzygyň ugruna jemlenen deffekte **çyzyklanç deffekt** ýa-da **dislokasiýa** diýilýär. Bu deffektler kristallik tekizlikleriň çalyşma tertibini bozýar.



13.14-nji çyzgy



13.15-nji çyzgy



13.16-njy çyzgy

Dislokasiýanyň ýönekeý görnüşlerine **gyraky** we **hyrly** dislokasiýa diýilýär. Iki kristallik tekizligiň arasyndaky kristallik ýarym tekizligiň gyra çetinde emele gelýän dislokasiýa gyraky dislokasiýa diýilýär (*13.15-nji çyzgy*). Ýarym tekizligiň gyrasy çyzgydaky ýaly çyzykly dislokasiýany döredýär. Dislokasiýanyň çyzygy belgi bilen görkezilendir. Hyr şekilli dislokasiýa 13.16-njy çyzgyda görkezilendir. Üzük çyzykly oka dislokasiýa oky diýilýär. Şu ok boýunça kristallik tekizlikde bir gezek aýlanylanda diňe bir ýerde suratdaky ýaly dislokasiýa duşýar. Dislokasiýanyň oky göni çyzykdyr. Dislokasiýalar jisimleriň fiziki häsiýetlerine, aýratynda berkligine köp täsir edýär.

Hakyky kristallarda otnositel maýyşgak deformasiýanyň ululygy ideal kristallar üçin hasaplamadan has az bolmagy hem dislokasiýalaryň barlygy bilen düşündirilýär. Diýmek, dislokasiýalar maddalaryň maýyşgaklygyny peseldýär.

III bölüm

ELEKTRIK WE MAGNIT HADYSALARY

XIV BAP. ELEKTRIK ZARÝADY WE ELEKTRIK MEÝDANY

14.1. Elektrik zarýady. Zarýadlaryň saklanma kanuny

Elektrik we magnit hadysalary gadym zamanlardan bäri mälim bolsa-da, olaryň tebigaty diňe soňky asyrlaryň içinde ylmy nukdaý nazardan öwrenilip başlandy. Inersial hasaplaýyş sistema görä hereketdäki elektrik zarýadly bölejikleriň ýa-da jisimleriň özara täsirleriniň elektromagnit meýdany arkaly amala aşýandygy subut edildi. Biri-birleri bilen üznüksiz baglanyşykda bolan elektrik we magnit meýdanlary elektromagnit meýdanyny emele getirýärler. Elektromagnit meýdanynyň kanunlaryny öwrenýän klassyky fizikanyň bölümine **elektrodinamika** diýilýär.

Inersial hasaplaýyş sistema görä hereketsiz zarýadly jisimleriň ýa-da bölejikleriň häsiýetleri we özara täsirleri öwrenilýän elektrodinamikanyň bölümine **elektrostatika** diýilýär.

Tebigatdaky ähli jisimler elektriklenmäge, ýagny elektrik zarýadly bolmaga ukyplydyr. Zarýadly jisimleriň arasynda bolsa özara täsirleşme bardyr. Tebigatda elektrik zarýadynyň iki görnüşi bardyr. Olara şertli otrisatel we položitel zarýadlar diýilýär. Biratly zarýadlar biri-biri bilen itekleşýärler, dürli atly zarýadlar dartyşýarlar.

Tejribeleriň kömegi bilen elektrik zarýadynyň diskretligi anyklanandyr. Islendik jisimiň zarýady elementar e zarýada bütin kratnydyr ($e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ *Kl*). Elektronyň (*massasy* $m_e = 9{,}11 \cdot 10^{-31}$ *kg*) otrisatel zarýadynyň we protonyň (*massasy* $m_p = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ *kg*) položitel zarýadynyň bahalary elementar zarýada deňdir. Islendik jisimiň q zarýadyny

$$q = \pm Ne$$

görnüşde ýazyp bolar. Bu ýerde N – bütin san.

Ähli maddalaryň atomlardan, atomlaryň bolsa protonlardan, elektronlardan we zarýadsyz neýtronlardan durýandygyny göz öňünde tutsak, onda zarýadsyz diýilýän jisimde hem örän köp elementar zarýadlaryň bardygy, ýöne olaryň otrisatel we položitel zarýadlarynyň deňligi we olaryň göwrüm boýunça paýlanyşynyň meňzeşdigi düşnükli bolýar. Eger haýsy-da bolsa bir usul bilen jisimde bir alamatly zarýady bolan bölejikleriň sany köpeldilse, onda jisim zarýadlanar. Jisimde zarýadlaryň umumy sanyny üýtgetmän, olaryň göwrüm boýunça paýlanyşyny üýtgedip, jisimiň bir tarapyny položitel, beýleki tarapyny bolsa otrisatel zarýadlandyryp bolýar.

Zarýadlanma prosesine degişli köp sanly tejribe maglumatlary umumylaşdyrylyp tebigatyň fundamental kanunlarynyň biri bolan zarýadyň saklanma kanuny açyldy.

Zarýadyň saklanma kanuny. Ýapyk sistemada zarýadlaryň paýlanyşy bilen baglanyşykly nähili hadysalar bolýandygyna garamazdan zarýadlaryň algebraik jemi hemişelik saklanýar. Bu ýerde ýapyk sistema diýip daşky jisimler bilen zarýad alyşmaýan sistema aýdylýar.

Şol bir zarýadyň dürli inersial hasaplaýyş sistemalarynda ölçelen bahalary deňdir. Diýmek, elektrik zarýady inwariantdyr. Zarýadly jisim ýa-da bölejik nähili hereket edende-de onuň zarýady üýtgemeýär.

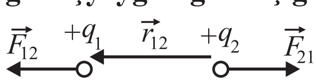
Elektrik zarýadynyň birligi kulon (*Kl*). 1*A* tok geçýän geçirijiniň kese-kesiginden 1 sekuntda geçýän zarýadyň mukdary 1 kulondyr. Elektrik zarýady käbir takyklykda elektrometrleriň kömegi bilen ölçenilýär. Zarýady ölçemegiň dürli usullary bardyr.

14.2. Kulonyň kanuny. Zarýadyň dykyzlygy

Zarýadlaryň özara täsirleri we olaryň elektrik meýdany öwrenilende "nokatlanç zarýad" diýlen düşünjeden peýdalanylýar. Nokatlanç zarýad-çyzykly ölçegleri beýleki täsirleşýän zarýadly jisimlere çenli aralyklardan has kiçi bolan jisimde jemlenen zarýaddyr.

Hereketsiz nokatlanç elektrik zarýadlaryň özara täsir güýçlerini 1785-nji ýylda Ş.Kulon towlanma tereziniň kömegi bilen eksperimental kesgitledi. Şonuň üçin hem şeýle güýçlere kulon güýçleri diýilýär.

Kulonyň kanuny: **wakuumda ýerleşen iki nokatlanç elektrik zarýadyň elektrostatik täsirleniş güýji, zarýadlaryň köpeltmek hasylyna göni, zarýadlaryň aradaşlygynyň kwadratyna bolsa ters proporsionaldyr we olary birleşdirýän göni çyzyga ugurdaş gönükdirilendir** (*14.1-nji çyzgy*):



14.1-nji çyzgy

$$\vec{F}_{12} = k\frac{q_1 q_2}{r^2}\frac{\vec{r}_{12}}{r},$$

bu ýerde k – proporsionallyk koeffisiýenti, $\vec{r}_{12}$, bu q_2 zarýady q_1 zarýad bilen birleşdirýän radius-wektor $(r = |\vec{r}_{12}|)$. $\vec{F}_{12}$, bu q_2 zarýad tarapyndan q_1 zarýada täsir edýän güýç. $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$; $\vec{F}_{21}$, bu q_1 zarýad tarapyndan q_2 zarýada täsir edýän güýç.

Proporsionallyk koeffisiýenti k ölçeg birlikleriniň sistemasyna baglydyr. Halkara sistemasynda (HS)

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}.$$

Tejribeleriň tassyklamagyna görä: $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{Kl^2}{Nm^2}$ – elektrik hemişeligi.

Ýa-da $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}$.

Şeýlelikde

$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r^3}\vec{r}_{12}, \tag{14.1}$$

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{Nm^2}{Kl^2}$$

ýa-da $k = 9 \cdot 10^9 \frac{m}{F}$, bu ýerde F – elektrik sygymynyň birligi (farad).

Iki nokatlanç zarýad täsirleşende olara täsir edýän güýçler moduly boýunça deň bolýar. Güýçleriň ugurlaryny kesgitlemek bolsa aňsat bolany üçin Kulonyň kanunyny

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r^2}$$

skalýar görnüşde hem ulanyp bolýar.

Eger täsirleşýän zarýadlar dielektrik syzyjylygy ε bolan birhilli dielektrikde ýerleşen bolsa kulon güýçleri ε esse azalýar. Kulonyň kanuny

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{\varepsilon r^2}$$

görnüşde ýazylýar.

Täsirleşýän iki zarýadyň töweregine goşmaça zarýadlar ýerleşdirilse başky iki zarýadyň täsirleşmesi üýtgemeýär. Goý, q_0 nokatlanç zarýad N sany q_1, q_2, ..., q_N nokatlanç zarýadlar bilen täsirleşýän bolsun. Onda q_0 zarýada täsir edýän netijeleýji güýç

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^{N} \vec{F}_{o_i}$$

formula bilen kesgitlenýär. Bu ýerde $\vec{F}_{o_i}$ – aýratynlykda alnan q_i zarýadyň q_0 zarýada täsir edýän güýji.

Soňky formuladan peýdalanyp kesgitli ölçegleri bolan iki (ýa-da birnäçe) zarýadly jisimiň arasyndaky täsir güýçleri hasaplap bolýar. Onuň üçin zarýadly jisimleri nokatlanç zarýad ýaly kabul edip boljak kiçi dq zarýadlara bölmeli. Soňra, dq zarýadlary jübüt-jübütden alyp, (14.1) formula bilen täsir güýçleri hasaplamaly we wektorlaýyn goşmaly.

Mehanikada jisimlere material nokatlaryň toplumy görnüşinde garaýşymyz ýaly, her bir zarýadly jisime-de nokatlanç zarýadlaryň ýygyndysy ýaly seredip bolar.

Emma köplenç, zarýadlara jisimde endigan üznüksiz ýerleşen hökmünde garamak has amatly bolýar.

Şu esasda zarýadyň dykyzlygy barada düşünje girizilýär. Jisimiň nähili görnüşdedigine bagly dürli dykyzlyklar barada aýtmak bolar. Mysal üçin:

1. Inçejik uzyn steržen zarýadlanan bolsa, onda elektrik zarýadlarynyň uzynlyk boýunça dykyzlygy tapylýar: $\tau = dq/dl$, bu ýerde dq – tükeniksiz kiçi dl bölegiň zarýady.

2. Eger zarýadlar jisimiň diňe üst gatlajygyna jemlenen bolsa, onda elektrik zarýadlarynyň üst boýunça dykyzlygy kesgitlenilýär: $\sigma = dq/dS$, bu ýerde dq – tükeniksiz kiçi dS meýdanly üstdäki zarýad.

3. Eger zarýadlar jisimiň tutuş göwrümine paýlanan bolsa, onda elektrik zarýadlarynyň göwrüm boýunça dykyzlygy kesgitlenilýär: $\rho = \dfrac{dq}{dV}$, bu ýerde dq – tükeniksiz kiçi jisimiň dV göwrümli ujypsyz bölejiginiň zarýady.

14.3. Elektrostatik meýdan. Elektrostatik meýdanyň güýjenmesi. Superpozisiýa prinsipi

Islendik zarýad töweregindäki giňişlikde elektrik meýdanyny döredýär. Zarýad dynçlykda bolanda onuň döredýän meýdanyna **elektrostatik meýdan** diýilýär. Bu meýdanda ikinji bir zarýad ýerleşdirilende oňa güýç täsir edýär. Diýmek, elektrostatik meýdan **güýç meýdanydyr**. Elektrik meýdanynyň bardygyny bilmek we öwrenmek üçin meýdana eltilýän položitel zarýada synag zarýady diýilýär. Ol kiçi zarýad görnüşinde alynýar. Synag zarýady uly bolanda onuň ilkinji meýdany özgertjegi düşnüklidir.

q_0 zarýadyň meýdanynda haýsydyr bir q zarýad ýerleşdirilende Kulonyň kanuny boýunça oňa $\vec{F}$ güýç täsir edýär we bu güýç zarýada göni proporsionaldyr. Eger meýdanyň berlen nokady üçin fiziki ululyklaryň F/q gatnaşygy alynsa, onda q zarýadyň üýtgemegi bilen gatnaşygyň bahasy hemişelik galýar. Şeýle bolansoň bu gatnaşyk elektrostatik meýdany häsiýetlendirýän fiziki parametr hökmünde ulanylýar:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}, \tag{14.2}$$

bu ýerde $\vec{E}$ – wektor ululyga elektrik meýdanynyň güýjenmesi diýilýär. Ol meýdanyň güýç häsiýetnamasydyr. (14.2) formuladan görnüşi ýaly, elektrik meýdanynyň güýjenmesi berlen nokatda ýerleşen birlik nokatlanç zarýada täsir edýän güýje san taýdan deňdir. Berlen nokatda $\vec{E}$ güýjenme wertorynyň ugry synag zarýadyna (ol položitel) täsir edýän güýjüň ugry bilen gabat gelýär. (14.2) formula görä güýjenmäniň ölçeg birligi: N/Kl. HS-de güýjenmäniň ölçeg birligi W/m ($1W/m = 1N/Kl$, *15-nji baba seret*). Ony gös-göni ölçeýän abzal ýok.

Elektrik meýdanynda ýerleşen nokatlanç zarýada täsir edýän güýji şeýle kesgitlemek bolar:

$$\vec{F} = q\vec{E}.$$

Meýdanyň güýjenmesi tasir güýçleri bilen bagly bolany sebäpli, nokatlanç q zarýadyň wakuumdaky meýdanynyň güýjenmesini Kulonyň kanuny arkaly kesgitläp bolýar:

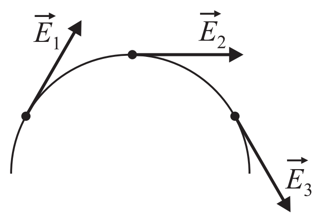
$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^3}\vec{r},$$

bu ýerde $\vec{r}$ – zarýadyň ýerleşen nokadyndan barlanýan nokada geçirilen radius-wektor. $\vec{E}$ wektoryň $\vec{r}$ radius wektoryň ugruna proeksiýasy skalýar ululyk bolar:

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2}. \qquad (14.3)$$

Elektrostatik meýdany grafiki usul bilen hem aňlatmak bolýar. Esasan-da Faradeý tarapyndan hödürlenen, elektrostatik meýdany güýç çyzyklary arkaly suratlandyrmak usulyny görkezmek ýerliklidir (*14.2-nji çyzgy*). **Islendik nokatda galtaşýan göni çyzygy meýdanyň güýjenmesiniň wektory bilen gabat geler ýaly geçirilen çyzyklara güýjenme çyzyklary (ýa-da güýç çyzyklary) diýilýär.**

Güýç çyzyklarynyň gürlügi şeýle saýlanyp alynýar, ýagny birlik üste perpendikulýar düşýän güýç çyzyklarynyň sany $\vec{E}$ wektoryň san bahasyna deň bolýar. Şeýlelikde, güýjenme çyzyklarynyň şekili boýunça giňişligiň dürli nokatlarynda $\vec{E}$ wektoryň ugruny we ululygyny anyklap bolýar.



14.2-nji çyzgy

Nokatlanç zarýadyň güýç çyzyklary radial göni çyzyklar görnüşinde bolýar. Položitel nokatlanç zarýad üçin çyzyklar zarýaddan başlanýar we tükeniksizlige çenli dowam edýär. Otrisatel nokatlanç zarýad üçin çyzyklar tükeniksizlikden başlanyp zarýadda gutarýan görnüşde bolýar. Zarýadyň daşyndan islendik radiusly hyýaly sferiki üst alynsa, olardaky güýç çyzyklarynyň sany deň bolýar. Bu ýerden şeýle netije çykarmak bolýar: 1) güýç çyzyklary položitel zarýaddan başlanyp, otrisatel zarýadda gutaryp bilýärler ýa-da 2) položitel zarýaddan başlanyp, tükeniksizlige gidip bilýärler ýa-da 3) tükeniksizlikden gaýdyp, otrisatel zarýadda gutaryp bilýärler. Güýç çyzyklarynyň bu häsiýetleri islendik zarýadlar sistemasynyň döredýän elektrostatik meýdany üçin hem dogrudyr.

Mehanikadan mälim bolşy ýaly, bölejige ençeme güýç täsir edende güýç ähli güýçleriň wektorlaýyn goşulmagy bilen kesgitlenýär. Eger-de elektrostatik meýdan ençeme hereketsiz nokatlanç zarýadlaryň sistemasy tarapyndan döredilýän bolsa, onda synag zarýadyna olaryň her biri $\vec{F}_1, \vec{F}_2, ...\vec{F}_n$ güýç bilen täsir eder.

Şoňa görä-de güýçleriň jemi şeýle tapylýar:

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i,$$

bu ýerde

$$\vec{F}_i = q\vec{E}_i.$$

Ýagny

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^{n} \vec{E}_i,$$

bu ýerde E_i – sistemanyň düzümindäki zarýadlaryň aýry-aýrylykda döredýän meýdanynyň güýjenmesi.

Bu ýerde elektrik meýdanynyň superpozisiýa prinsipi ýüze çykýar. Bu bolsa elektrik meýdanlarynyň täsirleriniň biri-birine bagly däldigini aňladýar. Başgaça aýdylanda, zarýadlar sistemasynyň meýdanyna, her bir zarýadyň aýratynlykdaky meýdanlarynyň wektorlaýyn jemi (superpozisiýasy) hökmünde seredip bolýar:

$$\vec{E}_i = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_i}{r_i^3}\vec{r}_i, \quad \vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\sum_{i=1}^{n}\frac{q_i}{r_i^3}\vec{r}_i.$$

Eger sistemanyň zarýadlary giňişlikde ýa-da jisimde üznüksiz paýlanan bolsa, onda meýdanlaryň superpozisiýasyna laýyklykda, sistemanyň meýdanynyň güýjenmesini şeýle kesgitläp bolýar:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int_Q \frac{dq}{r^3}\vec{r}, \qquad (14.4)$$

bu ýerde Q – sistemanyň ähli zarýadlarynyň algebraik jemi.

Fizikanyň ösüş taryhyna göz aýlap, onda elektromagnit güýçleriniň dürli aralyklarda nähili çalt täsir edip bilşi baradaky çekeleşikleri görmek bolýar. Bu babatda, esasan, iki teoriýa, daşdan täsirleşme we golaýdan täsirleşme teoriýalary öňe sürüldi. Birinji teoriýanyň tarapdarlary täsirleşme islendik uzaklyga bada-bat ýetýär diýip tassyklaýarlar. Ikinji, ýagny golaýdan täsirleşme teoriýasynyň tarapdarlary islendik meýdanyň çäkli tizlik bilen ýaýraýandygyndan we netijede täsiriň dürli aralyklary dürli möhletde ýetýändiginden ugur alýarlar.

Tejribeleriň görkezişi ýaly, elektromagnit tolkunlary çäkli tizlik bilen ýaýraýarlar we hiç zat ondan ýokary tizlik bilen hereket edip bilmeýär. Elektrostatik meýdanlar üçin iki teoriýa-da meňzeş netijeleri berýär we tejribe maglumatlary bilen ylalaşýar.

Häzirki zaman fizikasynda golaýdan täsirlenme teoriýasy dogry hasaplanýar.

14.4. Elektrik dipoly

Ululyklary deň, alamatlary dürli bolan we biri-birine golaý l aralykda ýerleşen $+q$ we $-q$ nokatlanç zarýadlardan durýan sistema **elektrik dipoly** diýilýär. Olaryň l aradaşlygy sistemanyň merkezinden öwrenilýän nokada çenli bolan r aralyga görä has kiçi bolmalydyr. Dipol düşünjesiniň girizilmeginiň sebäbi şeýle sistemanyň häsiýetleri atomlaryň we molekulalaryň elektrik häsiýetlerine hem-de daşky elektrik meýdanlarynda olaryň özüni alyp baryşlaryna meňzeşdir.

Nokatlanç zarýadlary birleşdirýän göni çyzyga **dipolyň oky** diýilýär. Zarýadlaryň l aradaşlygyna deň, okuň üstünde ýatan we otrisatel zarýaddan položitel zarýada tarap gönükdirilen wektora dipolyň egni diýilýär.

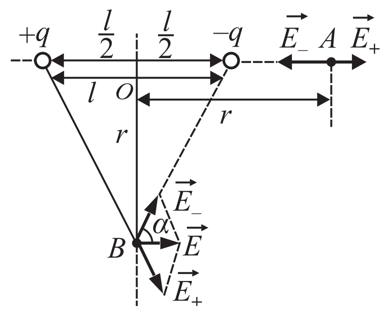
Položitel q zarýadyň dipolyň egnine köpeldilmegine deň bolan wektor ululyga **dipolyň elektrik momenti** P_e diýilýär.

$$\vec{P}_e = q\vec{l},$$

Zarýadlar islendik giňişlikde öz meýdanyny döredýärler. Superpozisiýa prinsipine laýyklykda, erkin saýlanan nokatda dipolyň güýjenmesi

$$\vec{E} = \vec{E}_+ + \vec{E}_-,$$

bu ýerde $\vec{E}_+$ – položitel zarýadyň meýdanynyň güýjenmesi, $\vec{E}_-$ – otrisatel zarýadyň meýdanynyň güýjenmesi. A nokat üçin (*14.3-nji çyzgy*):



14.3-nji çyzgy

$$\vec{E}_+ = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{\left(r+\frac{l}{2}\right)^2}\frac{\vec{l}}{l};$$

$$\vec{E}_- = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{\left(r-\frac{l}{2}\right)^2}\frac{\vec{l}}{l};$$

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q\vec{l}}{l}\left[\frac{1}{\left(r+\frac{l}{2}\right)^2} - \frac{1}{\left(r-\frac{l}{2}\right)^2}\right]; \qquad \vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{2rq\vec{l}}{\left(r^2-\frac{l^2}{4}\right)^2}.$$

Eger-de $l << r$ şert ýerine ýetýän bolsa, onda $l^2 << r^2$. Diýmek,

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{2\vec{P}_e}{r^3}. \tag{14.5}$$

Güýjenme okuň ugry boýunça aralygyň kubuna ters proporsional kiçelýär. Dipolyň ortasyndan geçýän we oka perpendikulýar göni çyzygyň üstünde ýatýan B nokada seredeliň:

$$|\vec{E}_+| = |\vec{E}_-| = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2+\frac{l^2}{4}};$$

$$|\vec{E}_+| = |\vec{E}_-| = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{2q\cos\alpha}{r^2+\frac{l^2}{4}} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{ql}{\left(r^2+\frac{l^2}{4}\right)^{3/2}}.$$

Ýa-da $\vec{E}$ wektoryň dipolyň okuna paralleldigini we $r^2 >> l^2$ şerti göz öňünde tutup, alarys:

$$\vec{E} = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\vec{P}_e}{r^3}. \tag{14.6}$$

Formulalardan görnüşi ýaly, $\vec{E}$ wektor berlen nokatdan dipolyň egniniň ortasyna çenli aralygyň kubuna ters proporsional. Minus alamaty $\vec{E}$ wektoryň we $\vec{P}_e$ dipolyň elektrik momentiniň wektorynyň garşylykly taraplara gönükdirilendigini görkezýär.

XV BAP. ELEKTROSTATIK MEÝDANYŇ HASABY

15.1. Elektrostatik meýdanyň güýjenmesiniň akymy. Wakuumda elektrostatik meýdan üçin Gaussyň teoremasy we onuň ulanylyşy

Zarýadlar sistemasynyň elektrostatik meýdanynyň güýjenmesi superpozisiýa prinsipiniň kömegi bilen hasaplananda Gaussyň teoremasy ulanylsa hasap has aňsatlaşýar. Gaussyň teoremasynda islendik ýapyk üst üçin elektrik meýdanynyň wektorynyň Φ_e akymy kesgitlenýär.

Elektrik meýdanynyň güýjenmesiniň wektorynyň *dS* meýdança arkaly akymy diýip

$$d\Phi_e = EdS\cos\left(\widehat{\vec{E},\vec{n}}\right) = \vec{E}d\vec{S}$$

ululyga aýdylýar. Bu ýerde $\vec{E}$ – üstüň tükeniksiz kiçi dS böleginiň nokatlaryndaky elektrik meýdanynyň güýjenme wektory, $\vec{n}$, bu dS üste normal birlik wektor.

$$d\vec{S} = dS\vec{n}.$$

Alnan dS üst bölejiginiň kiçiligi, şonuň çäklerinde meýdanyň birhilliligi saklanar we üstün egriligini hasaba almasaň-da bolar ýaly saýlanýar. Ýokarky aňlatmany şeýle-de ýazyp bolar:

$$d\Phi_e = E_n dS = EdS_\perp, \tag{15.1}$$

ýagny güýjenme wektorynyň $\vec{n}$-iň ugruna proeksiýasyny dS-e köpeltmeli ýa-da dS-iň $\vec{E}$ wektora perpendikulýar tekizlige $dS_\perp$ proeksiýasyny E köpeltmeli.

Şeýlelikde islendik S üsti kesip geçýän güýjenmäniň akymyny aşakdaky ýaly tapyp bileris:

$$\Phi_e = \int_{(S)} \vec{E}d\vec{S} = \int_{(S)} EdS\cos\left(\widehat{\vec{E},\vec{n}}\right) = \int_{(S)} E_n dS = \int_{(S)} EdS_\perp.$$

Eger elektrik meýdanyny birnäçe nokatlanç zarýadlaryň sistemasy döredýän bolsa, superpozisiýa prinsipine laýyklykda, ýapyk üsti kesip geçýän güýjenme akymy şeýle tapylýar:

$$\Phi_e = \oint\limits_{(S)} \vec{E}d\vec{S} = \oint\limits_{(S)} \sum_{i=1}^{n} \vec{E}_i d\vec{S} = \sum_{i=1}^{n} \oint\limits_{(S)} E_i dS = \frac{1}{\varepsilon_0} \sum_{i=1}^{n} Q_i.$$

Akym her bir zarýadyň döredýän güýjenmesiniň akymynyň algebraik jemine deňdir. Ýagny, her bir nokatlanç zarýadyň döredýän akymyny kesgitlemek ýeterlikdir. Iň ýönekeý ýagdaýy alyp göreliň. Goý, sferik üstüň merkezinde q zarýad ýerleşen bolsun. Onda elektrik meýdanynyň güýjenmesiniň akymy

$$\Phi_e = \oint\limits_{(S)} EdS = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{r^2} \oint\limits_{(S)} dS = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{r^2} 4\pi r^2,$$

$$\Phi_e = \frac{q}{\varepsilon_0} \qquad \text{ýa-da} \qquad \oint\limits_{(S)} \vec{E}d\vec{S} = \frac{q}{\varepsilon_0}. \tag{15.2}$$

Bu deňlik wakuumdaky elektrostatik meýdan üçin **Gaussyň teoremasynyň** matematiki aňladylyşydyr.

Gaussyň teoremasy. Wakuumdaky elektrostatik meýdanyň güýjenmesiniň islendik ýapyk üstden geçýän akymy bu üstüň içindäki zarýadlaryň algebraik jeminiň ε_0 elektrik hemişeligine bolan gatnaşygyna deňdir. Zarýad islendik ýapyk üstüň içinde ýerleşende-de bu aňlatmalaryň dogrudygyny subut etmek kyn däldir. Ýene-de bir şerti ýatlap geçmek zerur. Belläp geçişimiz ýaly, ujypsyz kiçi dS üst meýdanjygyna tekizlik görnüşinde garap bolýar. Şeýlelikde ol wektor görnüşinde aňladylanda $d\vec{S} = dS\vec{n}$, $\vec{n}$ birlik normalyň haýsy tarapa ugrukdyrylany näbelli bolup galýar. Emma üst ýapyk bolanda, diňe daşky normal alynmalydyr. Şeýle üste **gauss üsti** diýilýär.

Eger ýapyk üst bilen çäklenen göwrümiň içinde nokatlanç zarýad ýerleşen bolsa, onda depesi şol nokatda goýlan konus şekilli üst ýapyk gauss üstüniň belli bir kesimini öz içine alar. Konus şekilli üst arkaly çäklendirilýän giňişlige $d\omega$ jisim burçy diýilýär. Jisim burçunyň radiusyň kwadratyna köpeldilmegi seredilýän üst böleginiň meýdanyna deňdir.

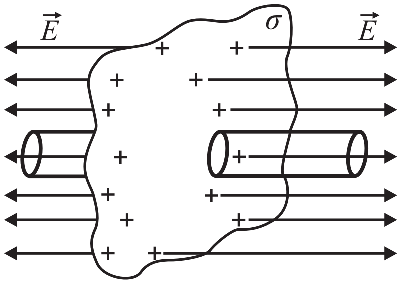
Seredilýän üst bölegi boýunça, güýjenme akymy şeýle aňladylýar:

$$d\Phi_e = \frac{q_i}{4\pi\varepsilon_0} \frac{dS_i}{r_i^2} = \frac{q_i}{4\pi\varepsilon_0} \frac{r_i^2 d\omega}{r_i^2} = \frac{q_i}{4\pi\varepsilon_0} d\omega. \tag{15.3}$$

Gaussyň teoremasyny elektrik zarýadlarynyň dürli sistemalarynyň meýdanyny hasaplamakda peýdalanyp bolar. Mysal üçin, käbir simmetrik sistemalara garalyň.

1) Birhilli zarýadlanan tükeniksiz tekizligiň elektrik meýdany

Goý, zarýadlaryň üst dykyzlygy $\sigma = \dfrac{dq}{dS} = const$ bolsun. Elektrik meýdanynyň güýç çyzyklary özara paralleldir we zarýadly tekizlige normal gönükdirilendir. Tekizlige perpendikulýar okly, esaslary bolsa oňa parallel bolan hyýaly silindri ýapyk üst hökmünde alalyň.



15.1-nji çyzgy

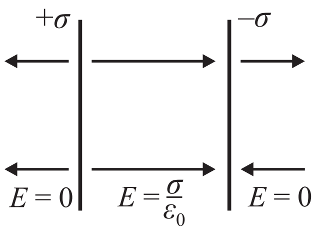
Elektrik meýdanyň güýç çyzyklary silindriň emele getirijisine (gapdal üstüne) parallel bolup, diňe onuň S esaslaryny (çepki we sagky) kesip geçýär, (*15.1-nji çyzgy*). Çyzgydaky şekil üçin Gaussyň teoremasyny ýazalyň:

$$2ES = \frac{\sigma S}{\varepsilon_0} \quad \text{ýa-da} \quad E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}. \qquad (15.4)$$

Bu aňlatma birhilli zarýadlanan tükeniksiz tekizligiň elektrik meýdanynyň güýjenmesiniň formulasydyr.

2) Birhilli zarýadlanan iki parallel tükeniksiz tekizlikleriň meýdany

Goý, tekizlikler $+\sigma$ we $-\sigma$ üst dykyzlyklar bilen birhilli zarýadlanan bolsun (*15.2-nji çyzgy*). Bu tekizlikleriň elektrik meýdanynyň güýjenmesiniň wektorlary plastinalaryň döredýän meýdanlarynyň güýjenmesiniň wektorlarynyň superpozisiýasy ýaly tapylýar. (15.4) formula görä her tekizligiň meýdanynyň guýjenmesi absolýut bahasy boýunça $\sigma/2\varepsilon_0$. Iki tekizligiň arasyndaky giňişlikde güýç çyzyklary ugurdaş. Şonuň üçin meýdanlaryň güýjenmeleri goşulýar:



15.2-nji çyzgy

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} + \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}. \qquad (15.5)$$

Tekizlikleriň daşky taraplarynda elektrik meýdanynyň güýjenmesi nola deň. Sebäbi her tekizligiň döredýän meýdanynyň güýjenmesiniň absolýut bahalary deň, ugurlary bolsa garşylykly.

Tekiz kondensatoryň plastinalarynyň arasyndaky elektrik meýdanynyň güýjenmesini hem käbir takyklykda yokarky formula bilen hasaplap bolýar.

3) Birhilli zarýadlanan sferiki üstüň elektrik meýdany

Goý, R radiusly sferik üst σ dykyzlykly q zarýad saklaýar diýeliň. Onuň daşyny gurşap alýan $r > R$ radiusly sferik ýapyk üsti kesip geçýän güýjenmäniň akymy üçin Gaussyň teoremasyndan peýdalanyp, şeýle aňlatma alarys:

$$\oint_{(S)} \vec{E}d\vec{S} = \oint_{(S)} E_r dS = E_r \int_0^{4\pi r^2} dS = E_r 4\pi r^2.$$

Bu ýerde

$$E_r 4\pi r^2 = \frac{q}{\varepsilon_0}, \quad E_r = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2} = \frac{\sigma R^2}{\varepsilon_0 r^2} \quad \text{ýa-da} \quad E_r = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}\frac{R^2}{r^2}. \qquad (15.6)$$

Eger $r < R$ bolsa, onda $E_r = 0$. Diýmek, sferanyň içinde elektrik meýdany ýokdur.

4) Göwrümleýin zarýadlanan şaryň meýdany

Goý, R radiusly şar endigan göwrümleýin ρ dykyzlyk bilen birhilli zarýadlanan bolsun. Onda

$$q = \rho V = \rho \frac{4}{3}\pi R^3,$$

$$\rho = \frac{3}{4}\frac{q}{\pi R^3}$$ eger $r \geq R$ bolsa, onda

$$\oint_{(S)} \vec{E} d\vec{S} = \oint_{(S)} E_r dS = E_r 4\pi r^2.$$

Bu ýerde

$$E_r = \frac{\rho \frac{4}{3}\pi R^3}{\varepsilon_0 4\pi r^2} = \frac{\rho R^3}{3\varepsilon_0 r^2}.$$

Haçanda $r = R$ bolsa, onda

$$E_r = \frac{\rho R}{3\varepsilon_0},$$

eger $r < R$ bolsa, onda

$$E_r = \frac{\rho r}{3\varepsilon_0}. \qquad (15.7)$$

5) Tükeniksiz uzyn silindrik üst boýunça birhilli paýlanan zarýadyň elektrik meýdany

Goý, silindriň R radiusy uzynlygyndan has kiçi ($R << l$), zarýadlaryň üst dykyzlygy bolsa σ bolsun. Gauss üsti deregine oky zarýadly silindriň oky bilen gabat gelýän, r radiusly we h uzynlykly silindrik ýapyk üsti alyp bileris. Ýönekeýlik üçin, onuň esaslary oka perpendikulýar bolsun. Şeýlelikde:

$$\oint_{(S)} \vec{E} d\vec{S} = E_r 2\pi rh = \frac{\sigma 2\pi Rh}{\varepsilon_0}.$$

Bu ýerden alýarys:

$$E_r = \frac{\sigma R}{\varepsilon_0 r}. \qquad (15.8)$$

Biz mysallarda kesgitli geometrik figuraly zarýadly jisimleriň elektrik meýdanyna seretdik. Eger zarýadly jisimiň kesgitli formasy bolmasa, onda ony tükeniksiz kiçi dq zarýadly böleklere bölmeli, ol bölekleri nokatlanç zarýad ýaly kabul etmeli we zarýadly jisime nokatlanç zarýadlaryň sistemasy ýaly seredip hasaplamalar geçirmeli.

Mysallardan görnüşi ýaly, güýjenme wektorynyň akymy Φ_e saýlanyp alnan üstüň $\vec{E}$ wektora perpendikulýar tekizlige E_r proeksiýasyna we S üste bagly. Eger birlik meýdanly üst alsak, onda akym güýjenmä san taýdan deň bolar. Diýmek, elektrik meýdanynyň islendik nokatdaky güýjenmesi şol nokadyň töwereginde alnan $\vec{E}$ wektora perpendikulýar üsti kesip geçýän güýç cyzyklarynyň gürlügini aňladýan ululykdyr.

15.2. Elektrostatik meýdanyň işi. Elektrostatik meýdanyň sirkulýasiýasy (köwlenmesi)

Goý, q nokatlanç zarýadyň meýdanynda 1-nji nokatdan 2-nji nokada q_0 nokatlanç synag zarýad süýşýär diýeliň. Zarýad tükeniksiz kiçi dl aralyga süýşürilende edilýän dA iş şeýle kesgitlener:

$$dA = Fdl\cos\alpha = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{qq_0}{r^2}dl\cos\alpha.$$

$dl\cos\alpha = dr$ bolýandygyny göz önünde tutup, alarys:

$$dA = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{qq_0}{r^2}dr. \tag{15.9}$$

Umumy edilen iş

$$A_{12} = \int_{r_1}^{r_2} dA = \frac{qq_0}{4\pi\varepsilon_0}\int_{r_1}^{r_2}\frac{dr}{r^2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{qq_0}{r_1} - \frac{qq_0}{r_2}\right).$$

Görnüşi ýaly, iş synag zarýadynyň nähili ýol bilen süýşüşine bagly däl-de, diňe onuň başlangyç we ahyrky orunlaryna bagly. Şeýle güýçlere konserwatiw güýçler diýilýär. Nokatlanç zarýadyň elektrostatik meýdany bolsa potensial meýdandyr.

Eger synag zarýady islendik traýektoriýa boýunça süýşüp, ýene-de öňki ornuna dolanyp gelse, ýagny ol ýapyk traýektoriýa boýunça hereket edýän bolsa, onda

$$\oint_{(L)} dA = 0.$$

Birlik nokatlanç zarýad süýşürilende bu äňlatma

$$\oint_{(L)} \vec{E}d\vec{l} = \oint_{(L)} E_l dl = 0 \tag{15.10}$$

görnüşde bolar.

Soňky aňlatma elektrik meýdanynyň **güýjenme wektorynyň sirkulýasiýasy** diýilýär. Bu ýerden, elektrostatik meýdanyň güýç çyzyklarynyň ýapyk bolup bilmejekdigi gelip çykýar.

15.3. Potensial. Elektrostatik meýdanyň potensialy. Potensiallaryň tapawudy

Islendik nokatlanç q zarýada elektrostatik meýdan tarapyndan täsir edýän güýjüň, şol zarýady tükeniksiz kiçi $d\vec{r}$ aralyga süýşürende edýän işi onuň şol meýdandaky potensial energiýasynyň azalmagyna deňdir:

$$\delta A = q\vec{E}d\vec{r} = -\,dW_p.$$

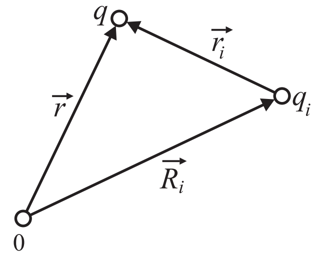
Eger meýdany n zarýaddan ybarat sistema döredýän bolsa (*15.3-nji çyzgy*); onda

$$dW_p = -\,q\sum_{i=1}^{n}\vec{E}_i d\vec{r} = -\,q\sum_{i=1}^{n}\vec{E}_i d\vec{r}_i,$$

bu ýerde $\vec{r}$, bu q synag zarýadyň radius-wektory.

$$\vec{r_i} = \vec{r} - \vec{R_i},$$

bu ýerde $\vec{R_i}$, bu q_i zarýadyň radius-wektory.



15.3-nji çyzgy

Onda

$$dW_p = -\frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\sum_{i=1}^{n}\frac{q_i}{r_i^3}\vec{r_i}d\vec{r_i} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\sum_{i=1}^{n}\frac{q_i}{r_i^2}dr_i.$$

Zarýad uly aralyga süýşürilende integrirläp alarys:

$$W_p = -\frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\sum_{i=1}^{n}\frac{q_i}{r_i} + c,$$

bu ýerde c – integrirlemegiň hemişeligi (hasaplaýyş başlangyjynyň saýlanyp alnyşyna bagly).

Çäkli giňişlikde ýerleşen zarýadlar sistemasyndan tükeniksiz uzaklykda ýerleşen q **zarýadyň potensial energiýasy** nola deňdir, ýagny $c = 0$, onda

$$W_p = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\sum_{i=1}^{n}\frac{q_i}{r_i}. \qquad (15.11)$$

Diýmek, elektrostatik meýdanda ýerleşen nokatlanç zarýadyň potensial energiýasy bu zarýadyň ululygyna we meýdanyň häsiýetine bagly.

Eger zarýadyň potensial energiýasyny diňe birlik zarýad üçin tapsak, onda meýdany häsiýetlendirip bileris.

Elektrostatik meýdanyň haýsy-da bolsa bir nokadynda ýerleşdirilen nokatlanç zarýadyň W_p potensial energiýasynyň şol zarýada gatnaşygyna deň bolan fiziki ululyga **meýdanyň şol nokatdaky φ potensialy** diýilýär:

$$\varphi = \frac{W_p}{q}; \qquad (15.12)$$

Zarýadlar sistemasynyň meýdanynyň potensialy:

$$\varphi = \sum_{i=1}^{n}\varphi_1 = \sum_{i=1}^{n}\frac{q_1}{4\pi\varepsilon_0 r_i}.$$

Birnäçe elektrostatik meýdanlar üsti-üstüne düşende, olaryň potensiallary algebraik goşulýar. Eger zarýadlar käbir giňişlikde üznüksiz paýlanan bolsalar, onda

$$\varphi = \int_{(q)}\frac{dq}{4\pi\varepsilon_0 r},$$

bu ýerde integrirlemek ähli zarýadlar boýunça geçirilýär.

Potensialyň ölçeg birligi wolt (W). (15.12) formuladan görnüşi ýaly, elektrik meýdanynyň bir nokadynda ýerleşen 1Kl zarýadyň potensial energiýasy 1J bolsa şol nokadyň potensialy 1 woltdyr (1W = 1J/Kl). Bu ýerde elektrik meýdanynyň güýjenmesiniň birliginiň W/m bolýandygyny hem görkezmek bolar:

$$1N/Kl = 1N \cdot m/(Kl \cdot m) = 1J/(Kl \cdot m) = 1W/m.$$

Elektrostatik meýdanyň φ_1 potensially nokadyndan φ_2 potensially nokadyna q zarýady süýşürýän güýçleriň edýän işi:

$$A_{1-2} = q(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Eger $\varphi_2 = 0$ bolsa, onda

$$\varphi_1 = \frac{A_{1-2}}{q} \tag{15.13}$$

Elektrostatik meýdanyň haýsydyr bir nokadyndaky potensialy, şol nokatdaky birlik položitel zarýady, potensialy nola deň bolan nokada süýşürmek üçin edilýän işe deňdir.

Mahlasy, elektrostatik meýdany häsiýetlendirýän güýjenme we potensial diýilýän fiziki ululyklar, berlen nokatdaky birlik položitel zarýada täsir edýän güýji we onuň potensial energiýasyny kesgitleýär:

$$\vec{F} = q\vec{E}, \qquad W_P = q\varphi.$$

Mehanikadan mälim bolşy ýaly, potensial güýç bilen potensial energiýa özara şeýle baglanyşýar:

$$\vec{F} = -\operatorname{grad} W_p.$$

Zarýadlaryň koordinatlara bagly däldigi üçin:

$$\operatorname{grad}(q\varphi) = q\operatorname{grad}\varphi$$

ýa-da

$$\vec{E} = -\operatorname{grad}\varphi,$$

$$\vec{E} = -\left(\frac{\partial}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial}{\partial z}\vec{k}\right)\varphi.$$

Bu ýerden güýjenme wektorynyň koordinatalar oklaryna proýeksiýalaryny tapyp bolýar:

$$E_x = -\frac{\partial\varphi}{\partial x}; \qquad E_y = -\frac{\partial\varphi}{\partial y}; \qquad E_z = -\frac{\partial\varphi}{\partial z}.$$

Şeýle hem, işiň ululygy energiýanyň azalmagyna deňdir:

$$\delta A = -dW_P = -qE_e dl = -qd\varphi$$

ýa-da

$$E_e = -\frac{d\varphi}{dl} \tag{15.14}$$

Güýjenme wektorynyň islendik ugra bolan proýeksiýasy, bir uzynlyk birliginde potensialyň şol ugur boýunça näçe kiçelendigini görkezýär.

Elektrostatik meýdanda birdeň potensially nokatlaryň geometrik ýerleşmesine **ekwipotensial üst** diýilýär. Meýdanyň güýç çyzyklary ekwipotensial üstüň ähli nokatlarynda oňa perpendikulýardyr. Şol bir ekwipotensial üst boýunça zarýady süýşürýän güýçleriň işi nola deňdir.

Elektrik meýdanynyň güýjenmesi bilen potensialyny baglanyşdyrýan (15.14) formuladan peýdalanyp, meýdanyň iki nokadynyň arasyndanky potensiallaryň tapawudyny hasaplap bolýar. Kesgitli geometrik formaly käbir zarýadly jisimiň meýdany üçin mysallara seredeliň.

1) Tükeniksiz uly we deňölçegli zarýadlanan tekizligiň elektrik meýdanynyň güýjenmesiniň formulasy:

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}. \tag{15.4}$$

Tekizlikden x_1 we x_2 aralyklarda ýerleşen nokatlar üçin (15.14) formuladan peýdalanyp alarys:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{x_1}^{x_2} E dx = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} dx = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}(x_2 - x_1). \tag{15.15}$$

2) Tükeniksiz uly dürli atly zarýadlanan parallel iki tekizligiň arasyndaky meýdanyň güýjemesiniň formulasy:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}. \tag{15.5}$$

Tekizlikleriň arasyndaky uzaklygy d bilen bellesek, potensial üçin alarys:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_0^d E dx = \int_0^d \frac{\sigma}{\varepsilon_0} dx = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} d. \tag{15.16}$$

3) Deňölçegli zarýadlanan sferik üstüň daşyndaky meýdanyň güýjenmesiniň formulasy:

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2}, \tag{15.6}$$

bu ýerde $r > R$ – sferanyň radiusy.

Sferanyň merkezinden $r_1 (r_1 > R)$ we $r_2 (r_2 > R)$ aralyklarda ýerleşen nokatlaryň potensiallarynyň tapawudy:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{r_1}^{r_2} E dr = \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2} dr = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right). \tag{15.17}$$

Bu formuladan $r_1 = r$ we $r_2 = \infty$ şert üçin, ýagny sferanyň daşyndaky potensial üçin alarys:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r}. \tag{15.18}$$

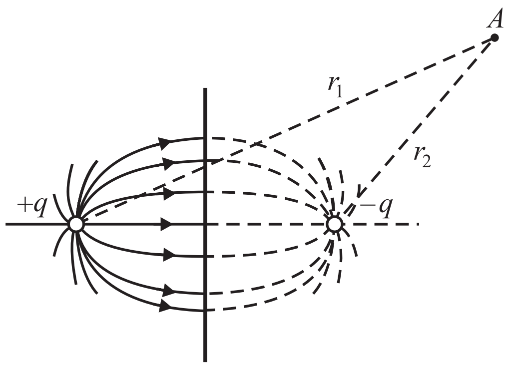
Sferanyň içinde potensial hemişelikdir. Onuň formulasy

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 R}. \tag{15.19}$$

Kesgitli geometrik formasy bolmadyk zarýadly jisimleriň meýdanyndaky nokatlaryň arasyndaky potensiallaryň tapawudyny hasaplamak üçin jisimi dq tükeniksiz kiçi hyýaly zarýadly böleklere bölmeli. Soňra jisimi nokatlanç zarýadlaryň sistemasy ýaly kabul edip, hasaplama geçirmeli.

Nokatlanç zarýadlardan we olaryň golaýynda ýerleşen metal jisimlerden ybarat sistemanyň elektrik meýdanynyň hasaby üçin **elektrik şekillendirme** usulyny ulanmak amatly bolýar.

Tekiz metal üstüň ýanynda nokatlanç q zarýad ýerleşdirilen bolsun. Elektrik induksiýa hadysasyna görä, metalyň nokatlanç zarýada golaý üstünde ters alamatly elektrik zarýady toplanar. Üst zarýada golaý boldugyça toplanan zarýadyň dykyzlygy ýokary bolar. Şeýle bolanda elektrik meýdany hem ýokary bolar.



15.4-nji çyzgy

Geçiriji üstüň ekwipotensialdygy sebäpli metalyň potensialy nola deňdir. Metalyň içinde elektrik meýdany ýokdur. Zarýadyň ululygy we orny belli bolanda metalyň beýleki tarapyndaky giňişligiň elektrik häsiýetleri zerkal şekillendirme usuly bilen kesgitlenýär (*15.4-nji çyzgy*). Metalyň sag tarapyndaky zarýadsyz meýdan, çyzgyda görkezilişi ýaly, çep tarapky meýdanyň zerkal şekillendirmesi bolýar. Bu ýagdaý matematiki fizikada subut edilendir.

Metalyň sag tarapyndaky nokadyň (meselem, *A* nokadyň) meýdany çep tarapdaky $+q$ nokatlanç zarýadyň we onuň $-q$ “şekiliniň” döredýän meýdanlary bilen kesgitlenýär.

A nokatdaky meýdanyň potensialyny aşakdaky formuladan kesgitlemek bolýar:

$$\varphi = q\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right).$$

Bu usul metal üstde indusirlenen zarýady kesgitlemäge-de mümkinçilik berýär. Onuň üçin potensialyň aňlatmasy üste normal ugur boýunça differensirlenýär we tapylan ululyk boýunça zarýadyň ululygy kesgitlenýär.

Elektrik meýdanynyň bir nokadynyň potensialyny ölçemek üçin ol nokat bilen Ýeriň arasyndaky potensiallaryň tapawudy ölçenilýär. Gaty, suwuk dielektriklerde, elektrik zynjyrynyň shemalarynda potensiallaryň tapawudy woltmetrler bilen ölçenilýär.

Dielektrikleri öwrenmek we elektrik zynjyrlara degişli hasaplamalary geçirmek üçin potensialy hem-de potensiallaryň tapawudyny ölçemek möhümdir.

XVI BAP. DIELEKTRIKLER WE GEÇIRIJILER ELEKTRIK MEÝDANYNDA

16.1. Dielektrik barada düşünje

Iki tekiz we parallel geçiriji plastinalar golaý aralykda ýerleşdirilinde tekiz kondensator emele gelýär. Olaryň arasyndaky giňişlikde bolsa deňölçegli elektrostatik meýdan döreýär. Emma şol giňişlik wakuum bolman, zarýadlary geçirmeýän başga sreda bilen doldurylanda, elektrik meýdanynyň güýjenmesi we kondensatoryň sygymy ymykly üýtgeýär. Şeýle sredalara dielektrikler degişlidir.

Adaty şertlerde elektrik toguny geçirmeýän maddalara dielektrikler diýilýär.

Dielektrik jisim we onuň iki ýanyny gurşap alýan geçiriji iki plastina dielektrikli kondensatory emele getirýär. Şol geçiriji plastinalarda zarýadlaryň süýşmegi bolup geçýär we elektrik energiýasy toplanýar.

Klassyky fizikanyň nukdaý nazaryndan dielektriklerde elektrik meýdanynyň täsiri zerarly zarýadlar tertipleşdirilen herekete gelýär. Dielektriklerde elektrik toguny döredip biljek, erkin zarýad äkidijiler ýokdur. Dielektriklere ionlaşmadyk halyndaky ähli gazlar, käbir suwuklyklar (ýaglar, benzol, destillirlenen suw we başgalar) we gaty jisimler (aýna, jäç, slýuda, ebonit we başgalar) degişlidir. Dielektrikler udel garşylygy boýunça geçirijilerden (metallardan) düýpli tapawutlydyrlar (dielektriklerde $\rho \sim 10^{6} \div 10^{15}\ Om \cdot m$, metallarda $\rho \sim 10^{-8} \div 10^{-6}\ Om \cdot m$). Dielektrigiň molekulalary elektrik taýdan neýtraldyr. Sebäbi molekula girýän atomlaryň elektronlarynyň we ýadrolarynyň jemi zarýady nola deňdir. Emma, dürli täsirleriň netijesinde, otrisatel zarýadlaryň merkezi bilen položitel zarýadlaryň merkeziniň gabat gelmezligi, ýagny olaryň giňişligiň dürli nokatlarynda ýerleşmegi mümkin. Şeýle ýagdaýda elektrik dipoly döreýär we onuň elektrik momenti $\vec{P_e} = q\vec{l}$ bolar. Bu ýerde q – molekula girýän atom ýadrolarynyň jemi položitel zarýady, $\vec{l}$ – elektronlaryň otrisatel zarýadlarynyň merkezinden položitel zarýadlaryň merkezine geçirilen wektor. Şeýle dielektriklere polýar dielektrikler diýilýär. Daşky elektrik meýdany ýok mahaly şol merkezler bir nokatda ýerleşýän bolsa ($l = 0$), onda dielektrige polýar däl (polýar däl molekulaly) dielektrik diýilýär. Şeýle ýagdaýda molekulalaryň dipol momenti nola deňdir. Mysal üçin: H_2, N_2, O_2 we başga şuňa meňzeş maddalar. Polýar däl molekulalar daşky elektrik meýdanynda, onuň $\vec{E}$ güýjenmesine proporsional indusirlenen P_e dipol momentine eýe bolýar. Köp elektronly atomyň $R \sim 10^{-10}\ m$ radiusly şar şekilli elektron bulutjagazynyň merkezinde nokatlanç ýadro ýerleşendir. Şoňa görä-de, otrisatel zarýadlary şol şaryň göwrüminde ρ dykyzlyk bilen deňölçegli paýlanan ýaly kabul etmek bolýar. Onda zarýadyň göwrümleýin dykyzlygy

$$\rho = \frac{3q}{4\pi R^3}$$

bolar.

Daşky meýdan tarapyndan nokatlanç položitel zarýada täsir edýän güýç göwrümleýin otrisatel zarýadlar tarapyndan täsir edýän qE_1 güýç bilen deňagramlaşar ýaly, olaryň merkezleri $r = l$ aralyga süýşer. Eger $l < R$ bolsa, onda

$$E_1 = -\frac{\rho l}{3\varepsilon_0} = \frac{ql}{4\pi\varepsilon_0 R^3},$$

$$q\vec{E} + q\vec{E_1} = 0; \quad E_1 = E; \quad P_e = ql = 4\pi\varepsilon_0 R^3 E,$$

bu ýerde $\vec{E}$ – daşky meýdanyň güýjenmesi.

Görnüşi ýaly, ýüze çykýan dipol momenti daşky meýdanyň güýjenmesine gönümel baglydyr ýa-da bu aňlatmany şeýle ýazyp bileris:

$$\vec{P_e} = \alpha\varepsilon_0\vec{E},$$

bu ýerde $\alpha = 4\pi R^3$ – atomyň (molekulanyň) polýarlanyjylygy we ol diňe atomyň göwrümine bagly. Atom ýadrosynyň elektron bulutjagazyna görä süýşmesini ýa-da ýüze çykýan dipolyň egnini kesgitlemek kyn däldir. Goý, meýdanyň güýjenmesi, takmynan $10^7 \div 10^8$ W/m bolsun (ýeterlik uly baha), onda

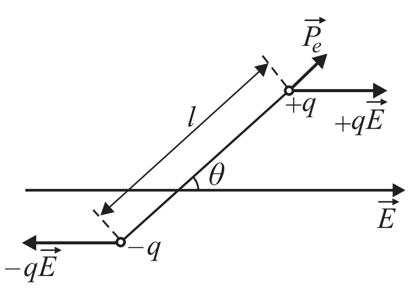
$$l = \frac{4\pi\varepsilon_0 R^3}{q} E \lesssim \frac{10^{-30}\cdot 10^8}{9\cdot 10^9\cdot 10^{-19}} m \sim 10^{-13} m.$$

Diýmek, $l << R$ şert ýerine ýetýär. Emma daşky meýdanyň güýjenmesi has-da artsa, onda elektronlaryň atomdan bölünmegi (ionlaşma) bolýar we dielektrik jisimleriň elektrik garşylygynyň böwsülmesi bolýar. Polýar däl molekula maýyşgak dipola kybapdaşdyr, ýagny onuň egin uzynlygy süýndüriji güýje gönümel baglydyr. Olaryň inertliligi örän az bolany üçin ýylylyk zerarly hereketleriň täsiri juda gowşakdyr.

16.2. Dielektrikleriň polýarlanmasy. Elektrik meýdanynyň dipola täsiri

Elektronlary ýadro görä simmetrik ýerleşmedik molekulaly (atomly) dielektriklere polýar dielektrikler (polýar molekulaly dielektrikler) diýilýändigini belläpdik. Şeýle molekulalarda otrisatel we položitel zarýadlaryň merkezleri, daşky meýdanyň ýok mahalynda bir nokatda däldir. Daşky meýdanyň täsiri netijesinde polýar molekulalar örän gowşak deformirlenýärler (sudury ýoýulýar) we özüni gaty dipola meňzeş alyp barýarlar. Birhilli daşky elektrik meýdanynda gaty dipola jübüt güýçler ($q\vec{E}$ we $-q\vec{E}$) täsir edýär (*16.1-nji çyzgy*). Jübüt güýçleriň momenti: $M = qEl\sin\theta = P_e E\sin\theta$ ýa-da onuň wektory:

$$\vec{M} = [\vec{P_e}\vec{E}]. \qquad (16.1)$$



16.1-nji çyzgy

Jübüt güýçleriň momenti burawjygyň düzgüni boýunça kesgitlenýär we ol $\vec{P}$ hem-de $\vec{E}$ wektorlaryň tekizligine perpendikulýar ugrukdyrylandyr. Daşky meýdan dipoly, onuň elektrik momenti güýjenme wektoryna gabat geler ýaly öwürmäge ymtylýar. Beýle ýerleşme dipolyň durnukly deňagramlyk halyna degişlidir, sebäbi birhilli meýdanda dipolyň merkezini süýşürýän güýç ýüze çykmaýar.

Aýlanma mahaly edilýän iş dipolyň potensial energiýasynyň kemelmesine barabardyr, ýagny

$$\delta A = -Md\theta = -P_e E\sin\theta d\theta = -dW_p. \qquad (16.2)$$

Eger $\theta = \frac{\pi}{2}$ bolanda dipolyň energiýasyny nola deň diýip hasap etsek, onda onuň elektrik momenti islendik burç bilen ugrukdyrylan ýagdaýynda potensial energiýasyny kesgitläp bileris:

$$W_p = \int_{(W)}^{0} dW_p = \int_{(0)}^{\frac{\pi}{2}} P_e E\sin\theta d\theta = -P_e E\cos\theta.$$

Şeýlelikde, durnukly deňagramlyk ýagdaýynda, ýagny $\theta = 0$ bolanda

$$W_{p_{\min}} = -P_e E \qquad (16.3)$$

dipolyň potensial energiýasy iň kiçi baha eýe bolar. Dipol birhilli däl elektrik meýdanynda ýerleşende, oňa aýlandyryjy momentden başga-da käbir güýç täsir edýär:

$$\vec{F} = q\vec{E_+} - q\vec{E_-} = ql\frac{\partial\vec{E}}{\partial l} = P_e\frac{\partial\vec{E}}{\partial l}.$$

Ýa-da wektorly algebrada subut edilişine görä

$$\vec{F} = P_{e_x}\frac{\partial\vec{E}}{\partial x} + P_{e_y}\frac{\partial\vec{E}}{\partial y} + P_{e_z}\frac{\partial\vec{E}}{\partial z},$$

bu ýerde P_{e_x}, P_{e_y}, P_{e_z} – dipolyň elektrik momentiniň dekart oklaryna proýeksiýalary. Bu aňlatmany aşakdaky görnüşde-de ýazyp bolýar:

$$F = \text{grad}(\vec{P_e}\vec{E}) = \nabla(\vec{P_e}\vec{E}).$$

Birhilli däl meýdanda ýerleşen dipol, şu güýjüň täsiri zerarly ($\theta < \frac{\pi}{2}$ bolanda) meýdanyň has güýçli ýerine çekilýär. Görşümiz ýaly, daşky elektrik meýdanynda ýerleşdirilen dielektrigiň molekulalary özüni elektrik dipollarynyň toplumy ýaly alyp barýarlar. Daşky meýdan ýok mahaly dielektrikdäki polýar molekulalar ýylylyk hereketi zerarly tertipsiz ugrukdyrylandyr we islendik kiçi göwrümdäki dipol momentleriniň jemi nola deňdir.

Dielektrik daşky elektrik meýdanyna girizilende, onuň islendik kiçi ΔV makroskopik göwrüminde molekulalaryň noldan tapawutly netijeleýji elektrik momenti döreýär. Bu hadysa **polýarlanma** diýilýär. Şeýle haldaky dielektrige **polýarlanan dielektrik** diýilýär.

16.3. Polýarlanmanyň görnüşleri. Dielektrikleriň elektrostatikasynyň deňlemeleri. Sredadaky elektrostatik meýdan üçin Gaussyň teoremasy

Polýarlanma, esasan, üç görnüşe bölünýär.

1. Gönükdirilen polýarlanma polýar dielektriklerde bolup geçýär. Ozal garap geçişimiz ýaly, daşky elektrik meýdan polýar molekulalaryň dipol elektrik momentlerini güýjenme wektorynyň tarapyna ugrukdyrmaga çalyşýar, oňa bolsa tertipsiz ýylylyk hereketleri päsgel berýärler. Şol iki prosesiň netijesinde dipol elektrik momentleriniň köpüsi meýdana görä ugrukmasy ýüze çykýar. Ol güýjenmäniň artmagy we temperaturanyň peselmegi bilen artýar.

2. Elektron (elektronlaryň kömegi bilen) **polýarlanma** polýar däl dielektriklerde bolýar. Öň belläp geçişimiz ýaly, daşky meýdanyň täsiri zerarly olaryň molekulalarynda meýdan bilen ugurdaş dipol elektrik momenti ýüze çykýar. Polýar molekulaly gazda we suwuk hallaryndaky dielektriklerde gönükdirilen we elektron polýarlanma bile bolup geçýär.

3. Ionly polýarlanma ionly kristallik gözenekli gaty dielektriklerde bolup geçýär. Şeýle kristala položitel we otrisatel ionlardan ybarat iki gözenejigiň üsti-üstüne düşmesi ýaly seredip bolar. Daşky elektrik meýdanynyň täsiri zerarly şol gözenejikler biri-birine görä süýşýär we olaryň her bir düwni elektrik dipolyna meňzeş bolýar. Ionly kristal gözenekli dielektriklere NaCl, KCl, KBr mysal bolup biler.

Polýarlananlyk (ýa-da polýarlanma wektory) diýip atlandyrylýan $\vec{P}$ wektor dielektrigiň polýarlaşmasynyň mukdar ölçegi bolup hyzmat edýär:

$$\vec{P} = \frac{1}{\Delta V}\sum_{i=1}^{n}\vec{P}_{e_i}, \tag{16.4}$$

bu ýerde $\vec{P}_{e_i}$ – bir molekulanyň momenti, n, bu ΔV göwrümdäki molekulalaryň sany. Dielektrigiň kiçijik göwrüminiň jemi elektrik dipol momentiniň şol göwrüme gatnaşmagyna deň ululyga polýarlananlyk diýilýär.

Polýar däl dielektrikde hemişe elektrik meýdanynyň güýjenmesi bilen ugurdaş $\vec{P}_e$ dipol momentleri ýüze çykýar:

$$\vec{P} = n_0\vec{P}_e,$$

bu ýerde $n_0 = \dfrac{n}{\Delta V}$ – molekulalaryň konsentrasiýasy. Eger daşky meýdanyň güýjenmesi $\vec{E}$ bolsa, onda

$$\vec{P} = n_0\alpha\varepsilon_0\vec{E} = \chi\varepsilon_0\vec{E}, \tag{16.5}$$

$\chi = \alpha n_0$ – ölçeg birliksiz san we oňa polýar däl dielektrigiň dielektrik kabul edijiligi diýilýär. Polýar dielektriklere bolsa gaty dipollaryň toplumy hökmünde garap, gowşak elektrik meýdanlarynda $\left(E << \dfrac{kT}{P_e}\right)$, olaryň ortaça dipol momentini şeýle kesgitläp bolar:

$$\langle \vec{P}_e \rangle = \frac{P_e^2}{3kT}\vec{E},$$

bu ýerde P_e – ähli gaty dipollar üçin **dipol momentleriniň** bir menzeş modullary (olar ugry boýunça tapawutlanýar). Bu ýerden polýar dielektrigiň gowşak meýdanlarda dielektrik kabul edijiligini temperatura baglylykda kesgitleýän Debaý-Lanžeweniň formulasyny alarys:

$$\chi = \frac{n_0 P_e^2}{3\varepsilon_0 kT}. \tag{16.6}$$

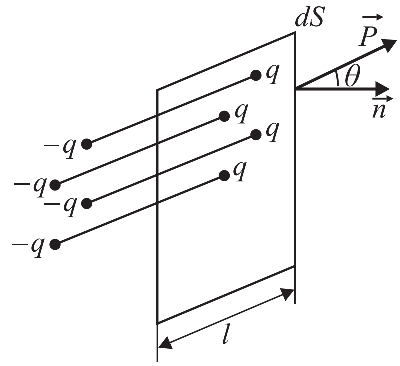
Diýmek, polýar dielektrigiň polýarlanma wektoryny şeýle kesgitlemek bolar:

$$\vec{P} = \frac{1}{\Delta V}\sum_{i=1}^{n}\vec{P}_{e_i} = \frac{n}{\Delta V}\langle \vec{P}_e \rangle = n_0 \langle \vec{P}_e \rangle.$$

Gowşak elektrik meýdanynda polýar molekulaly dielektrikleriň polýarlanma wektory bilen meýdanyň güýjenmesiniň arasynda gönüçyzykly baglanyşyk saklanýar. Emma güýçli meýdanda bu baglanyşyk ýoýulýar we doýgunlyk ýüze çykýar. Şol bir wagtda hem ýylylyk hereketleri polýarlanma päsgel berýärler.

Polýarlanma netijesinde dielektrigiň daşky ýukajyk üst gatlagynda kompensirlenmeýän zarýadlar ýüze çykýar. Olara üstdäki polýarlanan zarýadlar diýilýär. Polýarlanyş zarýadlarynyň üst boýunça dykyzlygyny (σ_p) kesgitlemek üçin polýar däl molekulaly dielektrige seredeliň (*16.2-nji çyzgy*).

Goý, dS meýdanly üst bölejiginiň daşky $\vec{n}$ normaly $\vec{P}$ polýarlanma wektorynyň ugry bilen θ burçy döredýän bolsun. Eger dipollaryň egni l bolsa, onda polýarlanma zarýadlaryny diňe esasy dS we uzynlygy l bolan hyýaly gyşyk silindriň içindäki zarýadlar döreder:



16.2-nji çyzgy

$$dq_p = n_0 qldS\cos\theta = P_n dS,$$

bu ýerde P_n – polýarlanma wektorynyň dS üstüň daşky normalynyň ugruna proýeksiýasy.

Şeýlelikde:

$$\sigma_p = \frac{dq_p}{dS} = P_n.$$

Birhilli däl elektrik meýdanynda dielektrigiň polýarlanma wektory hem birhilli bolmaz, ýagny ol koordinatlara bagly bolar. Şeýle meýdandaky dielektriklerde diňe üstdäki polýarlanma zarýadlary döreýär. Zarýadlaryň göwrümleýin dykyzlygy polýarlanma wektorynyň diwergensiýasyna deňdir:

$$\rho_p = -\left(\frac{\partial P_x}{\partial x} + \frac{\partial P_y}{\partial y} + \frac{\partial P_z}{\partial z}\right) = -\,\mathrm{div}\vec{P}.$$

Elbetde bu ýerde, izotrop dielektriklerde $\vec{P}$ we $\vec{E}$ wektorlaryň ugurdaşdygyny, şoňa görä-de olaryň dielektrik kabul edijiliginiň skalýar ululykdygyny, emma, tersine, anizotrop dielektriklerde $\vec{P}$ we $\vec{E}$ wektorlaryň diňe käbir belli ugurlary boýunça gabat gelip biliýändigini, oňa görä-de χ-iň tenzor ululykdygyny belläp geçmek zerur.

Dielektrik sredada elektrik meýdany iki dürli, ýagny **erkin** we **baglanyşykly** zarýadlar tarapyndan döredilýär. Atomlaryň we molekulalaryň düzümine girýän zarýadlar, mundan başga-da ion kristallik gözenekli dielektriklerdäki ionlaryň zarýadlary baglanyşykly zarýadlardyr. Erkin süýşmäge ukyply beýleki zarýadlaryň hemmesine, şol sanda daşyndan getirilen artykmaç zarýadlara, erkin zarýadlar diýilýär. Şeýlelikde, sredanyň içindäki elektrik meýdanynyň jemi güýjenmesi erkin we baglanyşykly zarýadlaryň meýdanlarynyň güýjenmeleriniň geometrik jemine deňdir:

$$\vec{E} = \vec{E}^{erk} + \vec{E}^{bag}.$$

Elektrostatik meýdan üçin Gaussyň teoremasyny sreda degişlilikde ýazyp bileris:

$$\oint\limits_{(S)} \vec{E}d\vec{S} = \frac{1}{\varepsilon_0}(q_{gur}^{erk} + q_{gur}^{bag}).$$

bu ýerde S – ýapyk gauss üsti, $q_{gur}^{erk}, q_{gur}^{bag}$, degişlilikde ýapyk üst bilen gurşap alnan erkin we baglanyşykly zarýadlar.

Ýokarda belläp geçişimiz ýaly:

$$dq_{gur}^{bag} = -\,qdn = -\,n_0 P_e dS\cos\theta = -\,\vec{P}d\vec{S},$$

$$q_{gur}^{bag} = -\oint\limits_{(S)} \vec{P}d\vec{S} \quad \text{ýa-da} \quad \langle\rho^{bag}\rangle = -\frac{1}{V}\oint\limits_{(S)} \vec{P}d\vec{S},$$

bu ýerde $\langle\rho^{bag}\rangle$ – baglanyşykly zarýadlaryň V göwrümindäki dykyzlygy. Şeýlelikde

$$\oint\limits_{(S)} \varepsilon_0\vec{E}d\vec{S} + \oint\limits_{(S)} \vec{P}d\vec{S} = \oint\limits_{(S)} (\varepsilon_0\vec{E} + \vec{P})d\vec{S} = q_{gur}^{erk}.$$

Sredada elektrostatik meýdan üçin Gaussyň teoremasyny şeýle ýazmak bolar:

$$\oint\limits_{(S)} \vec{D}d\vec{S} = q_{gur}^{erk}, \tag{16.7}$$

bu ýerde $\vec{D} = \varepsilon_0\vec{E} + \vec{P}$ – elektrik induksiýasy ýa-da elektrik süýşmesi diýilýär.

(16.7) formulanyň esasynda sredadaky elektrostatik meýdan üçin **Gaussyň teoremasynyň kesgitlemesi: islendik ýapyk üsti kesip geçýän elektrik süýşmesiniň akymy şol üsti gurşap alan erkin zarýadlarynyň algebraik jemine deňdir.**

Izotrop sredada $\vec{P}$ we $\vec{E}$ wektorlar göni proporsional, şoňa görä-de elektrik süýşme wektory:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \varepsilon_0 \vec{E} + \chi \varepsilon_0 \vec{E} = (1+\chi)\varepsilon_0 \vec{E},$$

$$\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}, \tag{16.8}$$

bu ýerde $\varepsilon = 1 + \chi$ – sredanyň otnositel dielektrik syzyjylygy.

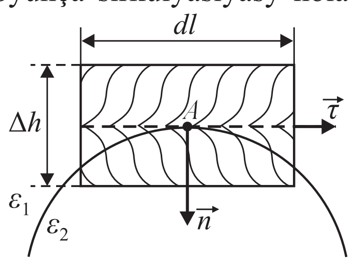
Elektrostatik meýdanyň güýjenmesi birhilli izotrop sredada ε elektrik syzyjylygyna ters proporsional üýtgeýär. Dielektrikleriň araçäginden geçende $\vec{E}$ böküş bilen üýtgeýär we elektrostatik meýdanyň hasabynda kynçylyk döredýär. Şeyle bolansoň (16.8) formula bilen kesgitlenýän elektrik süýşmesi diýilýän fiziki ululyk girizilýär.

Elektrik süýşmesiniň birligi: Kl/m^2.

16.4. Dielektrigiň dielektrik we dielektrigiň geçiriji bilen araçäklerindäki şertleri

Indi otnositel dielektrik syzyjylygy dürli bolan iki sredanyň araçäginde elektrostatik meýdan üçin şertlere garap geçeliň. Araçäk üstdäki öwrenilýän A nokadyň daşyny gurşap alan gönüburçluk görnüşindäki l kontur alalyň (*16.3-nji çyzgy*). Bilşimiz ýaly, güýjenme wektorynyň ýapyk kontur boýunça sirkulýasiýasy nola deň. Şoňa görä-de

$$\oint_{(L)} \vec{E} d\vec{l} = 0.$$



16.3-nji çyzgy

Eger konturyň beýikligini (araçäge perpendikulýar taraplaryny) barha kiçeltsek, onda

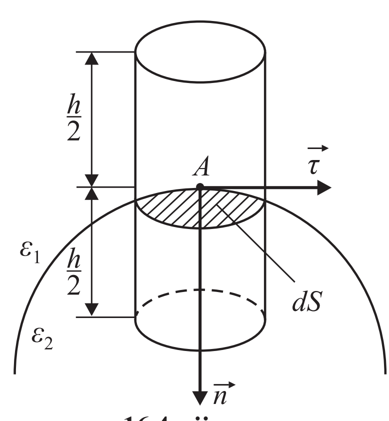
$$\lim_{\Delta h \to 0} \oint_{(L)} \vec{E} d\vec{l} = (E_{2\tau} - E_{1\tau}) dl = 0$$

ýa-da $E_{2\tau} = E_{1\tau}$ bolar, ýagny meýdanyň güýjenmesiniň araçäk üste galtaşýan (tangensial) düzüjisi bir sredadan beýlekä geçende üýtgemeýär. Elektrik süýşmesi üçin ýokarky şerti aşakdaky ýaly ýazyp bileris:

$$D_{2\tau} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} D_{1\tau}.$$

Elektrostatik meýdanyň güýjenmesiniň we elektrik süýşmesiniň araçäk üste normal düzüjisi üçin şertleri almaga Gaussyň teoremasy mümkinçilik berýär. A nokadyň töweregindäki dS meýdany (kiçijik) içine alýan, esaslary $\vec{n}$ wektora perpendikulýar, oky $\vec{n}$ wektora ugurdaş hyýaly ýapyk silindrik üst alalyň (*16.4-nji çyzgy*).

Goý, silindriň beýikligi h bolsun. Gaussyň teoremasyna görä elektrik süýşme wektorynyň ýa-



16.4-nji çyzgy

pyk üsti kesip geçýän doly akymy, onuň içinde ýerleşen erkin zarýadlaryň jemine deňdir:

$$\oint\limits_{(S)} \vec{D}d\vec{S} = q_{gur}^{erk}.$$

Eger silindriň beýikligi kiçelip nola ymtylsa we üstde erkin zarýadlar ýok bolsa, onda

$$\lim_{h\to 0} \oint\limits_{(S)} \vec{D}d\vec{S} = (D_{2n} - D_{1n})dS = 0$$

ýa-da

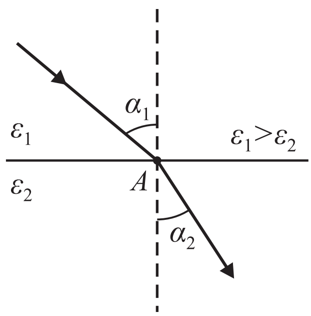
$$D_{2n} = D_{1n}.$$

bolar. Iki sredany bölýän erkin zarýadsyz araçäk üstden geçende elektrik süýşmesiniň normal düzüjisi üýtgemeýär. Şeýlelikde ikinji şerti alarys:

$$D_{2n} = D_{1n}; \qquad E_{2n} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}E_{1n}.$$

Eger birinji sreda wakuum bolsa, onda

$$\varepsilon_1 = 1 \quad \text{we} \quad E_{2n} = \frac{E_{1n}}{\varepsilon_2}.$$



16.5-nji çyzgy

Sredanyň otnositel dielektrik syzyjylygy ε wakuumdan şol sreda geçilende, elektrostatik meýdanyň güýjenme wektorynyň üste normal düzüjisiniň näçe esse kiçelýändigini görkezýän sandyr. Iki sredany bölýän araçäk üstden geçende elektrostatik meýdanyň güýjenme çyzyklary döwülýär (*16.5-nji çyzgy*). Onda geometrik şekilden güýjenme çyzyklarynyň düşme we döwülme burçlarynyň tangenslerini tapyp bileris:

$$\text{tg}\alpha_1 = \frac{E_{1\tau}}{E_{1n}}; \qquad \text{tg}\alpha_2 = \frac{E_{2\tau}}{E_{2n}}, \qquad \frac{\text{tg}\alpha_1}{\text{tg}\alpha_2} = \frac{E_{1n}}{E_{2n}} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad \text{ýa-da} \quad \text{tg}\alpha_2 = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}\text{tg}\alpha_2.$$

Ýokarda aýdylanlary jemläp, şeýle tassyklama geleris. Eger käbir erkin zarýadlaryň elektrostatik meýdanynda, otnositel dielektrik syzyjylygy güýjenmä bagly bolmadyk dielektrik ýerleşen bolsa, onuň içindäki güýjenme şol zarýadlaryň wakuumda döredip biljek güýjenmesinden ε esse kiçidir:

$$\vec{E} = \frac{\vec{E}^{wak}}{\varepsilon}; \qquad \vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0\vec{E} = \varepsilon_0\vec{E}^{wak} = \vec{D}^{wak}.$$

Şoňa görä-de wakuum üçin alan formulalarymyzda ε_0-a derek $\varepsilon_0\varepsilon$ köpeltmek hasyly alynsa, olar dielektrik sreda degişli bolar. Mysal üçin, nokatlanç zarýadyň birhilli dielektrik sredada döredýän meýdanynyň güýjenmesi we potensialy şeýle aňladylýar:

$$\vec{E} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r^2}\frac{\vec{r}}{r}; \qquad \varphi = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r}.$$

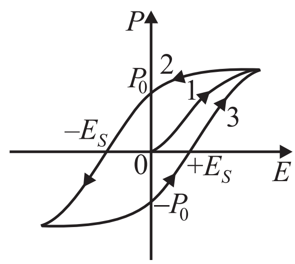
16.5. Segnetoelektrikler

Dielektrikleriň käbir görnüşleri – segnet duzy $NaKC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$ we bariniň titanaty $BaTiO_3$ üýtgeşik häsiýetlere eýedir. Olara **segnetoelektrikler** diýilýär. Segnetoelektrikler daşky elektrik meýdany ýok mahaly erkin polýarlanan köpsanly oblastlardan ybaratdyr. Ol oblastlara **domenler** diýilýär. **Kýuriniň nokady** diýilýän temperaturada segnetoelektrikler adaty däl häsiýetlerini ýitirýärler we adaty dielektrige öwrülýärler.

Domenlerde $\vec{P}$ polýarlanma wektory iň uly baha eýedir. Dürli domenlerde $\vec{P}$ wektoryň ugry dürli taraplara gönükdirilendir. Şol sebäpli elektrik meýdanynyň ýok mahaly segnetoelektrik üçin jemleýji polýarlanma nola deňdir. Daşky elektrik meýdanynda ähli domenlerde polýarlanmagyň $\vec{P}$ wektory daşky meýdanyň ugruna tarap aýlanyp başlaýar. Güýçlüräk daşky meýdanda domenlere degişli $\vec{P}$ wektorlar daşky $\vec{E}$ bilen ugurdaş ýerleşýär.

Segnetoelektrikleriň dielektrik syzyjylygy, birinjiden, hemişelik däldir, ikinjiden, onuň iň ýokary bahasy örän uludyr. Meselem, segnet duzlary üçin $\varepsilon_{max} \approx 10^4$. Deňeşdirmek üçin käbir adaty dielektrikleriň syzyjylygynyň bahalaryna seredeliň: aýna üçin 4-7; slýuda üçin 6-8; farfor üçin 5,5-6,5; parafin üçin 2; suw üçin 82.

Segnetoelektrikler üçin daşky meýdanda $\vec{P}$ bilen $\vec{E}$-niň baglanyşygy çyzykly däldir (*16.6-njy çyzgy*). Güýjenmäniň käbir bahalarynda $\vec{P}$ doýgun baha eýe bolýar. $\vec{E}$ peseldilende uly bahalaryny saklamak bilen peselýär we $\vec{E} = 0$ bahada $\vec{P}_0$ **galyndy polýarlanma saklanyp** galýar. Ol polýarlanmany aýyrmak üçin E_S güýjenme goýmaly bolýar. E_S **güýjenmä koersatiw** güýç diýilýär.



16.6-njy çyzgy

$P = f(E)$ baglanyşyk 16.6-njy çyzgydaky ýaly gisterezisiň halkasyny emele getirýär.

Segnetoelektrikler tehnikada giňden ulanylýar. Olardan ultrases tolkunlarynyň generatorlary ýasalýar. Olar kondensatorlaryň dielektrikleri hökmünde ulanylýar.

16.6. Geçirijiler elektrik meýdanynda

Wakuumdan tapawutlylykda geçiriji sreda elektrik meýdanynda özüni düýpden başgaça alyp barýar. Geçirijileriň giň ýaýran görnüşi hökmünde metal geçirijilere garalyň. Metal geçirijiler suwuk, soňra bolsa gaty hala (kondensirlenen) geçenlerinde, olaryň walent elektronlary umumylaşmak zerarly “öz” atomlaryna berk baglylykdan boşaýarlar we metalyň içinde elektron gazyny emele getirýärler. Şeýle erkin elektronlary juda gowşak elektrik meýdany-da metalyň içinde herekete getirip bilýär. Olaryň hereketleriniň tertipleşdirilen häsiýete eýe bolmagy bolsa metallarda geçirijilik döredýär. Şonuň üçin-de, erkin elektronlara geçiriji elektronlar hem diýilýär. Olar umumylaşyp položitel ionlaryň umumy zarýadyny kompensirleýärler.

Geçiriji daşky elektrostatik meýdana girizilse, ondaky zarýadlar metalyň ähli nokadynda geçiriji elektron bilen položitel zarýadlaryň (ionlaryň) arasyndaky meýdan daşky meýdany kompensirlär ýaly ýagdaýda ýerleşýärler. Daşky meýdanyň täsiri zerarly geçirijidäki zarýadlaryň ýerleşişiniň üýtgemegine **elektrostatik induksiýa hadysasy** diýilýär. Netijede, ýüze çykýan biri-birine deň, ýöne garşylykly alamatly zarýadlara **indusirlenen** ýa-da **gönükdirilen zarýadlar** diýilýär. Daşky meýdan aýryldygy olar öňki ýagdaýyna geçýärler.

Şeýlelikde, geçirijiniň içinde elektrostatik meýdanyň güýjenmesi nola deňdir ($E = 0$), ýagny onuň göwrümindäki ähli nokatlar ekwipotensialdyr:

$$\frac{d\varphi}{dl} = -E_l = 0.$$

Geçirijiniň üsti hem ekwipotensialdyr we güýç çyzyklary oňa perpendikulýardyr.

Eger geçirijä daşyndan goşmaça zarýad berilse, ol geçirijiniň diňe üst gatlajygynda deňölçegli paýlanýar. Sebäbi zarýadlar erkin süýşüp bilýär. Öň belleýşimiz ýaly, umumy zarýadyň üstüň meýdanyna gatnaşmagyna zarýadyň üst dykyzlygy diýilýär:

$$\sigma = \frac{q}{S}.$$

Geçirijiniň üst araçäginde güýjenme wektorynyň galtaşma düzüjisi nola deňdir, sebäbi sähelçe güýjenme zarýadlary ýeňillik bilen süýşürip, olaryň gyradeň ýaýramagyna getirýär. Şoňa görä-de metal bilen wakuumyň arasynda aşakdaky ýagdaý ýüze çykýar:

$$\vec{E} = \vec{E_n}; \qquad \vec{E_r} = 0.$$

Gaussyň teoremasyna laýyklykda:

$$\oint_{(S)} \vec{D} dS = q_{erk} \quad \text{ýa-da} \quad D_n = \sigma; \quad E_n = \frac{\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0},$$

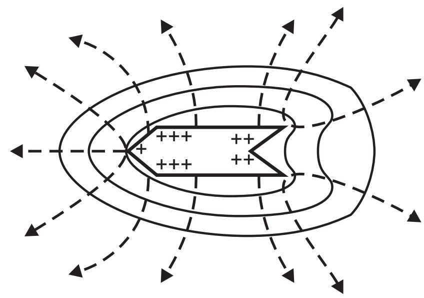
bu ýerde $\vec{D}$ – elektrik süýşme ýa-da elektrik induksiýa, ε – geçirijini gurşap alýan sredanyň dielektrik syzyjylygy.

Eger $E_n = -\frac{d\varphi}{dn}$ aňlatmany göz öňünde tutsak, onda

$$\sigma = -\varepsilon\varepsilon_0 \frac{d\varphi}{dn}.$$

Zarýadlaryň üst dykyzlygy elektrik meýdanynyň potensialynyň üstüň daşky normalynyň ugry boýunça nähili çalt kiçelýändigine bagly bolýar. Şonuň üçin hem geçirijiniň formasyna baglylykda üstüniň dürli nokatlarynda zarýadlaryň dykyzlygy dürli bolýar (*16.7-nji çyzgy*).

Gaussyň teoremasyndan ugur alyp, geçirijiniň içinde ýa-da ýapyk geçiriji gatlagyň içinde elektrik meýdanynyň güýjenmesiniň nola deňdigini görkezmek kyn däldir. Geçirijileriň şeýle ekranlaýjy häsiýeti elektrostatik meýdanyň täsirinden dürli abzallary ýa-da gerek bolsa adamlary goramak üçin ulanylýar. Mundan başga-da, zarýadlaryň geçirijiniň diňe üstki gatlagyna ýygnanýandygy dürli maksatlara hyzmat edip bilýär. Mysal üçin, Wan-de-Graafyň generatory ençeme million wolt potensially elektrostatik meýdan almaga mümkinçilik berýär.



16.7-nji çyzgy

Zarýadlanan jisimiň deňalamatly zarýadlarynyň aralarynda itekleşme güýçler bardyr. Üstüň islendik tükeniksiz kiçi dS ülüşindäki σdS zarýadlar üstdäki beýleki ähli zarýadlaryň elektrik meýdanynda ýerleşendir we oňa güýç täsir eder. Ol güýç bolsa aşakdaky ýaly kesgitlenýär:

$$d\vec{F} = \vec{E_1}\sigma dS,$$

bu ýerde σ – zarýadlaryň üst dykyzlygy, $\vec{E_1}$ – üstüň seredilýän ülüşinden başga ýerlerindäki ähli zarýadlaryň döredýän güýjenmesi.

Gaussyň teoremasyna laýyklykda:

$$\vec{E_1} = \frac{\sigma\vec{n}}{2\varepsilon_0} = \varepsilon_0 E^2 \frac{dSn}{2},$$

bu ýerde $\vec{n}$ – daşky normalyň birlik wektory.

Şeýlelikde,

$$d\vec{F} = \sigma^2 dS \frac{\vec{n}}{2\varepsilon_0}. \qquad (16.9)$$

Zarýadlanan jisimlere täsir edýän güýçlere **ponderomotor güýçler** (latynça – agramly jisimleri hereketlendirýän güýç) diýilýär.

Ponderomotor güýçleriň üst dykyzlygy (üstüň meýdan birligine düşýän paýy) wakuumda aşakdaky ýaly kesgitlenýär:

$$\vec{f} = \frac{d\vec{F}}{dS} = \frac{\sigma^2\vec{n}}{2\varepsilon_0} = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2\vec{n}.$$

Sistemanyň zarýadlarynyň arasynda kulon güýçlerinden başga täsir edýän güýçler ýok bolsa, hereketsiz zarýadlaryň durnukly konfigurasiýasy (giňişlikdäki özara ýerleşiş sudury) ýokdur. Muňa Irnşouň teoremasy diýilýär we ol Gaussyň formulasy arkaly subut edilýär.

XVII BAP. ELEKTRIK SYGYMY. ZARÝADLARYŇ POTENSIAL ENERGIÝASY

17.1. Elektrik sygymy

Ozal belläp geçişimiz ýaly, geçirijiniň üsti ekwipotensial üstdür, ýagny onuň islendik iki nokadynyň arasyndaky potensiallaryň tapawudy nola deňdir:

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \int_1^2 \vec{E}d\vec{l} = 0.$$

Geçirijiniň ähli nokatlarynda şol bir baha eýe bolan potensiala geçirijiniň potensialy diýilýär. Elbetde, şol bir geçirijiniň potensialy onuň üstünde ýerleşen zarýadlaryň umumy mukdaryna bagly bolýar. Emma belli bir mukdardaky zarýady dürli geçirijileriň üstünde ýerleşdirseň, olaryň potensiallary dürli bolýar.

Her bir geçirijiniň, diňe özüne mahsus bolan, üstüne zarýadlary sygdyryş ukyby bardyr. Tejribeleriň görkezişi ýaly, dürli geçirijiler deň zarýadlandyrylsa-da dürli potensiallara eýe bolýarlar. Şeýle bolansoň ýalňyz geçiriji üçin ýazmak bolar:

$$q = C\varphi \quad \text{ýa-da} \quad C = \frac{q}{\varphi}, \tag{17.1}$$

bu ýerde C – ululyga elektrik sygymy diýilýär.

Elektrik sygymynyň ölçeg birligi hökmünde farad (F) kabul edilendir. Emma 1 farad iňňän uly birlikdir. Mysal üçin, şaryň, ony gurşap alýan giňişlikdäki meýdanyň güýjenmesi aşakdaka deňdir:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2}\frac{\vec{r}}{r}.$$

Onuň potensialy

$$\varphi = \int_R^\infty \vec{E}d\vec{r} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{R}.$$

Geçirijiniň q zarýadynyň onuň φ potensialyna gatnaşygyna deň bolan C ululyga geçirijiniň elektrik sygymy diýilýär:

$$C = \frac{q}{\varphi} = 4\pi\varepsilon_0 R. \tag{17.2}$$

Eger şaryň radiusy 1 m bolsa, onda onuň sygymy:

$$C = 4 \cdot 3{,}14 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12} = 1{,}1 \cdot 10^{-10}\ F \text{ bolar.}$$

(17.2) formula bilen Ýer şarynyň sygymy kesgitlenende ol $C \approx 0{,}7 \cdot 10^{-6}\ F$ bolýar.

Şonuň üçin hem, adaty şertlerde, elektrik sygymy mikrofaradlarda (mkF), nanofaradlarda (nF), pikofaradlarda (pF) aňladylýar.

Ýalňyz geçirijä 1 *Kl* zarýad berlende onuň potensialy 1 *W* köpelýän bolsa, şeýle geçirjiniň sygymy 1 faraddyr. Elbetde, beýle geçiriji ýok. Bu kesgitleme manysy boýunça formaldyr.

Geçirijiniň sygymy onuň materialyna, zarýadyna we potensialyna bagly däldir. Sebäbi (17.1) formula bilen sygym barada umumy düşünje berilýär. Hiç hili zarýadsyz we potensialy nola deň bolan ýalňyz geçiriji barada gürrüň edilende onuň sygymy geçirijiniň ölçeglerine we formasyna baglydyr. Bu ýerden uly sygym almak üçin uly ölçegli geçiriji almaly ýaly görünýär. Ýöne tehnikada bu mesele başgaça çözülýär.

Sygym döretmek üçin iki geçirijili sistema ulanylsa we olaryň biri q zarýadly bolanda beýlekisinde-de garşylykly alamatly zarýadlar indusirlenýär. Bu zarýadlar q zarýadyň döreden meýdanyny gowşadýar we geçirijiniň potensialyny peseldýär. Bu bolsa (17.1) formula görä elektrik sygymyny köpeldýär.

Şu esasda kiçi ölçeglerde uly sygym almak üçin ýasalýan gurluşlara **kondensatorlar** diýilýär.

Kondensatorlar arasyna dielektrik goýlan iki geçirijiden ýasalýar. Bu geçirijilere kondensatoryň obkladkalary diýilýär. Kondensatoryň sygymyna daşky jisimler täsir etmeli däldir. Şeýle bolansoň, elektrik meýdanynyň kiçi giňişlikde döremegi üçin obkladkalaryň amatly görnüşleri saýlanyp alynýar we amatly görnüşde ýerleşdirilýär. Bu şertleri iki tekiz plastina, iki koaksial silindr, iki konsentrik sfera kanagatlandyrýar.

Kondensatorda toplanan q zarýadyň obkladkalaryň arasyndaky potensiallaryň $(\varphi_1 - \varphi_2)$ tapawudyna gatnaşygyna deň bolan fiziki ululyga kondensatoryň sygymy diýilýär:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2}. \qquad (17.3)$$

17.2. Kondensatorlaryň görnüşleri we olaryň zynjyra birikdirilişi

Kondensatoryň ýönekeý görnüşlerine garap geçeliň.

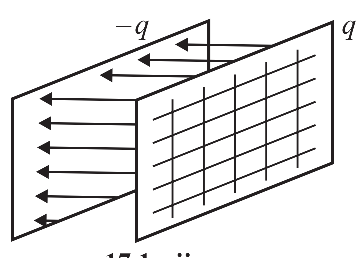
1. Tekiz kondensator iki sany ýanaşyk tekiz parallel geçirijilerden durýar. Goý, olaryň üst meýdany S, aradaşlygy d bolsun. Eger obkladkalara q we $-q$ zarýadlar berilse, onda olaryň üst dykyzlygy $\sigma = q/S$ bolar, (*17.1-nji çyzgy*).

Potensiallaryň tapawudy üçin alarys:

$$\varphi_2 - \varphi_1 = -\frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon}\int_0^d dx = -\frac{\sigma d}{\varepsilon_0 \varepsilon} = -\frac{qd}{\varepsilon_0 \varepsilon S}.$$

Bu aňlatmany (17.3) formulada goýsak

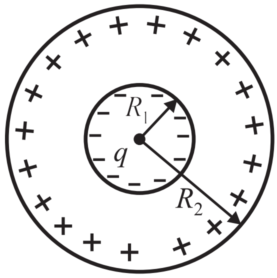
$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}. \qquad (17.4)$$



17.1-nji çyzgy

Bu aňlatma obkladkalaryň aradaşlygy, olaryň öz ölçeglerinden has kiçi $(d << \sqrt{S})$ bolsa, ýerine etýär. Bu ýerde ε – dielektrigiň elektrik syzyjylygy.

2. Sferik kondensator iki konsentrik (biri beýlekisiniň içinde ýerleşdirilen, umumy merkezli) sfera görnüşindäki geçirijilerden durýar. Goý, olaryň radiuslary R_1 we R_2 ($R_2 > R_1$) bolsun (*17.2-nji çyzgy*):



17.2-nji çyzgy

$$E = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r^2}, \qquad \frac{d\varphi}{dr} = -E_r = -\frac{q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r^2},$$

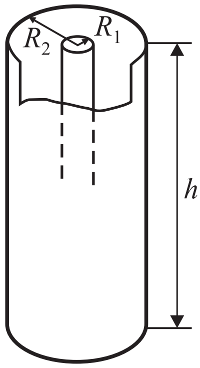
$$\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r^2}\int_{R_1}^{R_2}\frac{dr}{r^2} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r^2}\left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1}\right).$$

Bu aňlatmany (17.3) formulada goýup, sferik kondensatoryň sygymynyň formulasyny alarys:

$$C = \frac{q}{\varphi_2 - \varphi_1} = \frac{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}{\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}} = \frac{4\pi\varepsilon_0\varepsilon R_1 R_2}{R_2 - R_1}. \qquad (16.5)$$

3. Silindrik kondensator umumy okly iki sany ýuka silindrden ybarat.

Goý, olaryň beýiklikligi h, radiuslary R_1 we R_2 bolsun. Eger $h >> R_2 > R_1$ bolsa, onda silindiriň uçlarynda elektrik meýdanynyň ýoýulmasyny hasaba alman ýazyp bileris (*17.3-nji çyzgy*):



17.3-nji çyzgy

$$E_r = \frac{q}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon hr}, \qquad R_1 \le r \ge R_2.$$

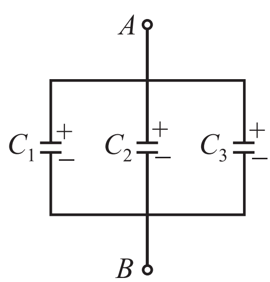
$$\frac{d\varphi}{dr} = -E_r = -\frac{q}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon h}\frac{1}{r}.$$

Eger minus alamatlary hasaba almasak, onda

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{q}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon h}\int_{R_1}^{R_2}\frac{dr}{r} = \frac{q}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon h}\ln\frac{R_2}{R_1}.$$

Silindrik kondensatoryň elektrik sygymy:

$$C = \frac{q}{\varphi_2 - \varphi_1} = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon h}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}. \qquad (16.6)$$



17.4-nji çyzgy

Birnäçe kondensatorlar birikdirilende (*17.4-nji çyzgy*) položitel zarýadlanan plastinalar bir düwne (*A*), otrisatel zarýadlanan plastinalar beýleki bir düwne (*B*) birleşdirilen bolsa, onda şeýle birikdirmä parallel birikdirme diýilýär.

Kondensatorlardaky zarýadlar üçin ýazmak bolar:

$$q_1 = C_1(\varphi_1 - \varphi_2),$$
$$q_2 = C_2(\varphi_1 - \varphi_2),$$
$$q_3 = C_3(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Islendik kondensatoryň obkladkalary üçin ($\varphi_1 - \varphi_2$) potensiallaryň tapawudy deň. Onda ýokarky aňlatmalary çlenme-çlen goşup alarys:

$$q_1 + q_2 + q_3 = (C_1 + C_2 + C_3)(\varphi_1 - \varphi_2).$$

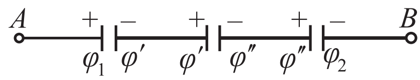
Ähli kondensatorlaryň zarýadlarynyň jeminiň potensiallaryň tapawudyna gatnaşygy zarýadlaryň C umumy sygymyna deňdir:

$$C = \frac{q_1 + q_2 + q_3}{(\varphi_1 - \varphi_2)} = C_1 + C_2 + C_3.$$

Parallel birleşdirilende döreýän sistemanyň umumy elektrik sygymy, oňa girýän n kondensatorlaryň sygymlarynyň jemine deňdir:

$$C_{pr} = \sum_{i=1}^{n} C_i. \qquad (17.7)$$

17.5-nji çyzgyda kondensatorlaryň yzygider birikdirilişi görkezilen. Bu birikdirmede birinji kondensatoryň otrisatel plastinasy ikinji kondensatoryň položitel plastinasy bilen, ikinji kondensatoryň otrisatel plastinasy üçünji kondensatoryň položitel plastinasy bilen birikdirilen. Jübüt birikdirilen plastinalarda umumy potensial emele gelýär.



17.5-nji çyzgy

Sistemanyň umumy sygymy birinji plastinanyň q zarýadynyň gyraky plastinalaryň potensiallarynyň tapawudyna gatnaşygy görnüşinde tapylýar:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2}.$$

Bu ýerde

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{1}{C} q. \qquad (17.8)$$

Ýöne $\varphi_1 - \varphi' = \frac{q}{C_1}$, $\varphi' - \varphi'' = \frac{q}{C_2}$, $\varphi'' - \varphi' = \frac{q}{C_3}$ bolany üçin, soňky deňlikleri çlenme-çlen goşup alarys:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = q\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}\right). \qquad (17.9)$$

(17.8) we (17.9) aňlatmalary deňeşdirip alarys:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}.$$

Bu ýerden görnüşi ýaly, kondensatorlar yzygider utgaşdyrylanda döreýän sistemanyň umumy elektrik sygymynyň ters ululygy oňa girýän kondensatorlaryň sygymlarynyň ters ululyklarynyň jemine deňdir:

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{C_i}. \qquad (17.10)$$

Jemi sygym utgaşdyrlan kondensatorlaryň iň kiçi sygymyndan-da kiçidir. Elektrik sygymyny ölçemek üçin dürli shemalardan (meselem, üýtgeýän toguň köpri shemasyndan) peýdalanylyp ýasalan faradmetrler ulanylýar. Şeýle-de sygymy ölçemek üçin başga-da dürli usullar (meselem, ballistiki galwanometrli usul) bardyr.

17.3. Zarýadlar sistemasynyň, ýalňyz geçirijiniň we kondensatoryň energiýasy. Elektrostatik meýdanyň energiýasy

Ozal belläp geçişimiz ýaly, elektrostatik meýdanyň täsir güýçleri konserwatiwdir. Zarýadlar sistemasyna degişli her bir zarýad beýleki zarýadlaryň meýdanynda ýerleşip, konserwatiw güýçleriň täsirindedir. Diýmek, zarýadlaryň potensial energiýasy bardyr.

Ýönekeýlik üçin iki nokatlanç zarýaddan ybarat sistema seredeliň. Goý, q_1 we q_2 zarýadlar r aradaşlykda ýerleşdirilsin. Olaryň her biri beýleki zarýadyň meýdanynda potensial energiýa eýe bolar:

$$W_{P_1} = q_1\varphi_{12}; \qquad W_{P_2} = q_2\varphi_{21},$$

bu ýerde φ_{12} we φ_{21} – q_1 zarýadyň duran ýerinde q_2 zarýadyň meýdanynyň potensialy we tersine q_2 zarýadyň duran ýerinde q_1 zarýadyň döredýän potensialy.

$$\varphi_{12} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}\frac{q_2}{r}; \qquad \varphi_{21} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}\frac{q_1}{r},$$

$$W_{P_1} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}\frac{q_1 q_2}{r} = W_{P_2}; \qquad W_P = W_{P_1} = W_{P_2} = \frac{1}{2}(q_1\varphi_{12} + q_2\varphi_{21}).$$

Bu pikir ýöretmäniň zarýadlaryň islendik sany üçin adalatlydygyny subut etmek kyn däldir. Şoňa görä-de n nokatlanç zarýadlar sistemasy üçin özara täsir energiýasy şeýle tapylýar:

$$W_P = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n} q_i\varphi_i, \tag{17.11}$$

bu ýerde φ_i, bu q_i zarýadyň ýerleşen nokadyndaky jemi potensial.

Goý, käbir giňişlikdäki geçirijä yzly-yzyna tükeniksiz kiçi dq zarýad berilýär diýeliň. Her gezek dq zarýad golaýlaşanda, geçirijide öň ýygnanan zarýadlaryň meýdanynda iş etmeli bolar. Tükeniksiz uzaklykdan φ potensially geçirijä çenli edilýän dA iş şeýle tapylýar: $\delta A = \varphi dq = C\varphi d\varphi$. Ähli q zarýady doly geçirmek üçin edilen iş:

$$A = \int_0^\infty C\varphi d\varphi = \frac{C\varphi^2}{2}, \qquad A = W_P,$$

$$W_P = \frac{C\varphi^2}{2} = \frac{q^2}{2C}. \tag{17.12}$$

Muňa **zarýadly ýalňyz geçirijiniň elektrik energiýasy** diýilýär.

Edil şol usul boýunça kondensatoryň energiýasyny-da kesgitläp bileris:

$$\delta A = (\varphi_1 - \varphi_2)dq = \frac{qdq}{C},$$

$$A = \int_0^q \delta A = \int_0^q \frac{qdq}{C} = \frac{q^2}{2C},$$

$$W_P = A = \frac{q^2}{2C} = \frac{C(\varphi_1 - \varphi_2)^2}{2} = \frac{q(\varphi_1 - \varphi_2)}{2} = \frac{1}{2}(q_1\varphi_{12} + q_2\varphi_{21}),$$

bu ýerde $q_1 = q$, $q_2 = -q$ kondensatoryň obkladkalaryndaky zarýadlar.

Kondensatoryň obkladkalarynyň arasynda ponderomotor (özara dartyş) güýji döreýär. Mysal üçin, obkladkalarynyň arasy x bolan tekiz kondensatora seredeliň. Goý, ponderomotor güýjüň täsiri bilen olaryň aradaşlygy dx ululyga üýtgeýän bolsun.

Onda edilýän iş:

$$Fdx = -dW_P \quad \text{ýa-da} \quad F = -\frac{dW_P}{dx}.$$

Tekiz kondensator üçin:

$$F = -\frac{d}{dx}\left(\frac{q^2}{2C}\right) = -\frac{d}{dx}\left(\frac{q^2}{2\varepsilon_0\varepsilon S}x\right) = -\frac{q^2}{2\varepsilon_0\varepsilon S}.$$

Alnan aňlatmalar islendik n sany zarýadlanan hereketsiz geçirijilerden ybarat sistema üçin-de dogrudyr:

$$W_P = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n} q_i\varphi_i; \qquad \varphi_i = \int_{S_i} \sigma_i dS,$$

bu ýerde φ_i we σ_i, degişlikde q_i zarýady bolan geçirijiniň potensialy we zarýadlaryň üst boýunça dykyzlygy.

Şeýlelikde,

$$W_P = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n} \int_{S_i} \varphi_i\sigma_i dS. \qquad (17.14)$$

Zarýadlanan tekiz dielektriksiz kondensator üçin $C = \frac{\varepsilon_0\varepsilon S}{d}$;

$$\varphi_1 - \varphi_2 = Ed,$$

bu ýerde S – kondensatoryň obkladkalarynyň üst meýdany, d – olaryň aradaşlygy, E – obkladkalaryň arasyndaky deňdeş elektrik meýdanyň güýjenmesi.

Bulary nazara alyp, ýazarys:

$$W_P = \frac{C(\varphi_1 - \varphi_2)^2}{2} = \frac{1}{2}\varepsilon_0\varepsilon\frac{S}{d}E^2d^2 = \frac{1}{2}\varepsilon_0\varepsilon E^2 V, \qquad (17.15)$$

bu ýerde $V = Sd$ – kondensatoryň elektrik meýdanynyň göwrümi.

Bu aňlatma elektrik meýdanyň energiýasyny kesgitleýär. **Elektrostatik meýdanyň energiýasynyň dykyzlygyny** (göwrüm birligine düşýän ülüşini) şeýle taparys:

$$w = \frac{dW_P}{dV} = \frac{1}{2}\varepsilon_0\varepsilon E^2. \qquad (17.16)$$

Görnüşi ýaly, meýdanyň energiýasy onuň güýjenmesi bilen baglanyşyklydyr.

Dielektriklerde elektrik meýdanyň energiýa dykyzlygy:

$$w = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} = \frac{\sigma^2}{2\varepsilon_0 \varepsilon}. \tag{17.17}$$

Güýjenmäniň şol bir bahasynda elektrik meýdanynyň energiýasynyň göwrüm dykyzlygy dielektrik sredada wakuuma garanyňda ε esse uludyr. Şoňa görä-de polýarlanan dielektrigiň energiýasynyň göwrüm dykyzlygy şeýle kesgitlenýär:

$$w_{e(diel)} = \frac{1}{2}(\varepsilon - 1)\varepsilon_0 E^2 = \frac{1}{2}\chi\varepsilon_0 E^2 = \frac{1}{2}PE, \tag{17.18}$$

bu ýerde P – dielektrigiň polýarlananlygy, $\chi = \varepsilon - 1$ – onuň dielektrik kabul edijiligi. Elektrik meýdanynyň energiýasynyň gürrüňi edilende ol energiýanyň nirede jemlenenligi, elektrik energiýasyny göterijiler bolup nämäniň (zarýadmy ýa-da meýdan) hyzmat edýändigi barada soraglar ýüze çykýar.

Häzirki döwürde, ylmyň ykrar edişine görä, elektrik meýdanynyň energiýasy elektrik meýdanynyň giňişligindedir, ýagny giňişlikde jemlenendir.

XVIII BAP. HEMIŞELIK ELEKTRIK TOGY

18.1. Elektrik togy. Toguň güýji we dykyzlygy

Elektrik zarýadlarynyň ugrukdyrylan hereketine **elektrik togy** diýilýär. Geçirijide zarýadly erkin bölejikleriň tertipleşen **hereketine elektrik geçirijilik togy** diýilýär. Şeýle erkin zarýadly bölejikler diýlende metallardaky erkin elektronlar, dürli sredadaky erkin hereketlenip bilýän ionlar we elektronlar göz öňüne gelmelidir. Eger elektrik togy, zarýadlary özünde jemleýän makroskopik jisimleriň giňişlikdäki hereketiniň netijesi bolsa, oňa **konweksion tok** diýilýär.

Şeýlelikde, tertipleşip hereket edýän zarýadlaryň položitel zarýadlar-da, otrisatel zarýadlar-da bolmagy mümkin, emma olaryň hereket ugry garşylyklydyr. Elektrik togunyň ugry deregine položitel zarýadlaryň hereketiniň ugry kabul edilendir. Zarýadly bölejikleriň ýa-da zarýad geçiriji makroskopik jisimleriň, meýdanyň täsiri zerarly erkin hereket edip bilmeýän sredalaryna **izolýatorlar** diýilýär. Elektrik toguny gowy geçirýän maddalara bolsa **geçirijiler** diýilýär.

Elektrik togunyň bolmagy üçin iki şertiň ýerine ýetmegi zerurdyr. Birinjiden, sredada tok geçirijileriň bolmagy, ikinjiden bolsa onuň içindäki zarýadlary hereketlendirip durýan elektrik meýdanynyň bolmagy hökmandyr. Adatça, elektrik meýdanyny tok çeşmesi döredýär. Haýsy-da bolsa bir özge energiýany elektrik togunyň energiýasyna öwürýän gurluşa **elektrik energiýasynyň çeşmesi** diýilýär.

Elektrik toguny geçirýän sredanyň kese-kesiginden dt wagtyň dowamynda geçýän dq zarýadyň, şol wagta bolan **gatnaşygyna toguň güýji** (ýa-da tok) diýilýär:

$$I = \frac{dq}{dt}. \tag{18.1}$$

Wagtyň geçmegi bilen toguň güýji we ugry üýtgemese, oňa hemişelik tok diýilýär we onuň güýji şeýle kesgitlenýär:

$$I = \frac{q}{t}, \tag{18.2}$$

bu ýerde q – geçiriji sredanyň kese-kesiginden käbir t wagtyň dowamynda geşýän zarýadlaryň jemi. Tok güýjüniň birligi: amper (A). $1A = 1Kl/1s$.

Tok güýji ampermetriň kömegi bilen ölçenilýär.

Bu ýerde bir şerti belläp geçmek zerurdyr, ýagny toguň akyş ugry boýunça sredanyň her bir künjeginde elektrik meýdanynyň güýjenmesi üýtgemän galýar. Sebäbi, ol üýtgäýse, zarýadlaryň ýygnanmasy ýa-da seýreklenmesi bolup, öz gezeginde olar biri-birine täsir eder we togy üýtgeder. Şoňa görä-de hemişelik tok diňe ýapyk zynjyrda bolup biler we zynjyryň islendik kesiginden geçýän tok deň bolmalydyr.

Umuman aýdylanda, tok geçirýän sredanyň kese-kesiginiň tekizligini kesip geçýän tok, onuň dürli nokatlarynda ugry we ululygy boýunça üýtgeşik bolmagy mümkin. Şoňa görä-de, has takyk maglumat almak maksady bilen, toguň dykyzlygy baradaky düşünje girizilýär. Kese-kesigiň barlanýan nokadynyň töweregin-de toguň ugruna perpendikulýar tükeniksiz kiçi dS meýdanly bölegi alsak, onda şondan geçýän dI toguň dS meýdana gatnaşygyna **tok güýjüniň dykyzlygy** ýa-da **toguň dykyzlygy** diýilýär:

$$j = \frac{dI}{dS}. \tag{18.3}$$

Tok dykyzlygynyň birligi: A/m^2.

Ýokarky şertde tok güýjüniň dykyzlygy üstüň normaly bilen ugurdaş bolar $(\vec{j} = \vec{n} j)$. Bu pikiri dowam edip, islendik kiçi üstden geçýän toguň bahasyny şeýle kesgitläp bolar:

$$dI = jdS_1 = jdS\cos\alpha = \vec{j}\vec{n}dS = \vec{j}d\vec{S},$$

bu ýerde α – tok güýjüniň dykyzlygynyň wektory bilen dS üstüň normalynyň arasyndaky burç.

Elektrik togy öwrenilende $\int\limits_{(S)} \vec{j}d\vec{S}$ aňlatma görnüşinde **elektrik togunyň dykyzlygynyň wektory** diýen düşünje girizilýär. Islendik S üsti kesip geçýän tok, toguň dykyzlygynyň akymyna deň bolýar:

$$I = \int\limits_{(S)} \vec{j}d\vec{S} = \int\limits_{(S)} \vec{j}_n dS,$$

bu ýerde j_n – tok güýjüniň dykyzlygynyň wektorynyň üstüň normalynyň ugruna proýeksiýasy. Ýönekeý şertlerde, ýagny birhilli geçirijilerdäki hemişelik toguň güýji üçin:

$$I = jS$$

bolar. Ozal belläp geçişimiz ýaly, $I = dq/dt$. Eger V göwrümli ýapyk S üste seretsek, onda şol üsti kesip geçýän doly tok, onuň içinden zarýadlaryň çykyş çaltlygyna deňdir.

Zarýadyň saklanma kanunyny göz öňünde tutup we V göwrümden çykýan zarýadlaryň mukdary azalýar diýip hasaplap, ýazyp bolýar:

$$I = -\frac{dq}{dt}.$$

Şeýlelikde

$$\oint_{(S)} \vec{j}\,d\vec{S} = -\frac{dq}{dt}. \tag{18.4}$$

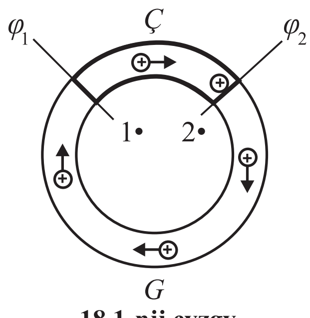
Bu aňlatma **üznüksizligiň deňlemesi** diýilýär. Geçirijiden hemişelik tok geçende zarýadlaryň mukdary üýtgemýär:

$$q = const \quad \text{ýa-da} \quad \oint_{(S)} \vec{j}\,d\vec{S} = 0.$$

Bu deňlemeden hemişelik tok elmydama üznüksizdir ýa-da hemişelik tok diňe ýapyk zynjyrda bolýar diýen netije gelip çykýar.

18.2. Elektrik hereketlendiriji güýç we naprýaženiýe

Öň belläp geçişimiz ýaly, elektrostatik kulon güýçleri geçirijidäki erkin zarýadlary, geçirijiniň üstünde ähli nokatlaryň potensialy bir meňzeş bolar ýaly ýaýradýar. Netijede, geçirijiniň içinde elektrik meýdany bolmaz. Geçirijileriň ýapyk zynjyrynda hemişelik geçirijilik toguny goldamak üçin, kulon güýçlerinden başga-da, gaýry (daşgary) güýçler diýip atlandyrylýan, elektrostatik däl güýçler bolmalydyr. Gaýry güýçler zynjyryň käbir kesiminde zarýadlary ugrukdyrylan herekete getirip, elektrostatik güýçlere garşy A iş edýärler we zynjyryň galan bölegininiň uçlarynda potensiallaryň tapawudyny döretmek arkaly hemişelik toguň saklanmagyny üpjün edýärler. Mysal üçin, elektromagnit generatorda (öndüriji) gaýry güýçler onuň rotoryny aýlamaga sarp edilýän mehaniki energiýanyň hasabyna, galwaniki elementlerde bolsa, elektrodlaryň üstünde geçýän himiki reaksiýalaryň hasabyna ýüze çykýar.



18.1-nji çyzgy

Uzak wagtlap toguň bolmagyny gazanmak üçin geçirijiniň kiçi potensially (tok geçirijileri položitel hasaplamaly) ujundan toguň getiren zarýadlaryny aýryp olary uly potensially uja eltip durmaly. Bu işi tok çeşmesi Ç ýerine ýetirmeli (*18.1-nji çyzgy*). Tok çeşmesinde gaýry güýçleriň täsiri bilen döredilen elektrik meýdany zarýadlary elektrostatik meýdanyň güýçleriniň garşysyna süýşirip, zynjyryň uçlarynda potensiallaryň tapawudynyň we netijede zynjyrda toguň bolmagyny üpjin edýär. Çyzgyda G zynjyryň daşky-geçiriji bölegi.

Gaýry güýçleri olaryň zynjyrda zarýadlary süýşirmek üçin edýän işi bilen häsiýetlendirip bolýar. Birlik položitel zarýady süýşirmek üçin gaýry güýçleriň edýän işine deň bolan fiziki ululyga zynjyryň elektrik hereketlendiriji güýji (EHG) diýilýär:

$$\mathcal{E} = \frac{A}{q}. \tag{18.5}$$

Bu iş tok çeşmesiniň energiýasynyň hasabyna edilýänligi üçin $\mathcal{E}$ EHG-ä tok çeşmesiniň elektrik hereketlendiriji güýji hem diýilýär.

EHG-niň birligi: wolt (W).

$$1W = \frac{1J}{1Kl} = \frac{1N \cdot 1m}{1Kl} = \frac{1W \cdot 1Kl \cdot 1m}{1m \cdot 1Kl} = 1W.$$

q zarýada täsir edýän $\vec{F}_g$ gaýry güýji:

$$\vec{F}_g = \vec{E}_g q$$

görnüşde aňlatmak bolýar. $\vec{E}_g$ – gaýry güýçleriň meýdanynyň güýjenmesi. Zynjyryň 1-2 uçastogynda gaýry güýçleriň q zarýadyň üstünde edýän işi:

$$A_{12} = \int_1^2 \vec{F}_g d\vec{l} = q \int_1^2 \vec{E}_g d\vec{l}. \tag{18.6}$$

Bu işi q zarýada bölüp $\mathcal{E}$ EHG-ni alarys:

$$\mathcal{E}_{12} = \int_1^2 \vec{E}_g d\vec{l}. \tag{18.7}$$

Ýapyk zynjyr üçin hasaplanan integral bu zynjyrdaky EHG-ni kesgitleýär:

$$\mathcal{E} = \oint_{(l)} \vec{E}_g d\vec{l}. \tag{18.8}$$

Görnüşi ýaly, ýapyk zynjyrdaky EHG gaýry güýçleriň güýjenme wektorynyň sirkulýasiýasy bilen kesgitlenýär.

q zarýada gaýry güýçlerden başga-da elektrostatik meýdanyň $\vec{F}_e = q\vec{E}_e$ güýçleri täsir edýär. Şeýlelikde, zynjyrda q zarýada täsir edýän netijeleýji güýç

$$\vec{F} = \vec{F}_g + \vec{F}_e$$

bolar. 1-2 uçastokda netijeleýji güýjüň q zarýadyň üstünde eden işi:

$$A_{12} = \int_1^2 \vec{F}_g d\vec{l} + q \int_1^2 \vec{E}_g d\vec{l}. \tag{18.9}$$

(18.6) formuladan we $\int_1^2 \vec{E}_e d\vec{l} = \varphi_1 - \varphi_2$ deňlikden peýdalansak (18.9) deňlikden zynjyryň berlen uçastogyndaky **napryýaženiýanyň peselmegi** (ýa-da ýöne **napryýaženiýe**) diýilýän ululygy alarys:

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathscr{E}_{12} \tag{18.10}$$

Zynjyryň gaýry güýçler täsir etmeýän uçastogynda napryaženiýe potensiallaryň tapawudyna deňdir:

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2. \tag{18.11}$$

Zynjyryň beýle uçastogyna birhilli uçastok diýilýär.

18.3. Omuň kanuny. Geçirijileriň garşylygy

Nemes fizigi G. Om tejribeleriň maglumatlarynyň esasynda zynjyryň birhilli uçastogy üçin kanun kesgitledi. **Zynjyr uçastogy üçin Omuň kanuny: elektrik zynjyrynyň birhilli uçastogynda metal geçirijiden geçýän toguň *I* güýji geçirijiniň uçlaryndaky *U* napryaženiýa göni proporsionaldyr, geçirijiniň *R*** garşylygyna ters proporsionaldyr:

$$I = \frac{U}{R}. \tag{18.12}$$

Doly zynjyr üçin Omuň kanuny

$$I = \frac{\mathscr{E}}{R + r}$$

formula bilen ýazylýar. Bu ýerde $\mathscr{E}$ – zynjyra täsir edýän EHG, r – EHG-niň çeşmesiniň içki garşylygy.

Fiziki ululyk bolan elektrik garşylygy R geçirijiniň formasyna, ölçeglerine we materialyna baglydyr. Birhilli geçiriji üçin

$$R = \rho \frac{l}{S}, \tag{18.13}$$

bu ýerde l – geçirijiniň uzynlygy, S – onuň kese-kesiginiň meýdany, ρ – maddanyň **udel elektrik garşylygy** diýip atlandyrylýan, materialyň häsiýetlerine bagly koeffisiýent.

(18.12) formula boýunça garşylygyň birligi: W/A. Garşylygyň bu birligine *Om* diýilýär: $1 Om = 1 W/1 A$. Elektrik garşylygy ommetrde ölçenilýär. Udel garşylygyň birligi: $Om \cdot metr$ ($Om \cdot m$). Udel garşylyk uzynlygy $1 m$, kese-kesiginiň meýdany $1 m^2$ bolan geçirijiniň garşylygyna deňdir. Dürli geçirijileriň udel garşylygy maglumatnamalarda getirilýär. Mysal üçin, elektrik toguny oňat geçirijiler bolan kümşüň we misiň udel garşylyklary, degişlilikde $1{,}6 \cdot 10^{-8}\ Om \cdot m$ we $1{,}7 \cdot 10^{-8}\ Om \cdot m$ deňdir.

$$G = \frac{1}{R}$$

fiziki ululyga **elektrik geçirijilik** diýilýär. Geçirijiniň ölçeg birligi: simens (*Sm*).

Omuň kanunynyň (18.12) formulasyna (18.13) garşylygyň aňlatmasyny goýup alarys:

$$\frac{I}{S} = \frac{1}{\rho}\frac{U}{l}, \tag{18.14}$$

bu ýerde $\frac{1}{\rho} = \gamma$ – **udel elektrik geçirijilik**. Onuň birligi: metrde simens (Sm/m).

$U/l = E$, $\frac{I}{S} = j$ bolýandygy üçin (18.14) aňlatmany özgerdip alarys:

$$j = \gamma E.$$

$\vec{E}$ we $\vec{j}$ wektorlaryň ugurdaş bolanlygy üçin ýokarky deňligi:

$$\vec{j} = \gamma\vec{E} \tag{18.15}$$

görnüşde ýazmak bolar. (18.15) formula **differensial görnüşdäki Omuň kanunyny** aňladýar. Bu gatnaşyk üýtgeýän meýdanlar üçin hem dogrudyr.

Metallaryň köpüsi üçin otag temperaturasynyň töwereginde udel garşylyk ρ absolýut temperatura göni proporsionaldyr. Bu baglanyşyk aňlatma görnüşinde şeýle ýazylýar:

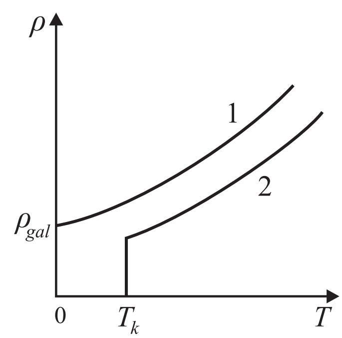
$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t),$$

bu ýerde ρ we ρ_0, degişlilikde, geçirijiniň t we 0°C temperaturalardaky udel garşylyklary, α – garşylygyň temperatura koeffisiýenti. Örän pes bolmadyk temperaturalarda bu koeffisiýent 1/273 K^{-1} ululyga golaýdyr. Onda udel garşylygyň temperatura baglylygyny aşakdaky deňlik bilen hem aňlatmak bolar:

$$\rho = \alpha\rho_0 T,$$

bu ýerde T – termodinamiki temperatura.

Pes temperaturalarda bu kanunlardan gyşarma ýüze çykýar (*18.2-nji çyzgy*). Köplenç, ρ-nyň T baglylygy 1-nji egri çyzyk ýaly bolýar.



18.2-nji çyzgy

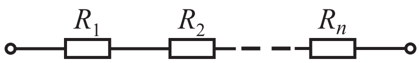
Çyzgydaky ρ_{gal} termodinamiki temperaturanyň nol bahasyna degişli bolan galyndy udel garşylykdyr. Ol materialyň arassalygyna we nusgada galyndy mehaniki napräženiýanyň barlygyna baglydyr. Şeýle bolansoň metal nusga haýal taplananda ρ_{gal} azalýar. Ideal kristallik gözenekli absolýut arassa metal üçin absolýut nol temperaturada $\rho_{gal} = 0$ bolmaly. Dogrudan-da, tejribeleriň görkezişi ýaly, absolýut temperatura örän golaý temperaturalarda ρ_{gal}-yň bahasy nola örän golaý bolýar.

Metallaryň we garyndylaryň uly topary üçin temperaturanyň birnäçe kelwin bahalarynda garşylyk birden nola öwrülýär (18.2-nji çyzgydaky 2-nji egri). Bu hadysa **aşageçirijilik** diýilýär. Her aşageçirijiniň **aşageçiriji** hala degişli T_k kritiki temperaturasy bardyr. Ilkinji gezek bu hadysa 1911-nji ýylda Kamerling-Onnes tarapyndan simapda ýüze çykaryldy.

Arassa metallar üçin T_k temperatura 0,14 K-den (iridiý) 9,22 K-e (niobiý) çenli, garyndylarda – 0,155 K-den (BiPt) 23,2 K (Ni_3Ge) çenli aralyklarda, $Ba_2Cu_3O_7$ üçin $T_k = 92$ K.

Aşageçirijilik hadysasy örän güýçli magnit meýdanlaryny almak üçin ulanylýar. Eger elektromagnitiň sarymlary aşageçiriji simden taýýarlansa, onda şeýle sarymda toguň örän ýokary dykyzlygy emele gelýär we netijede elektromagnit örän güýçli magnit meýdanyny döredýär. Güýçli magnit meýdanlarynda maddalar öwrenilende garaşylmadyk hadysalaryň ýüze çykmagy mümkin. Ýatda saklaýjy elementleri aşageçirijilik hadysasyna esaslanan hasap maşynlary hem bardyr. Häzirki döwürde bu ugurda T_k temperaturasy ýokarlandyrylan, otag temperaturasyna golaýlaşdyrylan materiallaryň gözlegi alnyp barylýar.

Elektrik garşylyklary yzygider birikdirilende (*18.3-nji çyzgy*):



18.3-nji çyzgy

a) zynjyryň hemme uçastoklarynda tok deň bolýar:

$$I = const;$$

b) zynjyrdaky napryaženiýanyň peselmesi onuň böleklerindäki napryaženiýanyň peselmeleriniň jemine deňdir:

$$U = U_1 + U_2 + ... + U_n;$$

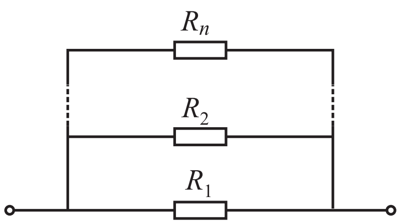
ç) geçirijilerdäki napryaženiýanyň peselmesi olaryň garşylyklaryna göni proporsionaldyr. Tok güýçlerini Omuň kanuny boýunça ýazyp alarys:

$$\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2} = ... = \frac{U_n}{R_n}; \tag{18.16}$$

d) zynjyryň umumy garşylygy geçirijileriň garşylyklarynyň jemine deňdir:

$$R = R_1 + R_2 + ... + R_n.$$

Geçirijiler parallel birikdirilende (*18.4-nji çyzgy*):



18.4-nji çyzgy

a) zynjyryň şahalanmadyk bölegindäki tok güýji şahalanan bölegindäki toklaryň jemine deňdir:

$$I = I_1 + I_2 + ... + I_n;$$

b) parallel uçastoklardaky napryaženiýanyň peselmeleri deňdir:

$$U = const;$$

ç) tok güýçleri Omuň kanuny boýunça ýazylsa:

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + ... + \frac{U}{R_n};$$

d) soňky deňlikden zynjyryň umumy garşylygynyň ters ululygy zynjyryň uçastoklarynyň garşylyklarynyň ters ululyklarynyň jemine deňdir:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + ... + \frac{1}{R_n} \tag{18.17}$$

18.4. Elektrik togunyň işi we kuwwaty. Joul-Lensiň kanuny

Uçlaryna U hemişelik naprýaženiýe goýlan zynjyryň islendik uçastogyna seredeliň. Wagtyň t aralygynda geçirijiniň kese-kesiginden $q = It$ zarýad geçer. Beýle diýildigi geçirijiniň bir ujundan beýleki ujuna t wagtda It zarýad geçýär diýildigidir. Bu şertde elektrostatik meýdanyň güýçleri we gaýry güýçler berlen uçastokda

$$A = Uq = UIt \tag{18.18}$$

iş eder. Omuň $U = IR$ kanunyndan peýdalanyp, (18.18) deňlikden alarys:

$$A = \frac{U^2}{R}t; \qquad A = I^2Rt. \tag{18.19}$$

(18.18) we (18.19) formulalar hemişelik toguň zynjyrynyň R garşylykly uçastogy üçin toguň işiniň formulalarydyr. Bu deňlikleri t wagta bölüp, elektrik togunuň berlen uçastokdaky kuwwaty üçin aňlatmalar alarys:

$$P = UI = I^2R = \frac{U^2}{R}. \tag{18.20}$$

Tok güýji amperlerde, naprýaženiýe woltlarda, garşylyk omlarda aňladylsa, iş joulda, kuwwat bolsa wattda aňladylýar: $1J = 1W \cdot 1A \cdot 1s$; $1Wt = 1W \cdot 1A$. Elektrik togunyň işiniň (energiýasynyň) tehnikada köp ulanylýan birligi: kilowatt-sagat. $1kWt \cdot sag = 10^3 \cdot 3{,}6 \cdot 10^3 J = 3{,}6 \cdot 10^6 J$.

Zynjyrdaky geçirijiler dynçlykda bolsa we zynjyrda hiç hili himiki öwrülişikler geçmeýän bolsa, onda toguň işi geçirijiniň içki energiýasynyň köpelmegine, ýagny geçirijiniň gyzmagyna sarp bolýar. Geçirijiden bölünip çykýan ýylylyk mukdary

$$Q = UIt \quad \text{ýa-da} \quad Q = I^2Rt \quad \text{ýa-da} \quad Q = \frac{U^2}{R}t. \tag{18.21}$$

formulalar bilen aňladylýar. (18.21) aňlatma tejribeleriň üsti bilen Joul we Lens tarapyndan alyndy. Şonuň üçin oňa **Joul-Lensiň kanuny** diýilýär.

Eger geçirijide silindr görnüşli elementar dV göwrüm bölünip alynsa, onda bu göwrümden dt wagtda bölünip çykýan ýylylyk mukdaryny Joul-Lensiň kanunynyň esasynda ýazmak bolar:

$$dQ = I^2Rdt = (jdS)^2\frac{\rho dl dt}{dS} = j^2\rho dVdt. \tag{18.22}$$

Bu ýerde $jdS = I$ (18.3), $\frac{\rho dl}{dS} = R$ (18.13), $dV = dSdl$.

(18.22) aňlatmany dV we dt bölüp, göwrüm birliginden birlik wagt aralygynda bölünip çykýan Q_{ud} udel ýylylyk mukdaryny alarys:

$$Q_{ud} = \rho j^2. \tag{18.23}$$

Joul-Lensiň kanuny zynjyryň birhilli uçastogy üçin kesgitlenendir. Ýöne täsir edýan gaýry güýçler himiki tebigatly bolmadyk ýagdaýynda bu kanunyň zynjyryň birhilli däl uçastogy üçin hem dogrudygy subut edilendir.

18.5. Zynjyryň birhilli däl uçastogy üçin Omuň kanuny

Biz düzüminde EHG-ni döredýän uçastogy saklamaýan birhilli uçastok üçin Omuň $U = IR$ formula bilen aňladylýan kanunyny alypdyk. Indi 1-2 uçastokda täsir edýän EHG-ni $\mathscr{E}_{12}$ bilen, uçastogyň 1-2 uçlaryndaky potensiallaryň tapawudyny $\varphi_1 - \varphi_2$ bilen belläp, zynjyryň birhilli däl uçastogyna seredeliň.

Geçirijiler dynçlykda bolanda gaýry we elektrostatik güýçleriň geçiriji zarýadlaryň üstünde edýän işini A_{12} bilen belläliň. Bu iş uçastokda bölünip çykýan ýylylyk mukdaryna deňdir. (18.9) formula boýunça q zarýady 1-2 uçastokda süýşürmek üçin edilen işi aşakdaky ýaly aňlatmak bolar:

$$A_{12} = \mathscr{E}_{12}q + q(\varphi_1 - \varphi_2). \tag{18.24}$$

Eger EHG saýlanyp alnan 1-2 ugur boýunça položitel zarýadlaryň süýşmegini üpjün edýän bolsa, onda $A_{12} > 0$.

Wagtyň t aralygynda geçirijide bölünip çykýan ýylylyk mukdary:

$$Q = I^2Rt = IR(It) = IRq. \tag{18.25}$$

(18.24) we (18.25) formulalardan peýdalanyp alarys:

$$IR = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathscr{E}_{12},$$

bu ýerde

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \mathscr{E}_{12}}{R}. \tag{18.26}$$

Bu aňlatma zynjyryň birhilli däl uçastogy üçin Omuň kanunydyr.

Eger uçastokda tok çeşmesi ýok bolsa ($\mathscr{E}_{12} = 0$), onda bu formuladan zynjyryň birhilli uçastogy üçin Omuň kanunyny ($I = U/R$) alarys. Zynjyr ýapyk bolanda 1 we 2 nokatlaryň potensiallary deň bolar, ($\varphi_1 = \varphi_2$) we (18.26) formuladan ýapyk zynjyr üçin Omuň kanunyny alarys:

$$I = \frac{\mathscr{E}}{R_1},$$

bu ýerde $\mathscr{E}$ – zynjyrda täsir edýän EHG, R_1 – zynjyrdaky garşylyklaryň jemi: $R_1 = r + R$, r – EHG-niň çeşmesiniň içki garşylygy, R – daşky zynjyryň garşylygy. Onda ýapyk zynjyr üçin Omuň kanuny aşakdaky görnüşde bolar:

$$I = \frac{\mathscr{E}}{R + r}. \tag{18.27}$$

Zynjyr üzük bolanda $I = 0$ bolar we (18.26) boýunça $\mathscr{E}_{12} = \varphi_2 - \varphi_1$ bolar, ýagny üzük zynjyr üçin EHG zynjyryň uçlaryndaky potensiallaryň tapawudyna deň bolar. Diýmek, tok çeşmesiniň EHG-sini ölçemek üçin zynjyr üzük mahaly çeşmäniň uçlaryndaky potensiallaryň tapawudyny ölçemek ýeterlikdir. Potensiallaryň tapawudy woltmetrler bilen ölçenilýär. Bu ölçegde garşylygy has uly woltmetr ulanylsa alnan netijäniň takyklygy ýokary bolar.

Eger alnan bölek elektrik energiýasynyň çeşmelerini içine almaýan bolsa, onda $\mathscr{E}_{12} = 0$ bolar ýa-da

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2.$$

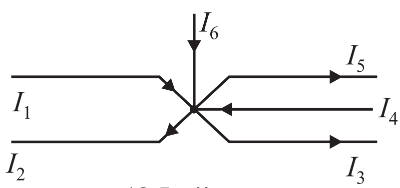
Şeýle bölegiň iki çetindäki naprýaženiýe bilen potensiallaryň tapawudy biri-birine deň bolar.

18.6. Kirhgofyň düzgünleri

Ýokarda öwrenilen ýönekeý elektrik zynjyrlary üçin alnan kanunlar we aňlatmalar diňe fiziki hadysalary düşündirmek üçin hyzmat etmän, eýsem takyk hasaplamalarda-da ulanylýar. Iş ýüzünde, köplenç, çylşyrymly elektrik zynjyrlaryny hasaplamak, olaryň dürli böleklerindäki naprýaženiýeleri, dürli şahalanmalaryndaky tok güýçlerini kesgitlemek zerurdyr. Hemişelik toguň çylşyrymly zynjyrlarynyň hasaplanyş usullarynyň kämilleşmeginde Kirhgofyň (1847-nji ýyl) düzgünleri möhüm ähmiýete eýedir.

Kirhgofyň birinji düzgüni hemişelik tokly zynjyryň hiç bir nokadynda zarýadlaryň toplanmagynyň ýa-da ýok bolmagynyň mümkin däldiginden gelip çykýar. Hakykatdan-da, eger ýapyk zynjyryň islendik kesiginde tok güýji deň bolsa, onda onuň islendik kesiginden wagt birliginde deň zarýad geçýär diýildigidir. Eger zynjyr şahalanýan bolsa, zynjyryň düwni diýip atlandyrylýan şahalanma nokadynda-da zarýadlar toplanybam, ýitibem bilmez. Düwne girýän zarýadlar çykýan zarýadlara mukdar taýdan deňdir. Eger düwne girýän togy položitel, ondan çykýan togy otrisatel diýip kabul etsek, onda Kirhgofyň birinji düzgünini şeýle görnüşde aýdyp bolar (*18.5-nji çyzgy*): **zynjyryň şahalanýan düwninde toklaryň algebraik jemi nola deňdir:**

$$\sum_{i=1}^{n} I_i = 0, \qquad (18.28)$$



18.5-nji çyzgy

bu ýerde n – düwne birikýän geçirijileriň sany. 18.5-nji çyzgyda görkezilen düwün üçin:

$$I_1 - I_2 - I_3 + I_4 - I_5 + I_6 = 0.$$

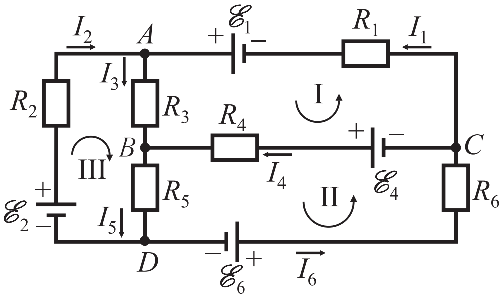
Kirhgofyň ikinji düzgüni şahalanýan çylşyrymly zynjyryň her bir ýapyk kontury üçin Omuň kanunyny ulanmakdan ybaratdyr. Ony şeýle kesgitläp bolar: **şahalanýan elektrik zynjyrynyň islendik ýapyk konturynda, onuň ähli böleklerindäki naprýaženiýäniň peselmeleriniň algebraik jemi şol kontura girýän elektrik energiýa çeşmeleriniň** EHG-**leriniň algebraik jemine deňdir:**

$$\sum_{i=1}^{n} I_i R_i = \sum_{i=1}^{n} \mathscr{E}_i. \qquad (18.29)$$

Hemişelik toguň şahalanýan zynjyryna degişli meseleleri Kirhgofyň düzgünlerini ulanyp çözmek üçin aşakdaky tertibi saklamaly:

1. Zynjyryň ähli uçastoklarynda toklaryň ugruny erkin saýlap almaly we shemada bellemeli.

2. Zynjyrda m düwün bar bolsa (18.28) aňlatma boýunça $(m - 1)$ aňlatma ýazmaly. Sebäbi iň soňky aňlatma öňkileriň gaýtalanmasy bolýar.



18.6-njy çyzgy

3. Şahalanýan zynjyrda ähli ýapyk konturlar üçin aýlanma ugruny bellemeli. Mysal üçin, 18.6-njy çyzgyda aýlanma ugurlary üç kontur üçin I, II, III bellikler bilen gorkezilen.

4. Konturlar üçin (18.29) aňlatma boýunça deňlemeler sistemasyny ýazmaly. Deňlemeler ýazylanda toklaryň bellenen ugurlary aýlanma ugry bilen gabat gelende položitel alamat bilen, tersine bolanda otrisatel alamat bilen alynmaly. Çeşmäniň diňe özi işlände berjek togy aýlanma ugry bilen gabat gelýän bolsa, ol çeşmäniň EHG-siniň alamaty položitel, tersine bolanda otrisateldir. (18.29) aňlatma boýunça deňlemeler ähli konturlar üçin ýazylmaýar. Olar ähli konturlar üçin ýazylsa bir näçe deňleme artykmaçlyk edýär. (18.29) aňlatma boýunça konturlar üçin deňlemeler ýazylýanda her deňlemede, iň bolmanda öň ýazylmadyk bir uçastok üçin maglumatlar bolmaly.

5. Uçastoklaryň sany p bolan, m konturdan ybarat zynjyr üçin jemi $p - (m - 1)$ deňleme ýazylýar.

6. Hasaplamalaryň netijesi boýunça haýsydyr bir zynjyr uçastogy üçin tok güýjüniň bahasy otrisatel bolsa, hakykatda bu toguň ugrunyň shemadaky erkin bellenen ugra garşylyklydygyny görkezýär.

Mysal üçin, 18.6-njy çyzgydaky zynjyryň ABC uçastogy üçin (18.29) boýunça

$$\mathscr{E}_1 - \mathscr{E}_4 = I_1R_1 + I_3R_3 - I_4R_4$$

deňlemäni ýazyp bolýar.

Birinji we ikinji düzgün boýunça ýazylan deňlemeler sistemasyny çözüp, şahalanýan zynjyra degişli meseläni işläp bolýar.

XIX BAP. METALLARDA, WAKUUMDA WE ELEKTROLITLERDE ELEKTRIK TOGY

19.1. Metallaryň elektrik geçirijiligi

Metallarda elektrik geçirijiliginiň ýokarylygy olarda togy geçiriji elektronlaryň konsentrasiýasynyň ummasyz uludygy belen düşündirilýär. Metallarda togy geçirijileriň elektronlardygyny ilkinjileriň biri bolup nemes fizigi K.Rikke (1901-nji ýyl) tejribe arkaly tassyklady. Ol iki mis silindriniň arasyna alýumin silindri jebis gysdyryp, galtaşma üstlerden bir ýylyň dowamynda hemişelik tok geçiripdir. Olaryň üstünden 3,5 *MKl* zarýad geçende bolsa, soňraky barlaglar bir jisimiň atomlarynyň beýlekä geçmeýändigini görkezdi. Bu tejribeden elektrik toguny atomlaryň kristallik gözenegi bilen gowşak baglanyşykly, haýsy-da bolsa erkin zarýadlar geçirýär diýen netijä gelip bolýar.

Şeýle zarýadlaryň 1897-nji ýylda iňlis fizigi D. Tomson tarapyndan açylan elektronlar bolaýmagy mümkin diýen çaklama döredi.

Muny barlamak üçin şeýle tejribäni göz öňüne getireliň. Goý, uzynlygy l, kese-kesiginiň meýdany S bolan metal steržen boý ugruna υ tizlik bilen hereket etsin. Onda erkin zarýadlar hem bilelikde hereket eder. Eger steržen birden saklansa, zarýad geçiriji bölejikler badyna hereketini dowam eder we örän gysga wagtlap elektrik togy dörär. Toguň ugry boýunça zarýadlaryň alamatyny we zarýad geçirijileriň massa birligindäki zarýadlaryň sanyny $\frac{|q|}{m}$ kesgitläp bolar. Sterženiň uçlaryna birleşdirilen galwanometr ýapyk zynjyr emele getirer we geçýän togy ölçär. Zarýadly bölejikler steržen boýunça hereketlenip alan kinetik energiýasyny elektrik garşylygyny ýeňip geçmäge sarp edýärler. Ol iş bolsa Joul-Lensiň kanunyna laýyklykda ýylylyk energiýasyna öwrülýär:

$$\delta A = I^2 R dt = -Nd\left(\frac{m\upsilon^2}{2}\right) = -n_0 lSm\upsilon d\upsilon, \qquad (19.1)$$

bu ýerde $N = n_0 lS$ – tok äkidijileriň sany, n_0 – konsentrasiýasy, υ – olaryň gönükdirilen hereketiniň tizligi. Minus alamaty işiň zarýady geçirijileriň kinetik energiýasynyň azalmagynyň hasabyna edilýändigini aňladýar.

Toguň dykyzlygyny $j = |q|n_0\upsilon$ diýip alalyň. Onda

$$\delta A = |q|n\upsilon SRIdt = |q|n_0\upsilon SRdq,$$

bu ýerde dq – galwanometrden dt wagtda geçýän zarýad.

Şeýlelikde, $|q|n_0\upsilon SRdq = -n_0 lSm\upsilon d\upsilon$, $|q|Rdq = -mld\upsilon$.

Bu ýerden aňlatmany υ_0-dan nola çenli çäklerde integrirläp, steržen tormozlananda galwanometrden geçýän zarýady taparys:

$$q = \frac{ml\upsilon_0}{|q|R} \quad \text{ýa-da} \quad \frac{|q|}{m} = \frac{l\upsilon_0}{Rq}. \qquad (19.2)$$

Bu formula boýunça hasaplamalar metallarda togy geçirijileriň elektronlardygyny görkezýär.

Şuňa meňzeş tejribäni 1913-nji ýylda L. I. Mandelştam we D. N. Papaleksi geçirdi. Olar sarymlarynyň uçlary telefona birleşdirilen tegegi okunyň daşynda ýokary ýygylyk bilen towlanma hereketine getirip, üýtgeýän togyň döreýändigini subut etdiler. 1916-njy ýylda T. Stýuart we R. Tolmen telefony duýgur galwanometre çalşyp ölçeg geçirdiler. Olar togy geçirijileriň zarýadynyň otrisateldigini we zarýadyň ululygy boýunça elektronyň zarýadyna deňdigini subut etdiler.

Klassyky fizikada metallaryň ionlary kristallik gözenegiň düwünlerinde yrgyldyly halda ýerleşip, olaryň jemi položitel zarýady umumylaşdyrylan elektronlaryň otrisatel zarýadlary bilen kompensirlenýär. Elektrik meýdany ýok mahaly elektronlar tertipsiz ýylylyk hereketinde bolup, öz aralarynda we položitel ionlar bilen yzygiderli täsirleşip durýarlar. Olaryň erkin hereket ýolunyň ortaça uzynlygy, takmynan gözenegiň düwünleriniň aradaşlygyna deň hasap edilýär, ýagny $\langle\lambda\rangle \sim 10^{-10}\,m$. Elektronlaryň konsentrasiýasy bolsa $n \approx 10^{28} \div 10^{29} m^{-3}$ töweregidir. Molekulýar-kinetik teoriýanyň usullaryny ulansak, onda elektrik meýdanynda tizlenýän elektronlar, her çaknyşmada, özüniň tertiplenen hereketiniň tizligini doly ýitirýär diýip, alarys:

$$m\frac{d\upsilon}{dt} = eE. \qquad (19.3)$$

Her çaknyşmadan soň, indikä çenli elektron deňtizlenýän hereketde bolýar we erkin ýol geçmeginiň ahyrynda υ_{max} tizlige eýe bolýar. Olaryň ortaça tizligi $\langle\upsilon\rangle = \frac{\langle\upsilon_{max}\rangle}{2}$ bolar. Elektronyň hereket deňlemesini onuň erkin ýol geçmeginiň möhletiniň $\langle\tau\rangle$ dowamynda integrirläp alarys:

$$\langle\upsilon_{max}\rangle = \frac{eE\langle\tau\rangle}{m},$$

$$\langle\upsilon\rangle = \frac{eE\langle\tau\rangle}{2m}.$$

P.Drude we G.Lorens özleriniň klassyky teoriýasynda geçiriji elektronlara elektronlardan ybarat gaz (elektron gazy) hökmünde seredip, olaryň her birine ýylylyk hereketiniň $\langle u\rangle$ ortaça tizligi mahsusdyr diýip hasap edýärler. Hasaplamalaryň görkezişi ýaly elektronlaryň elektrik meýdanynyň täsiri zerarly hereketiniň (dreýf hereketiniň) ortaça $\langle\upsilon\rangle$ tizligi $\langle u\rangle$-dan has kiçidir ($\langle\upsilon\rangle << \langle u\rangle$). Şoňa görä-de elektronlaryň erkin ýol geçmesiniň ortaça möhleti:

$$\langle\tau\rangle = \frac{\langle\lambda\rangle}{\langle u\rangle}, \qquad (19.4)$$

bu ýerde $\langle\lambda\rangle$ – elektronyň erkinlikde (iki çakyşmanyň arasynda) ortaça geçýän ýoly.

Şeýlelikde, metallarda geçirijilik togunyň dykyzlygyny kesgitleýän aňlatma alarys:

$$j = n_0 e\langle \upsilon \rangle = \frac{n_0 e^2 \langle \lambda \rangle E}{2m\langle u \rangle} = \gamma E = \frac{E}{\rho}.$$

Bu ýerde

$$\gamma = \frac{n_0 e^2 \langle \lambda \rangle}{2m\langle u \rangle}$$

şertli belleniş girizilýär we oňa γ – giçerijiniň udel elektrik geçirijiligi diýilýär. $\rho = \frac{1}{\gamma}$ – udel elektrik garşylygy.

Görşümiz ýaly, klassyky teoriýanyň esasynda, **Omuň differensial görnüşdäki kanunyny** aldyk:

$$\vec{j} = \gamma \vec{E} = \frac{1}{\rho}\vec{E}.$$

Her bir elektron erkin hereketde mahaly deňtizlenýänligi sebäpli, kinetik energiýasyny artdyrýar. Emma nobatdaky çaknyşmada elektronyň goşmaça alan energiýasy ýylylyk energiýa öwrülýär. Şol energiýany şeýle hasaplap bolar:

$$\Delta W_e = \frac{1}{2}m(\vec{u} + \vec{\upsilon}_{\max})^2 - \frac{1}{2}mu^2 = m(\vec{u}\,\vec{\upsilon}_{\max}) + \frac{1}{2}m\upsilon_{\max}^2.$$

Ýylylyk hereketiniň tertipsizligi sebäpli

$$\langle(\vec{u}\,\vec{\upsilon}_{\max})\rangle = 0$$

bolýandygyny subut etmek kyn däldir. Netijede,

$$\langle \Delta W_e \rangle = \frac{1}{2}m\langle \upsilon_{\max}^2 \rangle.$$

Şu aýdylanlara esaslanyp, geçirijiniň göwrüm we wagt birliginiň dowamynda, içki energiýa öwrülýän elektrik togunyň energiýasyny kesgitläp bileris:

$$w = \frac{n_0}{\tau}\langle \Delta W_e \rangle = n_0 \frac{\langle u \rangle}{\langle \lambda \rangle}\frac{m}{2}\langle \upsilon_{\max}^2 \rangle$$

ýa-da

$$w = \frac{n_0 e^2 \langle \lambda \rangle E^2}{2m\langle u \rangle} = \gamma E^2.$$

Bu deňleme toguň **ýylylyk kuwwatynyň dykyzlygy üçin differensial görnüşdäki Joul-Lensiň kanunydyr.**

Nemes fizikleri G. Wideman we R. Frans 1853-nji ýylda ýylylyk geçirijiligi bilen udel elektrik geçirijiliginiň baglanyşygyny tejribede öwrendiler we bu baradaky kanuny kesgitlediler. **Wideman-Fransyň kanuny:** ähli metallar üçin, şol bir temperaturada, K ýylylyk geçirijiligiň γ udel elektrik geçirijilige gatnaşygy deňdir:

$$\frac{K}{\gamma} = C.$$

1882-nji ýylda daniýaly fizik L. Lorens bu gatnaşygyň termodinamik temperatura göni baglydygyny kesgitledi:

$$\frac{K}{\gamma} = C_1 T. \tag{19.5}$$

Termodinamikadan belli bolşy ýaly, gazlaryň ýylylyk geçirijiligi şeýle kesgitlenýär:

$$K = \frac{1}{3} d C_V \langle \lambda \rangle \langle u \rangle = \frac{1}{3} n_0 m C_V \langle \lambda \rangle \langle u \rangle,$$

bu ýerde $d = n_0 m$ – gazyň dykyzlygy, C_V – hemişelik göwrümde gazyň udel ýylylyk sygymy.

Elektronlardan ybarat gaza biratomly ideal gaz hökmünde garasak, onuň molýar massasyny $M = mN_A$ diýip alsak, onda

$$\rho C_V = n_0 m \frac{3}{2} \frac{R}{\mu} = \frac{3}{2} n_0 k,$$

bu ýerde k – Bolsmanyň hemişeligi.

Elektron gazynyň ýylylyk geçirijiligi:

$$K = \frac{1}{2} n_0 k \langle \lambda \rangle \langle u \rangle. \tag{19.6}$$

Drudeniň teoriýasyna laýyklykda:

$$\langle u \rangle = \upsilon_{kw} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} \quad \text{ýa-da} \quad \frac{K}{\gamma} = 3\frac{k^2}{e^2} T.$$

Şeýlelikde bu ýerde:

$$C_1 = \frac{2k^2}{e^2} = 2,23 \cdot 10^{-8} \frac{J^2}{(Kl \cdot K)^2}$$

we ol tejribede alynýan bahasyndan az çykýar.

Elbetde, Drude elektronlaryň ählisiniň ýylylyk hereketiniň tizlikleri ululygy boýunça deň diýip, nätakyklyk goýberýär. Emma, soňra G. Lorens tizlikler üçin Makswell-Bolsmanyň klassyky statistikasyny ulansa-da, netije bermedi. Üstesinede teoriýa görä

$$\gamma \sim \frac{1}{\sqrt{T}}, \qquad \rho \sim \sqrt{T}$$

baglanyşyklar ýüze çykdy.

Emma temperaturanyň örän giň çäklerinde udel geçirijiligiň we garşylygyň temperatura baglylygynyň

$$\gamma \sim \frac{1}{T} \quad \text{we} \quad \rho \sim T \tag{19.7}$$

bolýandygyny tejribeler görkezdi.

Bu teoriýa boýunça, ylaýta-da, metallaryň ýylylyk sygymyny düşündirmekde uly kynçylyklar ýüze çykýar. Eger klassyky teoriýa boýunça metallaryň molýar sygymy $C = \frac{9}{2}R$ bolýan bolsa, onda tejribeleriň netijesine görä, ol kristallik dielektriklerden juda az tapawutlanýar we takmynan $3R$-e deňdir. Diýmek, elektron gazynyň içki energiýasy geçiriji gyzdyrylanda üýtgemeýär. Şeýlelikde, klassyky elektron teoriýanyň fiziki hadysalary düşündirip bilmeýändigi we onuň düýpli ýetmezçilikleriniň bardygy aýdyňlaşýar.

19.2. Elektronyň metaldan çykyş işi, termoelektron emissiýa we wakuumda elektrik togy

Öň belläp geçişimiz ýaly, metal kristallaryň giňişlik gözeneginiň düwünlerinde metalyň položitel zarýadly ionlary ýerleşýär. Kristal gözenegi emele gelende atomlar bilen gowşak baglanyşykda bolan walent elektronlary atomlardan aýrylyp bütin kristal boýunça umumylaşýarlar. Bu elektronlar metalyň položitel ionlarynyň aralarynda, gazyň molekulalaryna meňzeş, haotik hereket edýärler. Metallarda erkin elektronlaryň mukdarynyň köp bolmagy ýokary elektrik geçirijiligini üpjün edýär.

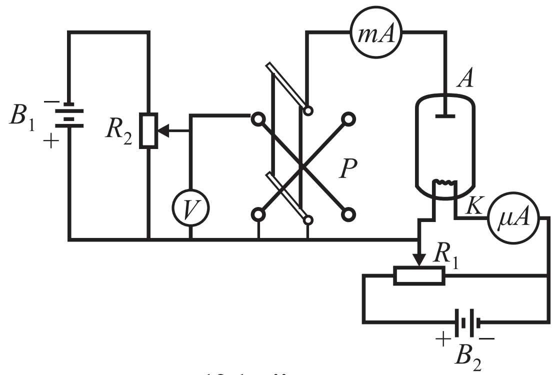
Ähli elektronlar giňişlik gözenekleriniň içinde diýip hasaplasak, düwünlerdäki položitel ionlaryň elektrik meýdany we “erkin” elektronlaryň döredýän elektrik meýdany biri-birini kompensirleýär diýip kabul etmek bolar.

Metal geçirijidäki elektronlaryň käbiri tertipsiz ýylylyk hereketiniň netijesinde metalyň çäginden çykyp bilýär. Çykan elektronlar metalyň üstüniň golaýynda elektronlaryň bulutjagazyny (toplumyny) emele getirýär. Elektronlar çykanda metalyň üstki gatlagynda ýüze çykýan položitel zarýadlar we giňişlikdäki elektronlaryň bulutjagazy goşa gatlak hökmünde elektrik meýdanyny döredýär. Bu meýdan, birinjiden-ä, metalyň içinde onuň üstüne golaýlaşýan elektronlary yza tesdirýär, ikinjidenem, çykýan elektronlara bökdençlik döredýär we metala tarap dartýar. Şoňa görä-de, çykýan elektronlar iş edip öz energiýalaryny harçlansoň, ýene-de metalyň içine dolanyp gelýärler.

Geçiriji elektronyň metaldan wakuuma çykmak üçin edýän iň kiçi işine **çykyş iş** diýilýär we A harpy bilen bellenýär.

Şeýlelikde, metalyň üsti bilen elektron bulutjagazynyň arasynda dinamiki deňagramlyk ýagdaýynda bolýar, ýagny çykýan we dolanyp gelýän elektronlaryň sany deňleşýär. Adaty şertlerde elektron bulutjagazynyň duýarlyk konsentrasiýasy metalyň üstüne örän golaýda, ýagny metalyň atomlarynyň aradaşlygynyň birnäçe essesine deň aralykda döreýär. Emma metalyň temperaturasy artdygyça ol aralyk ulalýar. Ýylylyk energiýasynyň täsiri netijesinde metaldan elektronlaryň goparylmagyna **termoelektron emissiýa** diýilýär.

Elektronyň çykyş işi metalyň himiki tebigatyna, onuň üstüniň arassalygyna we ýylmanaklygyna baglydyr. Onuň üstüniň hapalanmagy, oksid gatlagy bilen örtülmegi we şuňa meňzeş üýtgeşiklikler çykyş işiniň ululygyna täsir edýär. Arassa metallar üçin çykyş işi birnäçe elektron-wolt töweregidir ($1eW = 1{,}6 \cdot 10^{-19}J$). **Termoelektron emissiýasyny** 19.1-nji çyzgyda görkezilen shema boýunça öwrenip bolýar. Goý, howasy çykarylyp çuňňur wakuum döredilen çüýşe turbajygynda iki sany elektrod ýerleşdirilen bolsun.



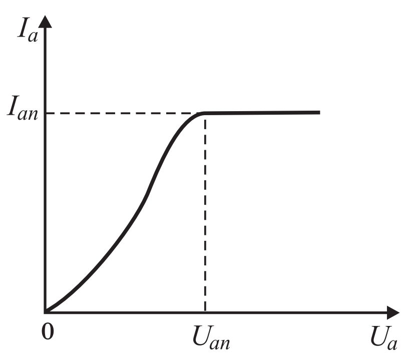
19.1-nji çyzgy

Elektrodlaryň biri (iki ujy-da daşyna çykarylan spiral görnüşli simjagaz) elektrik togy goýberip gyzdyrylýar we oňa katod ýa-da emitter (goýberiji) diýilýär. Ikinji elektrod bolsa katoddan çykyp wakuumda hereket edýän elektronlary çekip almaga we kabul etmäge niýetlenendir. Oňa anod ýa-da kollektor diýilýär.

Katodyň temperaturasyny B_2 – çeşmeden alynýan tok R_1 reostat bilen üýtgedilende, (μA) mikroampermetriň görkezmesi arkaly kesgitläp bolýar. Katodyň gyzgynlygy zerarly çykýan elektronlara **termoelektronlar**, olaryň wakuumda döredýän toguna bolsa **termoelektronlaryň togy** diýilýär.

Eger ugur üýtgediji açar bilen anoda otrisatel potensial bersek, onda termoelektronlar anoddan katoda tarap iteklenerler we olaryň wakuumda tok döretmeýändikleri üçin, *mA* milliampermetr tok görkezmez. Elektronlaryň katody gurşap alýan bulutjagazy has-da dykyzlaşar we termoelektronlaryň indiki çykmasyny kynlaşdyrar.

Katodyň hemişelik temperaturasynda anoda položitel potensial berip we onuň ululygyny kem-kemden artdyryp, anodyň togunyň üýtgeýändigini görmek bolýar.



19.2-nji çyzgy

Anodyň naprýaženiýesiniň kiçi bahalarynda anod togy haýal ulalýar. Sebäbi elektronlaryň bulutjagazy dykyz boldugyça katoddan çykýan termoelektronlaryň köp bölegi yzyna serpikdirilýär. Anodyň naprýaženiýesi ulaldygyça, elektronlaryň bulutjagazy seýrekläp başlaýar we anod togunyň ösüşi güýçlenýär (*19.2-nji çyzgy*). Haçanda katoddan çykýan termoelektronlaryň hemmesi anoda ýetmäge mümkinçilik alanda anod togunyň artmasy ýene-de haýallaýar, soňra bolsa ösmesini bes edýär. Katodyň şol temperaturasynda geçýän termoelektronlaryň iň uly toguna **doýgun tok** diýilýär.

Anod naprýaženiýesiniň kiçi bahalarynda $U_a << U_{an}$ anod togunyň üýtgeýşine, elektronlaryň bulutjagazynyň göwrümleýin otrisatel zarýadynyň täsirini göz öňünde tutup, I. Lengmýur we S.A. Boguslawskiý şeýle kanunalaýyklyk aldylar:

$$I_a = BU_a^{3/2}, \tag{19.8}$$

bu ýerde B – elektrodlaryň görnüşine, ölçeglerine we özara ýerleşişlerine bagly koeffisiýent.

Bu aňlatma **ikiden üç derejeli kanun** ýa-da **Lengmýuryň formulasy** diýilýär. Emma bu kanun arkaly çykýan tok bahalary tejribedäki bahalara doly gabat gelmeýär, ýagny U_a-nyň kiçi bahalarynda ol tejribedäkiden azdyr, $U_a \to U_{an}$ ýagdaýda bolsa köpdür. Sebäbi Lengmýuryň formulasynda termoelektronlaryň mukdary hiç hili çäklendirilmeýär. Hakykatda bolsa, her bir katodyň belli temperaturadaky üst birliginden her sekuntda çäkli mukdardaky n_e elektronlar çykyp bilýär. Diýmek, $I_{an} = en_e$. Mahlasy, her katodyň belli bir çäkli emissiýa ukyplylygy bardyr.

Tejribeden ýene bir kanunalaýyklyk gelip çykýar. Katodyň temperaturasy ýokarlandygyça doýgun toruň bahasy barha tiz ulalyp başlaýar. Bu hadysa **Riçardson-Deşmanyň formulasynda**, doýgun toguň dykyzlygynyň temperatura bilen baglanyşygy görnüşde sypatlandyrylýar:

$$j = CT^2 e^{-\frac{A}{kT}},$$

bu ýerde A – elektronyň metaldan çykyş işi, k – Bolsmanyň hemişeligi, C – Riçardsonyň hemişeligi, ol katodyň materialyna we onuň üstüniň ýagdaýyna bagly ululyk.

$$C = 120(1 - R), \left(\frac{A}{sm^2 K^2} - \text{ölçeg birligi}\right),$$

bu ýerde R – emitteriň üst gatlagyndaky potensial päsgelçilikden geçýän elektronlaryň serpikme koeffisiýenti.

Eger $A << kT$ şertiň ýerine ýetýändigini göz öňünde tutsak, onda emissiýa togunyň dykyzlygynyň temperatura baglylygynda esasy kesgitleýji hökmünde $\exp\left(-\frac{A}{kT}\right)$ hyzmat edýändigini bellemek bolar. Şonuň üçin, emissiýa ukyplylygyny artdyrmak üçin, onuň temperaturasyny ýokarlandyrmaly ýa-da elektronlaryň çykyş işini kemeltmeli.

Mümkingadar pes temperaturada toguň ýeterlik uly dykyzlygyny almak üçin çykyş işi azrak bolan katod ulanylýar. Munuň üçin, gyzgyna çydamly metalyň (mysal üçin, wolfram, molibden we başgalar) üsti örän ýuka oksid (BaO, SrO we CaO) gatlagy bilen örtülýär.

Termoelektron emissiýasy dürli gurallarda giňden ulanylýar. Olaryň hemmesinde termoelektronlar ulanylýan-da bolsa, ulanylyş usuly we tutulýan maksat dürlüdir. Şeýle gurallaryň, elektrowakuumly çyralar diýip atlandyrylýan, käbir toparynda termoelektronlar diňe anod toguny üýtgetmek üçin dolandyrylýan bolsalar, başga toparynda-elektronlar çogdamlanyp, şöhle kysmy, dürli ugurlara gönükdirmek maksady bilen alynýar. Anodyň toguny sazlamak katody gurşap alýan inçejik spiralyň ýa-da torjagazyň kömegi bilen amala aşyrylýar. Torjagazlaryň sany köp bolanda, wakuum giňişliginiň käbir künjeginde, katoddan uzakda, elektronlaryň hereketi haýalladylan toplumy (bulutjagazy) döräp biler. Şol toplumyň elektronlarynyň hasabyna indiki torjagazlaryň kömegi bilen dolandyrylýan tok döredip bolýar. Şeýle ýagdaýda, haýalladylan elektronlaryň toplumyny döredýän we öz üstünden anoda tarap geçirýän torjagaz katodyň wezipesini ýerine ýetirýär, emma onuň hususy emissiýasy ýokdur. Şol torjagazyň ýerleşen ýerine wirtual katod ýa-da katodyň bolup biläýjek ýeri diýilýär.

Termoelektron emissiýa hadysasy dürli elektrowakuum we gazzarýadsyzlandyrma abzallarynda giňden ulanylýar.

19.3. Elektrolitlerde elektrik togy

Elektrik togy ion geçirijiligi bilen amala aşyrylýan maddalara **elektrolitler** diýilýär. Elektrik meýdanynyň täsiri bilen ionlaryň tertipleşen hereketine ion geçirijiligi diýilýär. Kislotalaryň, aşgarlaryň we duzlaryň erginleri elektrolitlerdir. Položitel ionlary **kationlar**, otrisatel ionlary **anionlar** diýip atlandyrmak kabul edilendir. Suwuklykda ionlaryň tertipleşen hereketini döredýän elektrik meýdany elektrodlar – tok çeşmesine birleşdirilen geçirijiler tarapyndan döredilýär. Položitel ionlar-metallaryň ionlary, wodorodyň ionlary katoda tarap hereket edýärler. Otrisatel ionlar-kislota galyndylary we OH gidroksil toparlar bolsa anoda tarap hereket edýärler.

Elektrolitlerden tok geçende elektrodlaryň üstüne elektrolitiň düzümine girýän maddalaryň bölunip çykmasy bolup geçýär. Bu hadysa **elektroliz** diýilýär. Elektrolitlere ikinji hilli geçirijiler diýilýär. Olardan tok geçende madda hem geçirilýär. Birinji hilli geçirijiler bolan metallardan tok geçende bolsa, mälim bolşy ýaly, togy geçirijiler bolup elektronlar hyzmat edýärler. Maddanyň ergininiň (meselem, suwdaky ergininiň) molekulalarynyň polozitel we otrisatel ionlara dargamagy erediji bilen özara täsiriň netijesinde düşündirilýär. Elektrolitlerde ionlaryň ýüze çykmagyna **elektrolitik dissosiasiýa** diýilýär.

Ereýän maddanyň molekulalary özara baglanyşykly garşylykly alamatly zarýadlardan durýar (meselem, Na^+Cl^-, H^+Cl^-, K^+I^-, $Cu^{++}SO_4^{--}$ we başgalar). Bu molekulalaryň garyşdyryjynyň (meselem, suwuň) polýar molekulalary bilen özara täsiri garşylykly zarýadly ionlaryň özara dartyşmasyny gowşadýar. Molekulalaryň ýylylyk, haotik hereketinde erän maddanyň we eredijiniň molekulalarynyň çakyşmalary bolýar. Ol çakyşmalar bolsa molekulalaryň ionlara dargamagyna getirýär.

Ionlara dissosirlenen n_0' molekulalaryň sanynyň garylan maddanyň molekulalarynyň umumy n_0 sanyna bolan gatnaşygyna dissosasiýanyň derejesi (α) diýilýär:

$$\alpha = \frac{n_0'}{n_0}.$$

Garyndyda ionlaryň ýylylyk, haotiki hereketi sebäpli garşylykly alamatly ionlar birleşip, neýtral molekula emele getirip bilýär. Bu prosese ionlaryň **rekombinasiýasy** diýilýär.

Elektrolitik dissosasiýa we ionlaryň rekombinasiýasy hadysalarynyň arasynda üýtgemeýan şertlerde dinamiki durnuklylyk ýüze çykýar. Bu durnuklylyk mahaly wagt birliginde ionlara dargaýan molekulalarynyň sany, şol wagt aralygynda ionlaryň birleşip emele getirýän neýtral molekulalaryň sanyna deň bolýar.

Dinamiki deňagramlylyk ýagdaýynda elektrolit kesgitli α_0 dissosasiýanyň derejesi bilen häsiýetlendirilýär. α_0 suwuklykdaky togy geçiriji ionlaryň sanyny kesgitleýär. Dissosasiýanyň derejesi α_0 temperatura, garyndynyň konsentrasiýasyna we garyndynyň ε dielektrik syzyjylygyna baglydyr.

Elektrolitlerdäki elektrik togunyň dykyzlygynyň elektrik meýdanynyň güýjenmesine baglylygy Omuň

$$\vec{j} = \gamma \vec{E}$$

kanunyna boýun egýär. Ýöne γ udel geçirijiligi kesgitleýän aňlatma metallaryňky bilen deňeşdirilende çylşyrymlydyr.

Elektroliz üçin Faradeýiň birinji kanuny. Elektrodlarda bölünip çykýan maddanyň massasy elektrolitden geçýän q elektrik zarýadyna göni proporsionaldyr:

$$m = kq \quad \text{ýa-da} \quad m = kIt,$$

bu ýerde k – proporsionallyk koeffisiýenti. Oňa maddanyň **elektrohimiki ekwiwalenti** diýilýär. Ol elektrolitden birlik zarýad geçende bölünip çykýan maddanyň massasyna san taýdan deňdir.

Elektroliz üçin Faradeýiň ikinji kanuny. Maddalaryň elektrohimiki ekwiwalentleri olaryň atom (molýar) massasynyň (A) walentligine (n) gatnaşygyna proporsionaldyr:

$$k = \frac{1}{F}\frac{A}{n},$$

bu ýerde F – ululyga **Faradeýiň sany** (hemişeligi) diýilýär.

Elektroliz üçin **Faradeýiň birleşdirilen kanuny:**

$$m = \frac{1}{F}\frac{A}{n}It \quad \text{ýa-da} \quad m = \frac{1}{F}\frac{A}{n}q.$$

Kanundan görnüşi ýaly, Faradeýiň hemişeligi elektrodda islendik maddanyň A/n gatnaşyga deň massasyny (kilogramda) almak üçin elektrolitden goýbermeli zarýadyň mukdaryna san taýdan geňdir. Faradeýiň sanynyň bahasy: $F = 96500$ *Kl/mol*.

Elektroliz üçin Faradeýiň birleşdirilen kanunyndan islendik ionyň elektrik zarýady üçin alarys:

$$q = \frac{nF}{N_A},$$

bu ýerde N_A – Awogadranyň sany. Bir walentli ($n = 1$) ionyň zarýady absolýut bahasy boýunça elektronyň zarýadyna deňdir. Öň belläp geçişimiz ýaly, islendik elektrik zarýady e elementar zarýada kratnydyr.

Elektroliz tehnikada giňden ulanylýar. Esasynda elektroliz hadysasy bolan elektrohimiki usul bilen arassa maddalar alynýar. Şeýle-de, elektroliz bir maddanyň üstüni beýleki bir maddanyň ýuka gatlagy bilen örtmek üçin (nikelleme, hromlama we başgalar) ulanylýar.

XX BAP. GAZLARDA ELEKTRIK TOGY

20.1. Gazlaryň ionlaşmasy we rekombinasiýasy

Gazlar elektrik zarýady boýunça neýtral atomlardan we molekulalardan ybarat bolany üçin, adaty şertlerde, elektrik toguny geçirmeýär diýip hasap edilýär. Sebäbi gazlarda elektrik meýdanynyň täsiri zerarly ugrukdyrylan herekete geler ýaly erkin zarýadlar ýokdur. Emma dürli täsirleriň netijesinde molekulalaryň ençemesi erkin elektrona we položitel iona bölünip bilýärler. Şeýle ýagdaýda gaz elektrik toguny geçirýär. Dörän erkin elektronlaryň käbiri neýtral molekulalar bilen çaknyşyp otrisatel ionlary we ýene-de elektronlary döredip bilýär. Elektrik meýdanyň täsiri bilen elektronlar meýdany döredýän položitel plastina tarap herekete gelýärler. Položitel zarýadlar bolsa ters ugra hereket edýärler we jemleýji togy döredýärler.

Gazlardan elektrik togunyň geçmegine gazda elektrik zarýadsyzlanmasy ýa-da **gaz zarýadsyzlanmasy** diýilýär. Atomlara ýa-da molekulalara zarýadlaryň durnukly sistemasy hökmünde garasak, onda olary bölmek üçin energiýa sarp etmelidigine göz ýetireris. Bu energiýa **ionlaşma energiýasy** diýilýär. Ol gazyň himiki tebigatyna, goparylýan elektronyň halyna baglydyr. Elbetde, atomlarda iň gowşak baglynyşykly elektron iň daşky (walent) elektronlardyr we olary goparmaga iň az energiýa talap edilýär. Bir elektrony goparylan (bir walentli) položitel ionyň galan elektronlarynyň baglanyşygy bolsa has-da berkeýär we indiki elektrony goparmaga birinjiniňkiden has köp iş etmek talap edilýär. Şoňa görä-de, gazlarda ionlaşma bolanda, köplenç, bir walentli ionlar döreýär.

Ionlaşma energiýasyna derek ony häsiýetlendirýän ionlaşma energiýasyna görä deň tizlendiriji meýdanyň potensiallar tapawudy hem ulanylýar. Oňa **ionlaşdyryjy potensial** φ_i diýilýär:

$$\varphi_i = \frac{E_i}{e}.$$

Aşakdaky tablisada käbir atomlaryň we molekulalaryň ionlaşdyryjy potensiallary görkezilen.

Atomlar	H	He	O	N	Ne	Cl	Na	Hg	K	Ar
$\varphi_u(W)$	13,6	24,6	13,6	14,5	21,6	13,0	5,14	10,4	4,34	15,8
Molekularlar	H_2	O_2	H_2O	N_2	NO_2	Cl_2	CO_2	CO	HCl	NO
$\varphi_u(W)$	15,4	12,2	12,6	15,6	12,3	11,3	13,8	14,0	12,6	9,8

Belläp geçişimiz ýaly, ionlaşma gazlarda dürli täsirler sebäpli bolup biler (güýçli gyzdyrmak, rentgen we gamma şöhleriň täsiri, çalt hereket edýän elektronlar we ionlar bilen çakyşmak). Dürli alamatly zarýadlanan jübüt bölejikleriň wagt birliginde birlik göwrüminde döreýän sanyna **ionlaşmanyň intensiwligi** (depginliligi) diýilýär. Tebigy şertlerde, gaz hemişe täsir astyndadyr. Mysal üçin, kosmosdan gelýän şöhleler, ýer gabygyndaky elementleriň radiaktiw bölünmesindäki şöhleler we ş.m. gowşak bolsa-da, oňa täsir edip durýar.

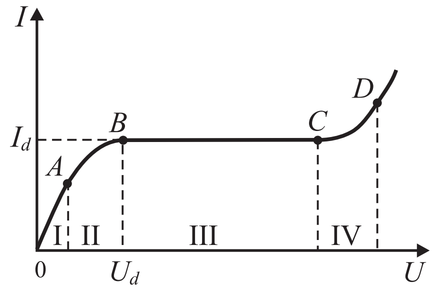
Şonuň üçin, gazlaryň elektrogeçirijiligi, umuman aýdylanda, noldan tapawutlydyr. Bu ýerde bir zady belläp geçmeli, ýagny gazlardaky hatda ujypsyz tötänleýin döreýän zarýadlar-da, elektrik meýdanyna düşende ýagdaýy ymykly üýtgedip bilýär.

Elektrik meýdanynda tizlenýän zarýadly bölejigiň kinetik energiýasy tä indiki çaknyşma çenli ulalýar. Eger onuň alyp ýetişýän energiýasy ionlaşdyryş işinden has kiçi bolsa, onda çaknyşma maýyşgak bolup geçýär we netijede molekulalaryň ýylylyk hereketi güýçlenýär (gaz gyzýar). Tizlendiriji meýdanyň güýjenmesiniň artmagy bilen, zarýadlanan bölejikleriň iki çaknyşmanyň arasynda alyp ýetişýän energiýasy-da artýar. Olaryň kinetiki energiýasy ýeterlik ulalanda maýyşgak däl çaknyşma başlanýar, ýagny energiýa molekulanyň walent elektronlaryna geçýär we atom oýandyrylan hala geçýär. Eger tizlenýän bolejikleriň energiýasy ionlaşdyrma energiýasyndan köp bolsa, onda molekulalaryň elektrony goparylyp, ýönekeý elektron-ion jübüti emele geler. Şeýle-de, tizlenip çaknyşýan bölejigiň massasy kiçi boldugyça, onuň energiýasynyň ionlaşma energiýasyna golaý bolýandygyny ýönekeý hasaplamalar görkezýär. Başgaça aýdylanda, elektron bilen ion deň potensiallaryň tapawudyny geçende deň energiýa alýar, emma massasy kiçi bölejik has uly tizlenme alýar. Ionlar bilen urguly ionlaşmanyň bolmagy üçin ionlary has güýçli tizlendirmek zerurdyr.

Ionlaşma bilen bir hatarda gazyň ýerleşen göwrüminde ionlar bilen elektronlaryň gaýtadan birleşmesi-de bolup geçýär. Bu prosese **rekombinasiýa** diýilýär we ol neýtral molekulanyň dikelmegine getirýär.

20.2. Özbaşdak däl we özbaşdak gaz zarýadsyzlanmasy

Eger gazlaryň elektrik geçirijiligi ionlaşdyryjy daşky çeşmäniň hasabyna döredilýän we goldanylýan bolsa, onda oňa **özbaşdak däl gaz zarýadsyzlanmasy** diýilýär. Çeşme hökmünde rentgen, gamma, ultramelewşe we ş.m. şöhleleri ulanyp bolýar. Özbaşdak däl gaz zarýadsyzlanmasy ionlaşdyryjy täsir aýrylanda kesilýär. Iki elektrodly çüýşe turbajyk 0,1 ÷ $10^4 Pa$ aralykdaky basyşda inert gazy bilen doldurylan bolsun. Elektrodlara goýlan potensiallaryň tapawudy üýtgedilip we olara degişli toklary ölçäp, gaz zarýadsyzlanmasynyň wolt-amper häsiýetnamasy (WAH) alynýar. Şeýle ölçegler bilen alnan WAH 20.1-nji çyzgyda görkezilendir. Naprýaženiýäniň kiçi bahalarynda I tok bilen U naprýaženiýe gönümel baglanyşykda bolýar (AO uçastok), Omuň kanuny ýerine ýetýär. AB uçastokda naprýaženiýäniň köpelmegi bilen toguň ösüşi haýallaýar. BC uçastokda bolsa naprýaženiýe ösende tok hemişelik galýar. Bu ýagdaýyň ýüze çykmagynyň sebäbi ionizatoryň wagt birliginde döredýän ionlary we elektronlary şonça wagtda elektrodlara barýar. Netijede, doýgun I_d tok alynýar. Onuň bahasy ionizatoryň kuwwaty bilen kesgitlenýär. Ionizatoryň täsiri aýrylsa, OC uçastokda zarýadsyzlanma kesiler.



20.1-nji çyzgy

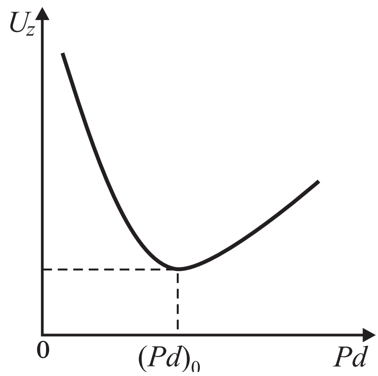
Diňe ionlaşdyryjynyň täsiri bolanda ýüze çykýan zarýadsyzlanma **özbaşdak däl gaz zarýadsyzlanmasy** diýilýär.

Naprýaženiýäniň C nokada degişli bahasyndan ýokary artmagy bilen CD we ondan soňky uçastoklarda toguň ululygy gaýtadan ösüp başlaýar. Bu hadysa gazyň molekulalarynyň urgudan ionlaşmasynyň başlap, erkin zarýadlaryň köpelip ugraýandygy bilen düşündirilýär.

Daşky ionlaşdyryjy täsir kesilenden soň hem dowam edýän zarýadsyzlanma **özbaşdak gaz zarýadsyzlanmasy** diýilýär. Munuň üçin, zarýadsyzlanmanyň öz döredýän täze şertleri zerarly, zarýadly erkin bölejikleriň birsyhly döräp durmagy zerurdyr. Olary döredýän esasy gözbaşylaryň biri-de, urgudan ionlaşmadyr. Daşky täsir bilen ilkibaşda ýüze çykan zarýadly bölejikler (elektronlar we ionlar) erkin ýol geçýän wagty ýeterlik uly energiýa alyp ýetişýärler we neýtral molekula bilen çaknyşanda ony ionlaşdyrýarlar. Täze dörän zarýadlar hem soňra tizlenme alyp, öz gezeginde, ionlaşdyrmaga ukyply bolýarlar. Öň garap geçişimiz ýaly, bu prosese elektronlar netijeli gatnaşýarlar. Üstesine-de, elektronlar has ýeňil owuntyjyklar bolansoň, esasy tok geçirýänler-de şolardyr. Şeýlelikde, erkin elektronlaryň sany progressiýa golaý tertipde artýar. Emma elektronlaryň gürlügi anoda ýakynlaşdygyça artyp, katoda golaý giňişlikde azlygyna galar. Şonuň üçin hem elektrik meýdanynyň güýjenmesini, ionlar hem molekulalar bilen çaknyşyp täze zarýadlary döreder ýaly, elektrik meýdanynyň güýjenmesini artdyrmak gerek bolýar. Mundan başga-da, uly energiýa alan ionlar katodyň üstüne zarply düşende, ikilenji elektron emissiýasy ýüze çykýar. Şeýlelikde, elektronlaryň gürlügi ähli göwrümde ulalýar we daşky ionlaşdyryş täsiri zerarly döreýän elektronlaryň sanyndan has artyk bolýar.

Elbetde, elektronlar bilen neýtral molekulalaryň maýyşgak däl çakyşmalary başlandan soň, gazyň molekulalarynyň ençemesi oýandyrylan hala geçýärler we olar adaty durnukly halyna gaýdyp gelende şöhle goýberýärler. Mundan başga-da, käbir položitel ionlar elektron bilen täzeden birleşende-de has gysga tolkun uzynlykly şöhle **(rekombinasiýadaky şöhlelenme)** goýberilýär. Ol şöhleler bolsa, katodyň üstünde fotoelektron emissiýasyny ýüze çykaryp biler. Bu sanalyp geçilen prosesler özbaşdak däl gaz zarýadsyzlanmasynyň özbaşdak görnüşine geçmegine getirýär. Bu şertiň giňişleýin derňewi Tausendiň elektron syrgyn teoriýasynda düşündirilýär.

Özbaşdak däl gaz zarýadsyzlanmasynyň özbaşdak görnüşe geçmegine **gazda elektrik böwsülişi** diýilýär. Oňa degişli naprýaženiýa bolsa **böwsüliş naprýaženiýesi** ýa-da **ýandyryş naprýaženiýesi** diýilýär. Ýandyryş naprýaženiýesi U_z gazyň molekulalarynyň ionlaşma potensialyna, katoddan elektronlaryň çykyş işine göni baglydyr. Emma gazyň basyşyna we elektrodlaryň aradaşlygyna baglylygy has çylşyrymlydyr. 20.2-nji çyzgyda ýandyryş naprýaženiýesiniň gazyň P basyşy bilen elektrodlaryň aradaşlygynyň köpeltmek hasylyna baglylygy görkezilen. Çyzgydaky $U_z = f\,(Pd)$ baglanyşyk özbaşdak gaz zarýadsyzlanmasynyň ýüze çykmagynyň iki şerti bilen düşündirilýär:



20.2-nji çyzgy

1) elektronlaryň elektrik meýdanynyň täsiri bilen alýan energiýasy gazyň molekulasynda urgy ionlaşmasyny döretmäge ýeterlik bolmaly. Položitel ionlaryň alýan energiýasy bolsa, katoddan elektronlary çykarmaga ýeterlik bolmaly;

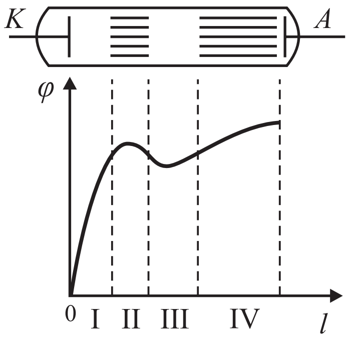
2) gazda togy geçirijileriň sanynyň we onuň geçirijiliginiň ýeterlik bolmagy üçin elektronlaryň gazyň molekulalary bilen maýyşgak däl çaknyşmalarynyň ähtimallygy ýokary bolmaly.

Elektronlar we ionlar gazyň molekulalary bilen yzygiderli çaknyşyp durýarlar we olar iki çaknyşmanyň arasynda (erkin ýoluň dowamynda) elektrik meýdany tarapyndan tizlendirilýärler. Basyş artsa erkin ýoly gysgaldýar. Şeýle bolansoň, degişli tizlenme bermek üçin elektrik meýdanynyň güýjenmesini köpeltmeli bolýar. Berlen gaz zarýadsyzlandyryjy turba üçin d hemişelik bolýar. $Pd > (Pd)_0$ şertde U_z ýandyryjy naprýaženiýanyň Pd bagly ösmegi erkin ýoluň gysgalmagy sebäpli döreýär.

$Pd < (Pd)_0$ şerte seredeliň. Basyş pes bolanda ($d = const$) togy geçiriji elektronlaryň, ionlaryň we neýtral molekulalaryň sany az. Netijede, çaknyşmalaryň ähtimallygy-da az bolýar. Özbaşdak zarýadsyzlanmanyň bolmagy üçin yokary U_z gerek bolýar.

20.3. Özbaşdak gaz zarýadsyzlanmasynyň görnüşleri

Gazyň basyşyna, elektrodlaryň görnüşine we daşky zynjyryň parametrlerine baglylykda özbaşdak gaz zarýadsyzlanmasy birnäçe görnüşe bölünýär. Olara **köreýän, täçli, dugaly, uçgunly** gaz zarýadsyzlanmalary we beýlekiler degişlidir.



20.3-nji çyzgy

Köreýän zarýadsyzlanma pes basyşly (birnäçe kilopaskal ýa-da ondanda pes) gazlardaky özbaşdak zarýadsyzlanmanyň durnukly görnüşleriniň biridir. 20.3-nji çyzgyda köreýän zarýadsyzlanmaly trubka we onuň l oky boýunça φ potensialynyň paýlanyşy görkezilendir. Köreýän şöhlelenmäniň esasy bölekleri: katodyň garaňky giňişligi (I bölek), köreýän ýagtylanma bölegi (II bölek), Faradeýiň garaňky giňişligi (III bölek) we položitel sütün (IV bölek).

I bölekde potensial örän tiz üýtgeýär. Ol ýokary güýjenmeli elektrik meýdanyny döredýär. Bu bolsa položitel ionlaryň ýeterlik tizlenmegini, olaryň katoddan elektronlary çykarmagyny we çykan elektronlaryň ionlaşdyryş prosesine gatnaşyp biler ýaly tizlenmesini üpjün edýär. Bu bölekde şöhlelenme bolmaýar. Ol köreýän zarýadsyzlanmanyň amala aşmagy üçin esasy şertleri döredýän bölekdir.

Tizlendiriji meýdanda elektronlar belli bir aralygy geçenden soň olaryň neýtral molekulalar bilen çaknyşmasy molekulalary oýandyrylan ýagdaýa getirýär ýa-da ionlaşdyrýar. Bu proseslere degişli aralykdan başlap (II bölek), gaz şöhle saçyp başlaýar, ýagny köreýän ýagtylyk goýberýär. Bu iki bölegiň galyňlygy örän kiçidir. Katodyň üstünde hem köreýän şöhleli ýukajyk gatlak görünýän halatlary bardyr.

Örän kiçi toklarda (10^{-5} amperden kiçi) we pes basyşlarda ýüze çykýan we tok köpelende köreýän görnüşe geçýän gaz zarýady hem bardyr. Oňa **taunsend zarýadsyzlanmasy** ýa-da **garaňky zarýadsyzlanma** diýilýär.

Tok geçýän gazda zarýadyň göwrüm dykyzlygy örän pesdir we elektrik meýdanyna özgerdiji täsiri azdyr. Gaz sütüninden tok geçmesi syrgyn ýaly tok geçiriji bölekleriň köpelmegi bilen düşündirilýär. Elektrodlarda bolsa ikinji elektron emissiýasy we rekombinasiýa hadysalary bolup geçýär. Tok güýji köpelende taunsend zarýadsyzlanmasy köreýän zarýadsyzlanma öwrülýär.

Gazly göwrümiň III böleginde ionlaşma netijesinde dörän ilkinji elektronlar tapgyry täzeden tizlendirilýär we şöhlelenme kesilýär. Bu bölege **Faradeýiň garaňky giňişligi** diýilýär. Soňra položitel sütün diýip atlandyrylýan şöhlelenýän IV bölek başlanýar. Käbir halatlarda položitel sütün bölek-bölek şöhlelenýän stratlara bölünýär. Katod bilen anod golaýlaşdyrylanda katodyň golaýyndaky prosesler üýtgemeýär we köreýän şöhleli ýukajyk gatlagyň görnüşi üýtgemän galýar. Eger anody katoda golaýlaşdyryp ony katodyň garaňky giňişligine çenli ýetirseň, onda katoddan urlup çykarylýan elektronlar molekulalar bilen çaknyşman diýen ýaly anoda barýarlar. Şeýle elektron akymyna **katod şöhlelenmesi** diýilýär.

Köreýän zarýadsyzlanma gaz şöhlelenmeli trubkalarda, gündiz ýagtylykly çyralarda, elektron we ion desselerini almak üçin ulanylýar. Köreýän gaz zarýadsyzlanmasy mahaly položitel ionlaryň urulmasy sebäpli katoddan örän ownujak metal bölejikler uçup giňişlige ýaýraýar. Bu mikrobölejikleri peýdalanyp, dürli jisimleriň üstüne ýuka metal gatlagy çaýylýar.

Täçli zarýadsyzlanma. Kadaly basyşly gazda geçirijileriň ýiti uçlarynda güýçli birhilli däl elektrik meýdanynyň täsiri bilen, täçli zarýadsyzlanma diýilýän şöhlelenme ýüze çykýar. Naprýaženiýe ulalanda bu zarýadsyzlanma uçgunly ýa-da dugaly zarýadsyzlanma geçýär. Täçli zarýadsyzlanmada molekulalaryň oýandyrylmasy we ionlaşmasy elektrodlaryň arasyndaky giňişligiň hemme ýerinde geçmeýär. Ol diňe kiçi egrilik radiusly, ýagny meýdanyň naprýaženiýesiniň böwsülme naprýaženiýesine deň bolýan ýerinde ýüze çykýar.

Täçli şöhlelenme emele getirýän elektrodyň alamatyna baglylykda otrisatel täç we položitel täç diýlip atlandyrylýar. Otrisatel täç şertinde položitel ionlaryň katoda täsiri bilen katoddan elektronlar bölünip çýkýar. Elektronlar gaz molekulalarynyň urgy ionlaşmasyny döredýär. Položitel täç ýüze çykanda gazyň ionlaşmasy anodyň golaýynda bolup geçýär.

Tebigy şertlerde atmosferada elektrikleşmäniň täsiri bilen täçli şöhlelenme maçtalaryň, agaçlaryň depesinde ýüze çykyp bilýär. Täçli zarýadsyzlanma ýokary woltly elektrik geçiriji simleriň töwereginde ýüze çykyp, toguň ýitgisini döredip bilýär. Ony ýok etmek üçin ýokary woltly elektrik geçirijileriň simleri ýogyn görnüşde alynýar. Täçli şöhlelenme üýtgeýän häsiýete eýe bolany üçin radio päsgelçilik hem döredip bilýär.

Täçli zarýadsyzlanma gazlary garyndylardan arassalaýan elektrik filtrlerinde ulanylýar. Arassalanýan gaz okunda täç döredijі elektrod ýerleşen turba boýunça goýberilýär. Täjiň daşynda emele gelýän köp mukdardaky otrisatel ionlar gazy hapalaýan bölejiklere çökýärler we olary özi bilen täç döretmeýän položitel elektroda düşürýärler. Bu elektroda düşen bölejikler neýtrallaşýarlar we elektrodda çöküp galýarlar. Wagtal-wagtal turba urgy etmek bilen çökündiler ýörite gaba gaçyrylýar.

Uçgunly zarýadsyzlanma. Elektrodlaryň arasyndaky naprýaženiýe has ýokary baha eýe bolanda ($\approx 3 \cdot 10^6$ W/m) täçli zarýadsyzlanma uçgunly zarýadsyzlanma öwrülýär. Uçgunly zarýadsyzlanma durnukly däl özbaşdak gaz zarýadsyzlamasydyr. Onda egri-bugry sapak şekilli ýagty kanallar emele gelýär. Olar iki elektrodyň aralygyna doly ýaýran görnüşde bolýar we ýitip hem-de täzeden emele gelip durýarlar.

Uçgun kanalyndaky lemmerlenen elektronlar we ionlar temperaturanyň 10000°C çenli, basyşyň ýüzlerçe atmosfera çenli köpelmegine getirýär. Bu ýagdaýyň bolmagynyň sebäbi uçgun gazly giňişligi doly eýeleýär. Elektrodlar geçiriji bilen birikdirilen ýaly ýagdaý döreýär. Zynjyrda naprýaženiýanyň başgaça paýlanmasy ýüze çykýar. Elektrodlardaky potensiallaryň tapawudy has peselýär we zarýadsyzlanma kesilýär. Soňra elektrodlaryň arasyndaky potensiallaryň tapawudy başdaky ýagdaýyna gelýär we uçgunly zarýadsyzlanma täzeden başlanýar.

Ýyldyrym – bulut bilen buludyň, Ýer bilen buludyň arasynda, atmosferada bolýan äpet uçgunly zarýadsyzlanmadyr.

Uçgunly zarýadsyzlanma tehnikada giňden ulanylýar. Ol metallary elektrik uçgunly işläp bejermäniň esasy bolup durýar. Karbýuratorly içinden ýandyrylýan hereketlendirijilerde ýanyjy garyndyny otlamak üçin ulanylýar. Uçgunly zarýadsyzlanma spektroskopiýada örän uly potensiallaryň tapawudyny ölçemekde ulanylýar.

Tok çeşmesiniň kuwwaty ýeterlik derejede ýokary bolanda we gyzmanyň netijesinde katoddan örän köp mukdarda elektronlar bölünip çykanda uçgunly zarýadsyzlanma **elektrik dugasyna** öwrülýar.

Iki kömür steržen biri-birine degrilse we olaryň üstünden tok goýberilse, diňe sterž後enleriň biri-birine degýän uçlary gyzyp gyzarýar. Steržženleriň beýleki ýerleri gyzarmaýar. Bu hadysanyň sebäbi kömür steržženleriň galtaşýan ýerinde kontaktyň ýaramaz bolup, garşylygyň uly bolmagydyr. Yzygiderli zynjyrda bolsa garşylygyň köp ýerinde köp ýylylyk bölünip çykýar. Kömrüň ýylylyk geçirijiligi ýaramaz bolany üçin gyzgyn uçlardan kömrüň hemme göwrümine ýylylyk ýaýramaýar. Kömür steržženler biri-birinden daşlaşdyrylsa olaryň uçlarynyň arasynda elektrik dugasy (dugaly zarýadsyzlanma) ýüze çykýar. Örän gyzgyn katod tarapyndan termoelektronlaryň depginli goýberilmegi duga zarýadsyzlanmasynyň esasy sebäbidir.

Duga zarýadsyzlanmasy ýagtylyk çeşmesi hökmünde prožektorlarda we proýeksion apparatlarda ulanylýar. Ýokary temperaturaly duga zarýadsyzlanmasy peýdalanylyp duga peçleri ýasalýar. Ol peçler metallary eretmekde, kalsiý karbidini, azotyň oksidini almakda we ş.m. ulanylýar. Duga zarýadsyzlanmasy metallary kesmekde we seplemekde giňden ulanylýar.

20.4. Plazma barada düşünje

Položitel we otrisatel zarýadlaryň dykyzlyklary (ρ_+, ρ_-) deň (ýa-da golaý), güýçli ionlaşan gaza **plazma** diýilýär:

$$\rho_+ + \rho_- = 0.$$

Ionlaryň ýylylyk hereketleri zerarly plazmanyň dürli uçastoklarynda zarýadlaryň pursatlaýyn dykyzlyklary käbir ortaça bahanyň töwereginde üýtgäp durýar. Eger-de ionlaşan gazyň V göwrümi şol üýtgemeleriň bolup geçäýjek göwrümlerinden has uly bolsa, onda plazma kwazineýtral diýilýär:

$$V >> D^3,$$

bu ýerde D – zarýadlaryň dykyzlyklarynyň jeminiň (ρ_+, ρ_-) tötänden üýtgäp biljek göwrümini häsiýetlendirýän ululyk. Oňa Debaýyň ekranlaşdyrma radiusy diýilýär. Ýagny D aralykda plazmanyň islendik zarýadynyň meýdany ekranlanýar.

Plazmadaky ionlaşan atomlaryň sanynyň ähli atomlaryň sanyna gatnaşygyna (α) plazmanyň ionlaşma derejesi diýilýär. Ionlaşma derejesiniň ululygyna görä plazma üç topara bölünýär:

1. Gowşak ionlaşan plazma ($\alpha \leq 1\%$).
2. Aram ionlaşan plazma ($\alpha > 1\%$).
3. Doly ionlaşan plazma ($\alpha \approx 100\%$).

Belläp geçişimiz ýaly, gazlaryň ionlaşmasy temperaturanyň ýokarlanmagy sebäpli tizlendirilen zarýadly bölejikleriň urgusy zerarly we elektromagnit şöhleleriň täsiri bilen bolup geçýär.

Plazmanyň düzümindäki neýtral atomlaryň, ionlaryň we elektronlaryň ýylylyk hereketleri dürlüdir. Şeýle plazmany belli bir temperatura arkaly häsiýetlendirip bolmaz. Şonuň üçin hem termodinamiki deňleşiksiz plazma izotermik däldir. Ondaky bölejikleriň her bir görnüşini, takmynan deňleşikde hasaplap, olaryň ortaça temperaturasyny görkezip bolar. Mysal üçin, elektronlara we ionlara degişli temperaturalar (T_E, T_i) bolsun. Ionlara degişli temperaturanyň bahasyna görä pes temperaturaly ($T_i < 10^5\,K$) we ýokary temperaturaly $T_i > 10^7\,K$ plazmalaryň arasynda tapawut goýulýar.

Plazmanyň adaty gazlardan düýpli tapawudy bardyr. Şoňa görä-de plazma maddanyň aýratyn dördünji haly diýilýär. Plazma daşky elektrik we magnit meýdanlary bilen güýçli täsirleşýär. Ondaky zarýadly bölejikleriň arasynda jübütleýin täsirlenme däl-de, eýsem, olaryň öz döredýän ortaça elektrik we magnit meýdanlary arkaly, umumylaşdyrylan (kollektiwleýin) täsirlenme bardyr. Netijede, plazma özüni özboluşly maýyşgak sreda ýaly alyp barýar we onda dürli görnüşli yrgyldylar we tolkunlar döräp hem-de ýaýrap bilýär. Mysal üçin, plazmadaky elektronlaryň giňişlikde paýlanyşy (ýerleşişi) tötänlikde üýtgese, plazmada kwazimaýyşgak güýçler döräp, elektronlar erkin yrgyldap başlaýar. Bu yrgyldylaryň aýlaw ýygylygy:

$$\omega = e\sqrt{\frac{n_0}{m\varepsilon_0}}. \tag{20.1}$$

Bu ýygylyga **plazmadaky lengmýur ýygylyk** diýilýär.

Doly ionlaşan plazmanyň udel geçirijiligi temperatura baglydyr ($\gamma \sim T^{3/2}$), emma plazmanyň dykyzlygyna bagly däldir.

Plazmany öwrenmek uly ähmiýete eýedir. Plazmada bolup geçýän prosesleri öwrenmek Günüň we ýyldyzlaryň, Ýeriň töweregindäki ionosferanyň, dolandyrylýan termoýadro reaksiýasynyň, fizikasynyň köp meselelerini çözmäge mümkinçilik berýär. Şeýle-de jemgyýetiň bähbitleri üçin täze tehnologiýalary açmakda bu gözlegler örän möhüm roly oýnaýar. Mysal üçin, uly tizlik bilen hereket edýän plazma magnit meýdany arkaly täsir edip, otrisatel we položitel zarýadlary iki tarapda ýerleşen elektrodlara düşürip, potensiallaryň tapawudyny alyp bolýar. Şeýle usulda işleýän gurluşa magnitogidrodinamik generator (MGD) diýilýär.

XXI BAP. MAGNIT MEÝDANY

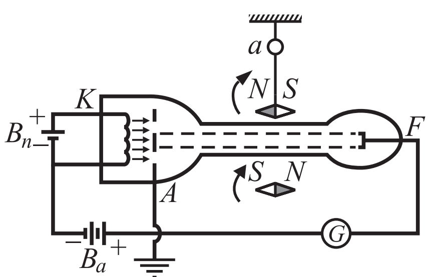
21.1. Magnit meýdany we onuň häsiýetnamalary

Tebigatda magnit meýdanynyň barlygy gadym zamanlardan bäri belli bolupdyr. Ýeňil aýlanyp bilýän magnitli jisimlere gönükdiriji güýjüň täsir edýändigi bilinenden soň Ýeriň magnit meýdanynyň bardygy belli bolupdyr. Şu esasda kompas ýasalyp, olar Ýer üstüniň we ummanlaryň kartalaryny düzmek üçin we ol kartalardan peýdalanmak üçin ulanylypdyr.

Magnit meýdanyny yzygiderli we düýpli öwrenmek 1820-nji ýylda daniýaly fizik Ersted tarapyndan elektrik we magnit hadysalarynyň baglanyşygy açylandan soň başlanýar. Ersted tejribelerde tokly geçirijiniň magnit strelkasyna aýlandyryjy güýç bilen täsir edýändiginiň üstüni açdy. Toguň ugry üýtgedilende kompasyň strelkasynyň aýlanma ugry-da üýtgeýär. Dürli formaly geçirijileri ulanyp, soňraky geçirilen tejribeler tokly simiň töwereginde magnit meýdanyň döreýändigini we şol meýdanda ýerleşen magnit strelkasyna täsir edýändigini tassyklady.

Şol ýyllarda Amper tokly geçirijä magnit meýdanynyň güýç bilen täsir edýändigini kesgitledi. Soňra iki tokly geçirijiniň biri-birine güýç bilen täsir edýändiginiň üsti açyldy.

Tokly geçirijileriň täsirleşmesi hemişelik magnitleriň täsirleşmesi ýaly magnit meýdanynyň üsti bilen amala aşyrylýar. Magnit meýdanyny toklar, ýagny zarýadly bölejikleriň hereketi döredýär. Hemişelik magnitleriň magnit meýdanyny döredilişi hem maddalarda "molekulýar toklar" diýip atlandyrylýan zarýadly bölekleriň hereketiniň barlygy bilen düşündirilýär. Hereketli elektronlaryň magnit meýdanynyň magnit strelkasyna täsirini 1911-nji ýylda A. F. Ioffe gös-göni ölçemegi başardy. Elektron-wakuum turbajykda inçejik elektron şöhle alyp (*21.1-nji çyzgy*), onuň golaýynda iki sany biri-birine ters ugurdaş berkidilen magnit strelkalary ýerleşdirilen. Şeýle jübüt strelkalara Ýeriň magnit meýdany täsir etmeýär (oňa astatik sistema diýilýär).



21.1-nji çyzgy

G – galwanometr geçýän elektronlaryň mukdaryny kesgitleýär, *a* – aýnajykdan serpigýän ýagtylygyň süýşmesi bolsa strelkanyň aýlanma burçuny ölçemäge mümkinçilik berýär. Elektron şöhleli turbajygy göni sime çalşyp we ondan şol bir togy geçirip, strelkalaryň aýlanma burçunyň deňdigini Ioffe belläp geçýär. Magnit meýdanynyň döremegi elektrik togunyň tebigatyna bagly däldir. 1901-nji ýylda A.A. Eýhenwald konweksion toklaryň-da (zarýadlanan makroskopik jisimleriň hereketiniň netijesinde döreýän tok) magnit meýdanyny döredýändigini tejribe arkaly subut etdi.

Bu tejribeleriň esasynda şeýle netije alynýar. Islendik zarýad hereket edende töwereginde magnit meýdanyny döredýär. Eger hereketsiz zarýadlar özara diňe elektrik meýdany arkaly täsirleşýän bolsalar, biri-birine görä hereketdäki zarýadlar elektrik hem-de magnit meýdanlary arkaly täsirleşýärler. Başgaça aýdylanda, magnit meýdanynda hereket edýän zarýadly bölejige täsir edýän güýç döreýär.

Elektrik meýdanynyň güýjenmesi meýdanyň berlen nokadynda ýerleşdirilen birlik, nokatlanç položitel synag zarýada täsir edýän güýç bilen kesgitlenýär. Magnit meýdany üçin synag zarýady tok geçýän göni geçirijiniň kesimi bilen çalşyrylýar. Magnit meýdanynyň bu indikatoryna **tok elementi** diýilýär. Ol wektor ululykdyr we onuň ugry toguň ugry bilen gabat gelýär. Ululygy bolsa I tok güýjüniň geçirijiniň L uzynlygyna köpeltmek hasylyna deňdir.

Köp sanly tejribeleriň netijeleri öwrenilip, aşakdaky kanunalaýyklyklar kesgitlenendir:

1) magnit meýdanynyň käbir nokadynda ýerleşdirilen tok elementine täsir edýän F güýç bu elementiň ululygyna proporsionaldyr: $F \sim IL$;

2) bu güýjüň ugry hemişe tok elementine perpendikulýardyr;

3) F güýç tok elementiniň magnit meýdanynyň giňişliginde ornaşyşyna baglydyr. Magnit meýdanynyň her nokadynda F güýjüň nola deň bolýan iki sany ugry bardyr. Tok elementi şol ugurlardan 90° gyşardylanda, oňa magnit meýdany tarapyndan täsir edýän güýç iň uly baha eýe bolýar;

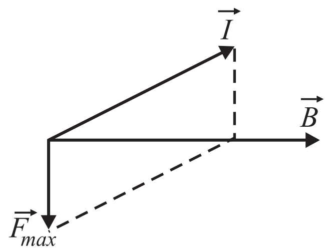
4) tok elementine täsir edýän iň uly güýjüň ($F_{\max}$) elementiň ululygyna (IL) bolan gatnaşygy meýdanyň berlen nokady üçin hemişelikdir:

$$\frac{F_{\max}}{IL} = const.$$

Bu gatnaşyk diňe berlen nokatdaky magnit meýdanynyň häsiýetleri bilen kesgitlenýär. Bu gatnaşyga magnit **induksiýasy** diýilýär we B harpy bilen bellenýär.

Magnit induksiýasy berlen nokatdaky magnit meýdanyny häsiýetlendirýän wektor ululykdyr we synag tok elementine täsir edýän güýjüň onuň ululygyna bolan gatnaşygy bilen kesgitlenilýär:

$$B = \frac{F_{\max}}{IL}. \qquad (21.1)$$



21.2-nji çyzgy

Bu ululyk wektor görnüşinde $(\vec{B})$ bolanda, oňa **magnit induksiýasynyň wektory** diýilýär. Magnit induksiýasynyň wektory tok elementiniň $\vec{I}L$ wektoryna we oňa täsir edýän iň uly güýjüň $\vec{F}_{\max}$ wektoryna perpendikulýardyr. $\vec{B}$ wektoryň depesinden seredilende $\vec{F}_{\max}$ wektoryň $\vec{I}L$ wektoryň üstüne düşmegi üçin ýakyn tarapa aýlanmasy sagat diliniň tersine ugrukdyrylandyr (*21.2-nji çyzgy*).

HS-de magnit induksiýasynyň ölçeg birligi: tesla (Tl). Birhilli magnit meýdanynda ýerleşen $1A$ tok geçýän geçirijiniň 1 metrine $1N$ iň uly güýç bilen täsir edýän magnit meýdanynyň induksiýasy 1 tesladyr:

$$1Tl = \frac{1N}{1A \cdot 1m}.$$

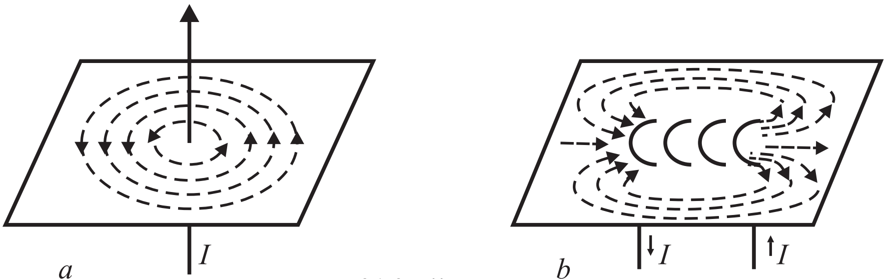
Eger tok elementi magnit induksiýasynyň wektoryna perpendikulýar bolman, onuň bilen α burç emele getirýän bolsa, onda ol elemente täsir edýän güýç

$$F = F_{\max}\sin\alpha. \qquad (21.2)$$

Öň belläp geçişimiz ýaly, ähli maddalarda elektronlaryň atomlardaky we molekulalardaky hereketi bilen baglanyşykly mikroskopik toklar bardyr. Ol toklar öz magnit meýdanlaryny döredip bilýär we olar makrotoklaryň magnit meýdanyna öwrülip bilýärler. $\vec{B}$ magnit meýdanynyň induksiýasynyň wektory mikro- we makrotoklaryň döredýän netijeleýji magnit meýdanyny häsiýetlendirýär. Magnit meýdanynyň güýjenmesiniň $\vec{H}$ wektory diýilýän ululyk diňe makrotoklaryň meýdanyny häsiýetlendirýär. Olaryň arasynda $\vec{B} = \mu_0\mu\vec{H}$ baglanyşyk bardyr. Bu ýerde μ_0 – magnit hemişeligi, μ – sredanyň magnit syzyjylygy. $\mu_0\mu$ ululyk magnit induksiýasynyň H güýjenmeden näçe esse uludygyny görkezýär. $\vec{H}$ güýjenme wektory elektrik meýdanyndaky $\vec{D}$ süýşme wektoryna meňzeş ululykdyr. Magnit meýdanynyň güýjenmesiniň birligi: A/m. $1A/m$ – wakuumda magnit induksiýasy $4 \cdot 10^{-7}Tl$ bolan magnit meýdanynyň güýjenmesidir.

Magnit induksiýasy teslametrleriň kömegi bilen ölçenilýär. Olaryň işleýşi käbir materiallaryň garşylygynyň magnit meýdanynda üýtgeýşine, Holluň effektine (şu bapda seredilер) esaslanandyr.

Magnit meýdanynyň ähli nokatlarynda magnit induksiýasynyň wektory ugry hem-de ululygy boýunça birmeňzeş bolsa, ol meýdana birhilli meýdan diýilýär. Magnit meýdany wagtyň geçmegi bilen üýtgemeýän bolsa, oňa **stasionar** (üýtgemeýän) **meýdan** diýilýär. Stasionar meýdany **magnit induksiýasynyň çyzyklary** arkaly sypatlandyryp bolýar. Giňişligiň islendik nokadynda galtaşmasy $\vec{B}$ wektoryň ugruna gabat geler ýaly geçirilen çyzyklara magnit induksiýasynyň çyzyklary ýa-da magnit **meýdanynyň güýç çyzyklary** diýilýär. Magnit meýdanyň güýç çyzyklarynyň suduryny, tokly geçirijiniň kesip geçýän tekizliginde maýdajyk iňňe kysmy demir ýonuşgalary ýerleşdirip öwrenmek bolýar (*21.3-nji çyzgy*). Ýonuşgalar magnitlenip, uzyn ugry boýunça güýç çyzyklarynyň ugruna öwrülýärler we tokly simi gurşap alýan halkalary emele getirýärler. Güýç çyzyklarynyň ugry burawjygyň düzgüni bilen kesgitlenýär. Eger göni geçirijide (*21.3-nji a çyzgy*) akýan toguň ugruna burawjyk öňe süýşer ýaly, onuň tutawajyny aýlasak, onda şol aýlanma ugry güýç çyzyklaryň ugry bilen gabat geler. Tegek görnüşdäki sim sarymlaryndan tok geçende, burawjygyň tutawajyny toguň akyş ugruna ugurdaş aýlasak, onda burawjygyň süýşýän tarapy tegegiň içindäki güýç çyzyklarynyň ugruny



21.3-nji çyzgy

görkezer (*21.3-nji b çyzgy*). Magnitlenen jisimleriň iki magnit polýuslary bolup, güýç çyzyklary elmydama bir polýusdan çykyp beýlekesinde ýygnanýandyr. Güýç çyzyklary hiç ýerde üzülmeýän ýapyk halkalar görnüşindedir. Magnitlenen jisimi näçe bölege bölseň-de, her bir bölek ýene-de iki polýusly bolýar. Şeýlelikde magnit meýdanyny döredýän magnit "zarýadlarynyň" ýokdugy, ony diňe elektrik togunyň döredip bilýändigi barada düşünje ýüze çykýar. Bu barada 1821–1822-nji ýyllarda fransuz fizigi A. Amper ilkinji çaklamany öňe sürdi. Onuň pikiriçe, hemişelik magnitleriň magnit häsiýetlerini jisimiň içindäki mikrotoklaryň barlygy bilen düşündirmek mümkin. Emma onuň tebigaty has soň atomlaryň we molekulalaryň düzüminde elektronlaryň hereket edýändigi anyklanylandan soň mälim boldy.

21.2. Bio-Sawar-Laplasyň kanuny

Islendik elektrik togunyň magnit meýdanyny döredýändigini tejribe arkaly G. Ersted subut edenden soň, bu ugurdaky gözleg işleri has-da güýçlendi. 1820-nji ýylda fransuz alymlary Ž. Bio we F. Sawar dürli görnüşdäki simlerden tok geçirip, döreýän magnit meýdanyň tok güýjüne, simiň formasyna we barlanýan nokadyň oňa görä ýerleşişine baglydygyny aýdyňlaşdyrdylar. Şeýlelikde, simiň islendik tok elementiniň döredýän magnit meýdany ölçelýän nokada çenli aralyga ters proporsionaldygy, toguň güýjüne bolsa göni proporsionaldygy mälim boldy. Tejribeleri jemläp, bir umumy kanunalaýyklygy tapmaga fransuz matematigi hem-de fizigi P.Laplas hem girişdi we wajyp çözgüt tapdy. P. Laplas magnit induksiýasynyň wektor häsiýetlidigi, onuň superpozisiýa prinsipine eýerýändigi barada çaklamany öňe sürdi. Şuňa laýyklykda, her bir tok elementiniň döredýän meýdanynyň täsiri özge meýdanlara bagly däldir, ýagny islendik nokatda ähli tok elementleriniň döredýän meýdanlarynyň jemleýji magnit induksiýasy şeýle kesgitlenilýär:

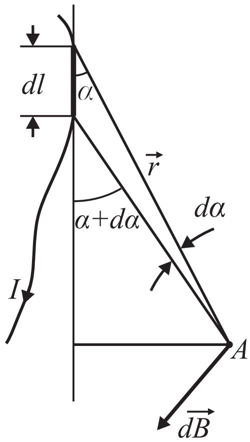
$$\vec{B} = \int\limits_{(l)} d\vec{B}, \tag{21.3}$$

bu ýerde $d\vec{B}$ – tokly simiň tükeniksiz kiçi dl elementiniň döredýän magnit induksiýasy, integral bolsa tokly simiň tutuş boýuna alynýar.

Hemişelik tokly simiň islendik dl elementiniň (giňişlikdäki orny $\vec{r}$ radius-wektor bilen kesgitlenýän), derňelýän A nokatdaky (*21.4-nji çyzgy*) **magnit induksiýasy Bio-Sawar-Laplasyň kanuny** bilen hasaplanýar:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi} \frac{1}{r^3} [d\vec{l}, \vec{r}]. \tag{21.4}$$

Bu ýerde $d\vec{l} = dl\frac{\vec{j}}{j}$, ýagny toguň dykyzlygynyň wektory bilen ugurdaş uzynlyk elementi, μ – magnit meýdany döredilýän sredanyň magnit syzyjylygy (şu bapda seredilер), $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Gn/m – magnit hemişeligi, $\vec{r}$ – geçirijiniň dl elementinden derňelýän nokada geçirilen radius-wektor. A nokatdaky $d\vec{B}$ wektoryň ugry burawjygyň düzgüni bilen kesgitlenýär.



21.4-nji çyzgy

21.4-nji çyzgydaky tokly sime seredeliň. Onuň islendik dl elementiniň A nokatda döredýän meýdanynyň magnit induksiýasyny kesgitlemek üçin alarys:

$$|[d\vec{l}, \vec{r}]| = dlr\sin\alpha = r^2 d\alpha,$$

$$|dB| = \frac{\mu_0 \mu I d\alpha}{4\pi r}, \tag{21.5}$$

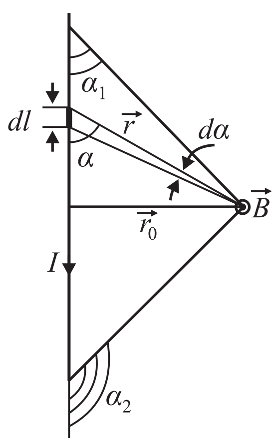
bu ýerde $d\alpha$ – geçirijiniň dl elementiniň A nokatdan görünýän burçy.

Bio-Sawar-Laplasyň kanunyny dürli görnüşdäki tokly geçirijileriň magnit meýdanyny hasaplamak üçin ulanyp bolýar.

1. Tokly göni geçirijiniň magnit meýdany

Goý, dikligine geçýän göni geçirijiden I tok akýan bolsun (*21.5-nji çyzgy*). Öwrenilýän nokada geçirijiniň uçlaryndan radius-wektorlar geçirsek, olar toguň ugry bilen α_1 we α_2 burçlary emele getirer. Ol nokadyň geçirijä iň golaý aralygyny r_0 diýip belläliň. Islendik dl element üçin Bio-Sawar-Laplasyň kanunyny şeýle ýazyp bileris:

$$dB = \frac{\mu_0 \mu I d\alpha}{4\pi r}. \tag{21.6}$$



21.5-nji çyzgy

Çyzgydan görnüşi ýaly $r = \frac{r_0}{\sin\alpha}$. Şeýlelikde,

$$B = \int_{(\alpha_1)}^{(\alpha_2)} \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi r_0} \sin\alpha d\alpha = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi r_0} (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2).$$

Eger geçiriji tükeniksiz uzyn ($r >> r_0$) bolsa, onda $\alpha_1 \simeq 0$, $\alpha_2 \simeq \pi$ ýa-da

$$B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2I}{r_0}. \tag{21.7}$$

Bu aňlatma tükeniksiz uzyn, göni tokly geçirijiniň wakuumda döredýän magnit induksiýasyny hasaplamak üçin formuladyr.

2. Tokly tegelek halkanyň merkezindäki magnit meýdany

Tegelek halkanyň merkezinde geçirijiniň ähli elementleriniň täsiri meňzeşdir:

$$dB = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi R} d\alpha; \quad 0 \le \alpha \le 2\pi; \quad B = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi R}\int_0^{2\pi} d\alpha = \frac{\mu_0 \mu I}{2R}.$$

Diýmek, tegelek tokly geçirijiniň merkezinde döreýän magnit induksiýasynyň formulasy:

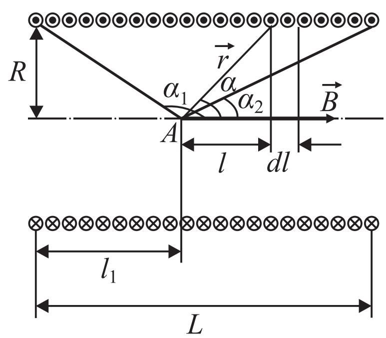
$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{2R}. \tag{21.8}$$

3. Solenoidiň magnit meýdany

Solenoid (latynça – turba kysmy) diýip geçirijiniň köp sanly sarymy jebis ýerleşdirilen silindrik tegege aýdylýar (*21.6-njy çyzgy*). Çyzgydan görnüşi ýaly:

$$r = \frac{R}{\sin\alpha}; \qquad l = \frac{R}{\mathrm{tg}\alpha}; \qquad dl = \frac{R d\alpha}{\sin^2\alpha}.$$

Berlen nokatda solenoidiň döredýän $\vec{B}$ magnit induksiýasy solenoidiň sargylarynyň döredýän $\vec{B}_i$ magnit induksiýalarynyň geometrik jemine deňdir. Solenoidiň okunda ýerleşen A nokatda döreýän $\vec{B}$ magnit induksiýasy burawjygyň düzgüni boýunça saga gönükdirilendir (*21.6-njy çyzgy*). Solenoidiň okunyň uzynlygy boýunça dl uçastogyna ndl sargy düşýär. $n = N/l$ – sargylaryň gürlügi, N – sargylaryň sany.



21.6-njy çyzgy

Onda

$$dB = -\frac{\mu_0 \mu}{2} nI \sin\alpha d\alpha$$

ýa-da

$$dB = \frac{\mu_0 \mu}{2} nI d(\cos\alpha).$$

Solenoidiň içki çäklerinde radius-wektoryň tegegiň oky bilen döredýän burçy α_1-den α_2-ä çenli üýtgeýär:

$$B = \frac{1}{2}\mu_0 \mu n I(\cos\alpha_2 - \cos\alpha_1),$$

$$\cos\alpha_1 = -\frac{l_1}{\sqrt{R^2 + l_1^2}}; \qquad \cos\alpha_2 = \frac{L - l_1}{\sqrt{R^2 + (L - l_1)^2}}.$$

Eger tegek tükeniksiz uzyn bolsa, onda sag tarapky esasda ýatýan nokat üçin $\alpha_1 = \pi$, $\alpha_2 = \frac{\pi}{2}$, ýagny

$$B = \frac{1}{2}\mu_0 \mu n I. \tag{21.9}$$

Solenoidiň ortasynda $\alpha_1 = \pi$, $\alpha_2 = 0$ bolar.
Onda

$$B = \mu_0 \mu n I \tag{21.10}$$

formulany alarys.

Tegegiň sarymlarynyň doly sany $N = nl$ bolýandygyny hasaba alsak, solenoidiň magnit momentini şeýle aňladyp bileris:

$$\vec{P}_m = NI\vec{S} = nlI\vec{S} = \pi R^2 nlI\vec{n}$$

ýa-da $P_m = nIV$, V – solenoidiň göwrümi.

21.3. Amperiň kanuny. Parallel tokly geçirijileriň özara täsiri

Magnit meýdanynyň tok elementine güýjüň täsir edýändigini babyň başynda belläp geçipdik we ol güýjüň iň uly bahasyndan peýdalanyp, magnit induksiýasy barada düşünje girizipdik. Dürli tokly geçirijilere magnit meýdanynyň edýän täsirini öwrenip, Amper magnit induksiýasyny, tok güýjüni we geçirijiniň uzynlygyny baglanyşdyrýan kanuny açdy.

Amperiň kanuny. Magnit meýdanynda ýerleşen tokly geçirijiniň dl elementine magnit meýdany tarapyndan täsir edýän $d\vec{F}$ güýç geçirijidäki I tok güýjüne we geçirijiniň uzynlygynyň $d\vec{l}$ elementi bilen $\vec{B}$ magnit induksiýasynyň wektor köpeltmek hasabyna göni proporsionaldyr:

$$d\vec{F} = I[d\vec{l}, \vec{B}]. \tag{21.11}$$

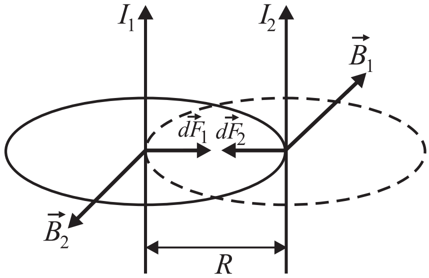
$d\vec{F}$ güýjüň ugry **çep eliň düzgüni** bilen kesgitlenýär: çep eliň dört barmagy tok güýjüniň ugry bilen ugurdaş bolar ýaly, eliň aýasyna bolsa magnit induksiýasynyň wektory düşer ýaly ýerleşdirilse, gaňtarylan başam barmak toga täsir edýän güýjüň ugruny görkezer.

Amperiň güýjüniň moduly aşakdaky formula bilen hasaplanylýar:

$$F = IBdl\sin\alpha, \tag{21.12}$$

bu ýerde α – $\vec{B}$ we $d\vec{l}$ wektorlaryň arasyndaky burç.

Amperiň kanuny tokly geçirijileriň özara täsirini hasaplamaga hem mümkinçilik berýär. Tükeniksiz uzyn iki parallel tokly geçirijileriň (simleriň) özara täsirine seredeliň (*21.7-nji çyzgy*).



21.7-nji çyzgy

Birinji simden geçýän toguň ikinji tokly simiň ýerleşen ýerinde döredýän magnit induksiýasy şeýle kesgitlenilýär:

$$B_1 = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2I_1}{R}.$$

Onuň magnit meýdanynda ýerleşen ikinji tokly sime Amperiň güýji täsir eder:

$$dF_2 = I_2 B_1 dl = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2I_1 I_2}{R} dl, \qquad (21.13)$$

bu ýerde μ – sredanyň magnit syzyjylygy, R – simleriň arasyndaky uzaklyk.

Edil şonuň ýaly birinji simiň täsir edýän güýjüni-de tapyp bileris we güýçleriň deňdigini göreris. Çyzgydan görnüşi ýaly, toklar bir tarapa akanda simler dartyşýarlar, garşylykly taraplara akanda bolsa itekleşýärler.

Amperiň güýji elektrik energiýasyny mehanik energiýa öwürýän gurluşlarda, elektrik ölçeýji abzallarda ulanylýar.

21.4. Lorensiň güýji

Magnit meýdanynda hereket edýän zarýadly bölejige täsir edýän güýje **Lorens güýji** diýilýär we aşakdaky formula bilen aňladylýar:

$$\vec{F} = q[\vec{\upsilon}\vec{B}], \qquad (21.14)$$

bu ýerde B – magnit induksiýasy, υ – zarýadyň tizligi.

Lorensiň güýjüniň ugry çep eliň düzgüni bilen kesgitlenýär: çep eliň dört barmagy položitel zarýadyň $\vec{\upsilon}$ tizligine ugurdaş bolar ýaly, eliň aýasyna bolsa magnit meýdanynyň $\vec{B}$ wektory düşer ýaly ýerleşdirilse, gaňtarylan başam barmak zarýada täsir edýän $\vec{F}$ güýjüň ugruny görkezer.

Zarýad otrisatel bolsa güýjüň ugry garşylykly tarapa bolar.

Lorensiň güýjüniň modulynyň hasaplanyş formulasy aşakdaky ýaly kesgitlenilýär:

$$F = q\upsilon B\sin\alpha, \qquad (21.15)$$

bu ýerde α magnit induksiýasynyň $\vec{B}$ wektory bilen tizligiň $\vec{\upsilon}$ wektorynyň arasyndaky burç.

Lorensiň güýji zarýadly bölejigiň $\vec{\upsilon}$ tizligine perpendikulýar gönükdirilendir we bölejige normal tizlenme berýär. Bu ýagdaýda $\vec{F}$ güýç iş etmeýär, ol diňe traýektoriýanyň görnüşini üýtgedýär. Magnit meýdanynda hereket edýän zarýadly bölejigiň kinetik energiýasy üýtgemeýär.

Eger zarýada bir wagtda elektrik we magnit meýdanlary täsir edýän bolsa, onda täsir güýji

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{\upsilon}\vec{B}], \qquad (21.16)$$

bu ýerde $\vec{E}$ – elektrik meýdanynyň güýjenmesi. Bu güýje hem **Lorens güýji** diýilýär.

Zarýadly bölejigiň diňe birhilli magnit meýdanyndaky hereketine seredeliň.

Zarýadly bölejik $\vec{\upsilon}$ tizlik bilen magnit induksiýasynyň çyzyklarynyň ugruna hereket edýän bolsun (α burçy nola ýa-da π deň). Bu ýagdaý üçin Lorensiň güýji nola deň bolar, zarýadly bölejik deňölçegli gönüçyzykly hereket eder.

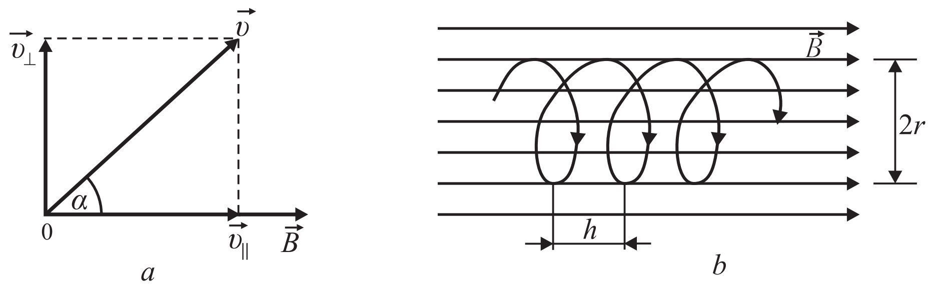
Zarýadly bölejik $\vec{\upsilon}$ tizlik bilen $\vec{B}$ wektora perpendikulýar hereket edýän bolsun: $\alpha = \pi/2$. Onda $F = q\upsilon B$ – moduly boýunça hemişelik we ugry boýunça bölejigiň traýerktoriýasyna normal bolar. Bölejik töwerek boýunça hereket eder. Töweregiň r radiusy

$$q\upsilon B = \frac{m\upsilon^2}{r}$$

şertiň kömegi bilen kesgitlener:

$$r = \frac{m\upsilon}{qB}. \qquad (21.17)$$

Zarýadly bölejigiň $\vec{\upsilon}$ tizligi $\vec{B}$ wektora α burç bilen gönükdirilen bolsun. Bu hereketi öwrenmek üçin $\vec{\upsilon}$ tizligi iki düzüjä – magnit meýdanyna ugurdaş $\upsilon_{\parallel} = \upsilon\cos\alpha$ we magnit meýdanyna perpendikulýar $\upsilon_{\perp} = \upsilon\sin\alpha$ düzüjilere dargadýarys (*21.8-nji çyzgy*).



21.8-nji çyzgy

Tizligiň iki düzüjisiniň täsiri bilen spiral boýunça hereket döreýär. Spiralyň oky magnit meýdanyna paralleldir.

Spiralyň aýlawynyň radiusy we ädimi aşakdaky aňlatmalar bilen hasaplanylýar:

$$r = \frac{m\upsilon\sin\alpha}{qB},$$

$$h = \frac{2\pi m\upsilon\cos\alpha}{qB}.$$

Hereketli zarýadly bölejikleriň magnit we elektrik meýdanlaryndaky hereketi elektron şöhle turbalarynda, zarýadly bölejikleri tizlendirijileriň güýçlendirijileriniň dürli görnüşlerinde amaly we ylmy-barlag maksatlary üçin ulanylýar.

Elektrik we magnit meýdanlarynyň zarýadly bölejiklere täsiri şol bölejikleriň örän kiçi zarýadyny kesgitlemekde uly ähmiýete eýedir. Şeýle abzallara masspektrometrler diýilýär. Olar ylmyň we tehnikanyň dürli pudaklarynda giňden ulanylýar.

Lorensiň güýji zarýadly bölejikleri tizlendirijilerde hem esasy güýçdür. Olar iki topara, ýagny gönimel tizlendirijilere we aýlawly tizlendirijilere bölünýärler.

Elektrostatik gönimel tizlendirijilerde zarýadly bölejikler belli bir potensiallar tapawudyny geçip, $W = q(\varphi_1 - \varphi_2)$ energiýany alýarlar. Şoňa görä-de olaryň tizlendirilişi örän çäklidir. Has ýokary energiýaly bölejikleri almak üçin, aşa ýokary ýygylykly üýtgeýän elektrik meýdanyny ulanýan, göni rezonansly tizlendirijileriň mümkinçiligi uludyr. Häzirki wagtda elektronlary 35 *GeW* ($35 \cdot 10^9$ *eW*) energiýa çenli tizlendirmek başardýar.

Aýlawly tizlendirijiler (siklotron, fazatron, sinhrotron, sinhrofazotron we başgalar) ylaýta-da ýokary (10^6 *GeW*) energiýa çenli zarýadly bölejikleri tizlendirip bilýär.

21.5. Magnit meýdanyndaky tokly konturyň güýç momenti we potensial energiýasy

Ugrukdyrylan hereket edýän zarýadlara we şonuň ýaly-da elektrik toguna magnit meýdany tarapyndan güýç täsir edýändigi barada belläp geçdik. Indi bolsa, goý, birhilli meýdanda ($B = const$) käbir tokly kontur ýerleşen bolsun we onuň özüni nähili alyp barjakdygyna seredeliň. Eger konturdaky tok I bolsa, onda Amperiň kanunyna laýyklykda, onuň tok elementine täsir edýän güýç

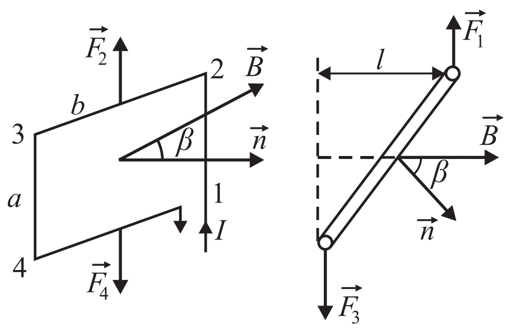
$$d\vec{F} = I\left[d\vec{l}\,\vec{B}\right].$$

Konturyň aýlawy boýunça integrirläp, jemi güýji taparys:

$$\vec{F} = \oint_{(L)} I\left[d\vec{l},\vec{B}\right] = I\left[\left(\oint_{(L)} d\vec{l}\right),\vec{B}\right].$$

Bu ýerden $\oint d\vec{l}$ -iň nola deňdigi şübhesizdir, şoňa görä-de birhilli meýdandaky tokly ýapyk kontura täsir edýän güýçleriň jemi-de nola deň bolar:

$$\vec{F} = I\left[\left(\oint_{(L)} d\vec{l}\right),\vec{B}\right] = 0.$$



21.9-njy çyzgy

Bu aňlatma birhilli magnit meýdanyndaky islendik ýapyk kontur üçin hem dogrudyr. Emma konturyň dürli bölejiklerine täsir edýän güýçler dürli nokatlara goýulanlygy sebäpli, olaryň käbir nokada görä momentleri bardyr. Meseläni ýönekeýleşdirmek maksady bilen gönüburçluk görnüşindäki tokly ramka garalyň (*21.9-njy çyzgy*). Goý, ramkanyň normaly bilen magnit induksiýa $\vec{B}$ wektory özara β burç emele getirýän bolsun. Amperiň kanunyna laýyklykda, a uzynlykly, tokly göni simlere täsir edýän güýçler ululygy boýunça deň, ugry boýunça-da garşylykly bolarlar:

$$F_1 = F_3 = IaB.$$

Ramkanyň b – uzynlykly taraplaryna düşýän güýçler çyzgyda görkezilen. Olaryň ululygy:

$$F_2 = F_4 = IbB\sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) = IbB\cos\beta.$$

Görnüşi ýaly, hemme güýçler bir göni çyzykda ýatmaýarlar we olaryň momentleri jübüt güýçler hökmünde goşulýar:

$$M = IabB\sin\beta = ISB\sin\beta,$$

bu ýerde $S = ab$ – ramkanyň meýdany.

Eger tekizligiň-de wektor häsiýetini göz öňünde tutsak, soňky aňlatmany şeýle ýazyp bileris:

$$M = I[\vec{S}\ \vec{B}] = IS[\vec{n}\ \vec{B}] = [(IS\vec{n}),\vec{B}] = [\vec{P}_m\vec{B}],$$

bu ýerde $\vec{P}_m = IS\vec{n}$ – tekiz ramkanyň ýa-da konturyň magnit momenti.

Birlik $\vec{n}$ wektoryň ugry konturdan akýan toga bagly we ol burawjygyň düzgüni boýunça kesgitlenýär. Matematikada subut edilişi ýaly, islendik tekiz däl kontur üçin hem onuň ýüzüne çekilen üsti tekiz diýip hasaplamak bolar we tükeniksiz dS kiçi meýdanlara bölüşdirip, şeýle ýazyp bileris:

$$\vec{P}_m = \int\limits_{(S)} Id\vec{S} = I\int\limits_{(S)} d\vec{S},$$

$$M = P_m B\sin\beta \quad \text{ýa-da} \quad \vec{M} = [\vec{P}_m\vec{B}],$$

β, bu $\vec{P}_m$ we $\vec{B}$ wektorlaryň arasyndaky burç.

Tekiz konturyň magnit momentiniň wektory $\vec{P}_m$ bilen daşky magnit meýdanynyň induksiýasy $\vec{B}$ ugurdaş bolsa, onda kontura täsir edýän güýçleriň jemi momenti-de nola deň bolar. Emma tokly konturyň islendik kesimine güýç täsir etmesini dowam edýär. Şoňa görä-de, tekiz kontur birhilli magnit meýdanynda, onuň tekizligine meýdanyň güýç çyzyklary perpendikulýar düşer ýaly ýerleşdirilende, kontura täsir edýän güýçler ony öwürmäge ýa-da süýşürmäge ymtylmaýarlar. Ol güýçleriň täsiri diňe halkany şol tekizlikde giňeltmäge ($\vec{P}_m$, $\vec{B}$ wektorlar parallel bolsalar) ýa-da ony gysyp daraltmaga ($\vec{P}_m$ we $\vec{B}$ – ters ugurdaş bolsa) dyrjaşýarlar.

$\vec{P}_m$ we $\vec{B}$ wektorlaryň arasyndaky burç tötänleýin $\beta \neq 0, \pi$ baha eýe bolsa, onda $\vec{B}$ wektory iki düzüjä: $\vec{P}_m$ wektora parallel $\vec{B}_\parallel$ we oňa perpendikulýar $\vec{B}_\perp$ düzüjilere dargadyp, olaryň her biriniň täsirini seljerip bileris. $\vec{B}_\parallel$ düzüjiniň täsiri diňe kontury giňeltmäge ýa-da daraltmaga ymtylar. $\vec{B}_\perp$ düzüji bolsa **aýlandyryjy momenti** döreder, ýagny

$$\vec{M} = [\vec{P}_m, \vec{B}_\perp].$$

Emma $\vec{P}_m$ we $\vec{B}_\perp$ özara perpendikulýardyr, $\vec{B}_\perp$ wektoryň moduly $\vec{B}_\perp = B\sin\alpha$ bolany üçin, şeýle ýazyp bileris:

$$[\vec{P}_m, \vec{B}_\perp] = [\vec{P}_m\vec{B}],$$

$$\overrightarrow{M} = \left[\overrightarrow{P_m}\ \overrightarrow{B}\right] \quad \text{ýa-da} \quad M = P_m B\sin\alpha, \qquad (21.18)$$

bu ýerde α, bu $\overrightarrow{B}$ hem-de $\overrightarrow{P_m}$ wektorlaryň arasyndaky burç.

Aýlandyryjy momentiň täsiri zerarly tokly kontur tükeniksiz kiçi $d\alpha$ burça aýlananda, magnit meýdany tarapyndan täsir edýän güýçler δA iş eder:

$$\delta A = Md\alpha = P_m B\sin\alpha d\alpha.$$

Bu iş öz gezeginde **tokly konturyň potensial energiýasynyň** artmagyna getirer. Şol mehaniki täsiriň netijesindäki potensial energiýanyň artmasy edilen mehaniki işe deň bolar:

$$dW_{P_{meh}} = P_m B\sin\alpha d\alpha.$$

Şeýle mehaniki energiýanyň elementini burçuň ähli üýtgemesine görä integrirläp alarys:

$$W_{P_{meh}} = -P_m B\cos\alpha + const.$$

Eger-de integrirlemäniň hemişeligini nola deň diýip alsak ($const = 0$), onda

$$W_{P_{meh}} = -P_m B\cos\alpha = -\overrightarrow{P_m}\ \overrightarrow{B}.$$

Bu aňlatmadan şeýle netije çykaryp bileris, ýagny $\overrightarrow{P_m}$ we $\overrightarrow{B}$ wektorlar parallel bolsalar, onda deňdeş magnit meýdanyndaky tokly konturyň energiýasy iň pes bahasyna eýe bolýar we ol durnukly deňagramlyk ýagdaýyna geçer.

Eger magnit meýdany käbir x okuň ugruna üýtgeýän bolsa, ýagny $\overrightarrow{B}$ magnit induksiýasy x bagly funksiýa bolsa, onda şeýle ýazyp bileris:

$$\delta A = F_x dx = -dW_{P_{meh}}$$

ýa-da

$$F_x = -\frac{\partial W_{P_{meh}}}{\partial x} = P_m \frac{\partial B}{\partial x}\cos\alpha.$$

Bu ýerden görnüşi ýaly, birhilli däl magnit meýdanyndaky tokly kontura x oky boýunça täsir edýän güýç döreýär. Şeýle-de, $\overrightarrow{P_m}$ we $\overrightarrow{B}$ bir taraplaýyn bolsa, güýç magnit induksiýasynyň artýan ugruna gönükýär, eger $\overrightarrow{P_m}$ we $\overrightarrow{B}$ garşylykly ugrukdyrylan bolsalar, onda güýç magnit induksiýasynyň kemelýän tarapyna gönükýär.

Magnit meýdany giňişlikde üýtgeýän bolsa, onda jemi güýji şeýle kesgitläp bolar:

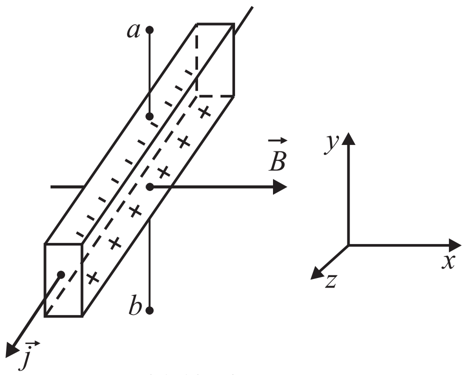
$$\overrightarrow{F} = \vec{i}P_{m_x}\frac{\partial B}{\partial x} + \vec{j}P_{m_y}\frac{\partial B}{\partial y} + \vec{k}P_{m_z}\frac{\partial B}{\partial z} = \nabla\left(\overrightarrow{P_m}\ \overrightarrow{B}\right),$$

$$\overrightarrow{F} = grad\left(\overrightarrow{P_m}\ \overrightarrow{B}\right). \qquad (21.19)$$

Görnüşi ýaly, bu aňlatma elektrik meýdanyndaky elektrik dipola täsir edýän güýje meňzeş. Şoňa görä-de, sadaja tokly kontur, magnit momentleri deň magnit dipoly hökmünde alnyp bilner. Magnit dipoly baradaky düşünjeler magnetikleriň fizikasyny öwrenmekde, dürli elektromagnit abzallary ýasamakda we başga-da köp maksatlar üçin ulanylýar.

21.6. Holluň effekti

$\vec{j}$ dykyzlykly tok geçýän metal (ýa-da ýarymgeçiriji) plastinka $\vec{B}$ induksiýaly magnit meýdanyna ýerleşdirilende $\vec{j}$ we $\vec{B}$ wektorlara perpendikulýar ugurda potensiallaryň tapawudy ýüze çykýar. Bu hadysa 1879-njy ýylda amerikan fizigi E.Holl tarapyndan açyldy we oňa **Holluň effekti** diýilýär.



21.10-njy çyzgy

21.10-njy çyzgyda görkezilen metal plastina seredeliň. Oňa özara perpendikulýar $\vec{j}$ we $\vec{B}$ wektorlar goýlan. Metallarda elektrik togy elektronlaryň ugrukdyrylan hereketidir. Ol hereketli elektronlara Lorensiň güýji täsir eder. Çep eliň düzgünini ulansak, elektronlaryň ýokarky granyň ýanynda köp toplanjakdygy görünýär. Aşaky granyň ýanynda bolsa elektronlaryň ýetmezçiligi, ýagny položitel zarýadlaryň toplumy dörär. Netijede aşaky we ýokarky granlaryň arasynda, ýa-da olara berkidilen a we b geçirijileriň uçlarynda potensiallaryň tapawudy dörär.

Her elektrona täsir edýän Lorensiň güýji bilen garşylykly tarapa ugrukdyrylan Holluň potensial tapawudynyň ($\Delta\varphi$) hasabyna ýüze çykýan güýç deňleşende elektronlaryň durnukly paýlanyşygy ýüze çykar.

Lorensiň güýji

$$F_L = Be\upsilon.$$

Elektrik meýdanynyň elektrona täsir edýän güýji $F = eE$ (bu ýerde $E = \Delta\varphi/L$ bolany üçin $F = e\Delta\varphi/L$). Bu ýerde L – plastinanyň ini. Onda $F_L = F$ şertden alarys:

$$Be\upsilon = \frac{e\Delta\varphi}{L} \quad \text{ýa-da} \quad \Delta\varphi = B\upsilon L. \tag{21.20}$$

Elektronlaryň ugrukdyrylan orta tizligi üçin

$$\upsilon = \frac{1}{enS}$$

formuladan peýdalansak, (21.20) deňlikden alarys:

$$\Delta\varphi = \frac{BIL}{enLh} = \frac{BI}{enh}, \tag{21.21}$$

bu ýerde $S = Lh$ – plastinanyň x ugra perpendikulýar kese-kesiginiň meýdany, h – plastinanyň galyňlygy, n – elektronlaryň konsentrasiýasy. $1/(en) = R$ bilen bellenýär we oňa **Holluň hemişeligi** diýilýär. Şeýlelikde, (21.21) deňlikden alarys:

$$\Delta\varphi = R\frac{BI}{h}. \tag{21.22}$$

Holluň effektinde emele gelýän potensiallaryň tapawudy magnit meýdanynyň induksiýasyna we tok güýjüne göni proporsionaldyr, plastinanyň galyňlygyna bolsa ters proporsionaldyr.

Metallarda Holluň hemişeligini ölçäp, onuň bahasy boýunça tok geçirijileriň konsentrasiýasyny kesgitläp bolýar. Ýarymgeçirijilerde Holluň hemişeligi geçirijileriň tebigaty barada maglumat berýär. Metallarda we ýarymgeçirijilerde tok geçirijileriň energetiki spektrini öwrenmek üçin oňat usuldyr.

Holluň effekti esasynda ýasalan datçikler takyk ölçegleriň tehnikasynda ulanylýar.

21.7. Wakuumdaky magnit meýdan üçin $\vec{B}$ wektoryň köwlenmesi (sirkulýasiýasy). Ostragradskiý-Gaussyň magnit meýdany üçin teoremasy

Elektrostatikada seredilip geçililişi ýaly, magnit induksiýasynyň köwlenmesini (sirkulýasiýasyny) kesgitläp bolýar. Uzyn göni simden tok geçende, oňa perpendikulýar tekizlikde döreýän magnit **induksiýasynyň wektorynyň köwlenmesi** şeýle ýazylýar:

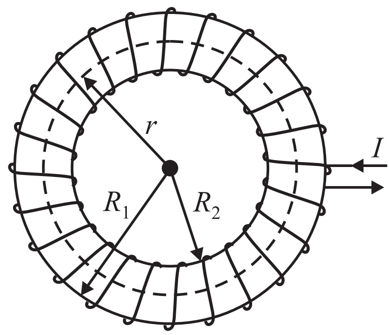
$$\oint\limits_{(L)} \vec{B}d\vec{l} = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I}{r}\int\limits_0^{2\pi r} dl = \mu_0 I. \qquad (21.23)$$

Bu ýerde $d\vec{l}$ – kontura aýlanylýan ugur boýunça ugrukdyrylan konturyň elementar uzynlygynyň wektory, r – toga perpendikulýar tekizlikde alnan töwerek görnüşdäki konturyň radiusy. Bu aňlatmanyň islendik görnüşli kontur üçin hem dogrudygy subut edilendir. (21.23) deňlik wakuumdaky magnit meýdany üçin **doly toguň kanunydyr:** wakuumdaky magnit meýdanynyň induksiýasynyň wektorynyň islendik ýapyk kontur boýunça köwlenmesi magnit hemişeliginiň şol kontury gurşap alan toklara köpeltmek hasyllarynyň algebraik jemine deňdir.

Umumy görnüşde doly toguň kanunyny aşakdaky görnüşde ýazmak bolýar:

$$\oint\limits_{(L)} \vec{B}d\vec{l} = \mu_0 \oint\limits_{(S)} \vec{j}\vec{n}dS, \qquad (21.24)$$

bu ýerde $\vec{j}$ – kontury gurşap alan üstüň ujypsyz dS böleginiň çäklerindäki toguň dykyzlygy, $\vec{n}$, bu dS üstüň normaly, L – toklary gurşap alýan ýapyk kontur.



21.11-nji çyzgy

Doly toguň kanunyny **toroidiň magnit meýdanynyň induksiýasyny** hasaplamakda-da ulanyp bolar (*21.11-nji çyzgy*). Toroid diýip halka görnüşdäki serdeçnige saralan tegege aýdylýar. Toroid üçin magnit induksiýasynyň çyzyklary merkezi toroidiň merkezinde bolan tegeleklerdir.

Onda toroid üçin

$$\oint_{(L)} \vec{B} d\vec{l} = 2\pi r B; \qquad R_2 < r < R_1.$$

Bio-Sawar-Laplasyň kanunyny ulanyp alarys:

$$B = \frac{\mu_0 \mu N I}{2\pi R_{or}}$$

ýa-da serdeçnige derek wakuum bolanda

$$B \approx B_{or} = \frac{\mu_0 N I}{2\pi R_{or}} = \mu_0 n I, \tag{21.25}$$

bu ýerde μ – serdeçnigiň otnositel magnit syzyjylygy, R_{or} – ortaça radius.

Magnit induksiýasynyň $\vec{B}$ wektory bilen okuň kesip geçýän $d\vec{S}$ üst wektorynyň skalýar köpeltmek hasylyna magnit akymy (ýa-da magnit induksiýasynyň wektorynyň akymy) diýilýär:

$$d\vec{\Phi}_m = \vec{B} d\vec{S} = B_n dS = B dS \cos\left(\widehat{\vec{B}, \vec{n}}\right),$$

bu ýerde $d\vec{S} = \vec{n} dS$, B_n, bu B wektoryň üstüň normalynyň ugruna proýeksiýasy.

Erkin alnan üsti kesip geçýän magnit akymyny şeýle hasaplap bolar:

$$\Phi_m = \int \vec{B} d\vec{S} = \int_{(S)} B_n dS. \tag{21.26}$$

Birhilli magnit meýdanynda B_n – hemişelik ululyk bolar, şoňa görä-de $\vec{B}$ wektora perpendikulýar S üst üçin alarys:

$$\Phi_m = BS. \tag{21.27}$$

Magnit akymynyň birligi: weber (Wb). (21.27) formuladan görnüşi ýaly $1\,Wb = 1\,Tl \cdot m^2$. Magnit induksiýasynyň akymy flýuksmetrler bilen ölçelýär. Olaryň ýaýran görnüşleri magnitoelektrik we fotoelektrik flýuksometrlerdir. Bu flýuksometrleriň duýgurlygy $4 \cdot 10^{-8}$ *Wb/bölüm* baha çenli ýetýär.

Eger öwrenilýän üst ýapyk bolsa, onda

$$\oint_{(S)} \vec{B} d\vec{S} = 0. \tag{21.28}$$

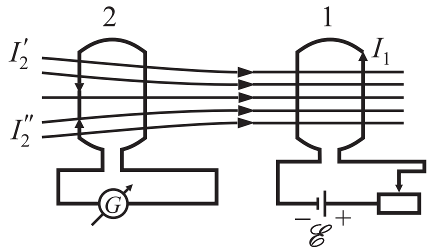
Islendik ýapyk üsti kesip geçýän magnit akymy nola deňdir. Muňa **Ostrogradskiniň-Gaussyň magnit meýdany üçin teoremasy** diýilýär. Bu teorema magnit meýdanyny döredýän magnit “zarýadlarynyň” tebigatda ýokdugynyň, magnit güýç çyzyklarynyň başlanýan ýa-da gutarýan nokatlarynyň ýokdugynyň matematiki aňladylyşydyr.

XXII BAP. ELEKTROMAGNIT INDUKSIÝASY

22.1. Elektromagnit induksiýa hadysasy. Lensiň düzgüni. Faradeýiň kanuny

1831-nji ýylda fransuz fizigi M.Faradeý elektromagnit induksiýa hadysasyny açdy. **Elektromagnit indyksiýa hadysasy:** ýapyk geçiriji kontur bilen çäklenen meýdany kesip geçýän magnit akymynyň islendik üýtgemesi konturda induksion tok diýip atlandyrylýan togy döredýär. Induksiýanyň elektrik hereketlendiriji güýjüniň ululygy magnit akymynyň üýtgeýiş tizligine göni proporsionaldyr:

$$\mathscr{E}_i \sim \frac{d\Phi}{dt}. \qquad (22.1)$$



22.1-nji çyzgy

Induksion toguň ýüze çykyşyny 22.1-nji çyzgydaky shema bilen seljereliň. 1-nji konturda tok çeşmesi we tok güýjüni üýtgetmek üçin reostat bar. 2-nji konturda induksion togy görkezýän G galwanometr bar. Konturlar biri-birine golaý we parallel ýerleşen hasaplalyň. 1-nji konturda I_1 tok köpelende 2-nji konturyň meýdanynda sag tarapa ugrukdyrylan Φ_1 üýtgeýän (köpelýän) magnit akymy döreýän bolsun. Netijede 2-nji konturda I_2' induksion tok dörär. Çyzgyda I_2' toguň ugry 2-nji konturyň çep tarapynda, şertli aşak ugrykdyrylandyr.

1-nji konturda tok azaldylsa onyň döredýän magnit akymy üýtgär (azalar). Netijede, 2-nji konturda ýüze çykýan induksion toguň ugry üýtgeýär. Ol toguň ugry 2-nji konturyň çep tarapynda ýokary ugrykdyrylan görnüşde bellenendir.

Indi, elektromagnit induksiýasy öwrenilende geçirilen tejribeleriň birnäçesine seredeliň. Galwanometr birikdirilen tegek alalyň. Tegegiň giňişliginde dürli usullar bilen üýtgeýän magnit akymyny döretmek bolar:

1) hemişelik magniti tegegiň içinde ýa-da golaýynda herekete getirmek bilen;

2) hemişelik magniti dynçlykda saklan tegegi herekete getirmek bilen;

3) hemişelik magnite derek tokly tegek alyp, ony birinji tegegiň ýanynda herekete getirmek bilen;

4) tokly tegegi dynçlykda saklap, galwanometrli tegegi herekete getirmek bilen.

Üýtgeýän magnit akymyny döretmek üçin bu usullaryň haýsy biri ulanylanda-da galwanometrli tegekde induksion tok döreýär. Elektromagnit induksiýa hadysasynyň kesgitlemesinde belleýşimiz ýaly, ýapyk konturda induksion toguň ýüze çykmasy magnit induksiýasynyň nähili usul bilen üýtgedilişine bagly däldir.

Induksion toguň ugry Lensiň düzgüni bilen kesgitlenýär. **Lensiň düzgüni:** konturdaky induksion toguň şeýle ugry bardyr, ýagny onuň döredýän magnit meýdany bu induksion togy döreden magnit akymynyň üýtgemesiniň garşysyna gönükdirilendir.

Lensiň düzgüniniň manysyna düşünmek üçin ýene-de 22.1-nji çyzgydan peýdalanalyň. Goý, biziň seredýän ugrumyza perpendikulýar tekizliklerde ilki tok çeşmeli kontur, onuň aňyrsynda bolsa galwanometrli kontur ýerleşen bolsun. Tok çeşmeli konturda tok sagat diliniň ugruna akyp köpelýän bolsun. Burawjygyň düzgüni boýunça ol aňryk ugrukdyrylan, artýan magnit akymyny döreder. Ol akym galwanometrli kontury kesip geçende, Lensiň düzgüni boýunça induksion toguň magnit akymy artanda bize tarap ugrukdyrylan bolar. Ýene-de burawjygyň düzgünini ulansak, galwanometrli konturdaky induksion toguň ugry biz üçin sagat diliniň tersine bolar.

Şuňa meňzeş derňewler geçirip, dürli wariantlar üçin induksion toguň ugruny kesgitläp bolýar.

Indi, induksiýanyň EHG-si üçin proporsionallyk görnüşinde ýazylan (22.1) aňlatmanyň anyk görnüşde ýazylyşyna seredeliň. Ýokarda derňän ýagdaýymyz üçin çeşmeli konturda tok sagat diliniň ugruna akýandygyny, onuň bizden aňry tarapa gönükdirilen, artýan magnit akymyny döredýändigini belledik. Galwanometrli konturyň ýanynda hem şeýle magnit akymy bardyr. Onda kontutyň položitel normalyny bizden aňry tarapa gönükdirilen diýip belläp bolar. Bu ýagdaý üçin $\frac{d\Phi}{dt} > 0$. Galwanometrli konturyň döredýän magnit meýdany bolsa bize tarap, ýagny Φ-niň tersine ugrukdyrylan. Şeýle bolansoň $\mathscr{E}_i < 0$ alynýar. Onda (22.1) baglanyşygy

$$\mathscr{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt} \tag{22.2}$$

görnüşde ýazmak bolar. Bu formula elektromagnit induksiýa hadysasy üçin Faradeýiň kanunynyň matematiki aňladylyşydyr. **Faradeýiň kanuny:** nahili sebäplere görä üýtgeýändigine garamazdan, üýtgeýän magnit akymy ýapyk geçiriji kontury kesip geçende onda döreýän induksiýanyň EHG-si $\mathscr{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}$ baglanyşyk bilen kesgitlenýär.

Faradeýiň kanunyny energiýanyň saklanma kanunyndan hem getirip çykaryp bolýar. Özünde $\mathscr{E}$ elektrik hereketlendiriji güýji bolan çeşmäni saklaýan geçiriji konturyň birhilli magnit meýdanyndaky hereketine seredeliň. Konturyň tok çeşmesinden *dt* wagtda alýan doly energiýasy

$$W = \mathscr{E} I dt$$

bolar.

Bu energiýanyň bir bölegi

$$W_1 = I^2 R dt$$

ýylylyk bölünip çykarylmagyna sarp bolýar.

Magnit meýdanyndaky tokly kontura Amper güýji täsir edýär we ony herekete getirýär. Netijede,

$$A = Id\Phi$$

iş edilýär. Energiýanyň saklanma kanuny esasynda $W = W_1 + A$ bolar, ýagny

$$\mathcal{E} Idt = I^2Rdt + Id\Phi.$$

Bu ýerden

$$I = \frac{\mathcal{E} - \dfrac{d\Phi}{dt}}{R},$$

bu ýerde $\dfrac{d\Phi}{dt}$ – ululyk induksiýanyň elektrik hereketlendiriji güýjüni aňladýar. Minus alamaty bolsa onuň ugrunyň zynjyrdaky EHG-e garşylykly ugrukdyrylandygyny görkezýär. Şeýlelikde, induksiýanyň EHG-si

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

bolar. Magnit akymynyň HS-e weberde (Wb) ölçelýändigini göz önüňde tutsak, magnit akymynyň üýtgeýş tizligi $1\dfrac{Wb}{s}$ bolan induksiýanyň EHG-siniň $1W$ boljakdygy soňky deňlikden görünýär.

Indi N sany sargyly kontura, mysal üçin, solenoide, seredeliň. Sarymlar yzygiderli birikdirilenligi üçin netijeleýji EHG sarymlardaky EHG-leriň jemine deň bolar:

$$\mathcal{E}_i = -\sum_{i=1}^{N} \frac{d\Phi_i}{dt} = -\frac{d}{dt}\sum_{i=1}^{N} \Phi_i.$$

Bu ýerde $\sum\limits_{i=1}^{N} \Phi_i = \psi$ ulylyga ilteşme akym ýa-da doly magnit akymy diýilýär.

Onda netijeleýji EHG üçin

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\psi}{dt}.$$

bolar.

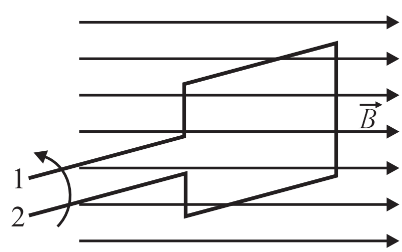
22.2. Geçiriji ramkanyň magnit meýdanynda aýlanmasy

Birhilli magnit meýdanynda ω burç tizligi bilen deňölçegli aýlanýan geçiriji ramka seredeliň (*22.2-nji çyzgy*).

Ramka magnit meýdanyna perpendikulýar bolanda onuň S meýdanyndan geçýän magnit akymy:

$$\Phi_0 = BS.$$

Ramka α burça aýlananda ony kesip geçýän magnit akymy



22.2-nji çyzgy

$$\Phi = \Phi_0\cos\alpha = \Phi_0\cos\omega t$$

bolar. Bu ýerde $\alpha = \omega t$ – wagtyň t pursatyna degişli ramkanyň aýlanan burçy.

Ramkanyň 1 we 2 uçlarynda döreýän induksiýanyň EHG-si:

$$\mathscr{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt} = BS\omega\sin\omega t. \tag{22.3}$$

$\sin\omega t = 1$ bolanda

$$\mathscr{E}_m = BS\omega \tag{22.4}$$

deň bolan iň uly EHG ýüze çykar. Onda (22.3) aňlatmany

$$\mathscr{E}_i = \mathscr{E}_m\sin\omega t \tag{22.5}$$

görnüşde ýazmak bolar. Şeýlelikde, birhilli magnit meýdanynda deňölçegli aýlanýan, geçiriji ramkada garmoniki kanun bilen üýtgeýän EHG ýüze çykýar.

Bu hadysa elektrik energiýasyny öndüriji generatorlarda ulanylýar. Olarda mehaniki energiýa elektrik energiýasyna öwrülýär.

22.3. Köwlenme toklar (Fuko toklary)

Induksion tok diňe geçiriji konturlarda ýüze çykman, eýsem tokga geçirijilerde hem ýüze çykýar. Üýtgeýän magnit akymy kesip geçende tokga geçirijilerde ýüze çykýan ýapyk elektrik toklaryna köwlenme toklar ýa-da Fukonyň toklary diýilýär. Köwlenme toklar induksion tok bolany üçin jisim magnit meýdanynda hereket etdirilende hem ýüze çykýar. Fuko toklary tokga geçirijiniň içinde toguň köp sanly ýapyk liniýalaryny emele getirýär.

Köwlenme toklar wagt birliginde geçirijiden köp mukdarda ýylylygy bölüp çykarýar. Bu bolsa ýokary ýygylykly üýtgeýän magnit meýdanlaryny ulanyp induksion peçleri ýasamaga mümkinçiik berýär. Öýlerde ulanylýan, mikrotolkynly peç diýip atllandyrylýan peçler hem şu esasda işleýär.

Elektrotehniki gurluşlarda köp mukdarda ýylylygyň bölünip çykarylmagy energiýanyň ýitmegine getirýär. Ýitgileri azaltmak üçin transformatorlaryň serdeçnikleri, elektrik maşynlarynyň magnit zynjyrlary we ş.m. tokga görnüşde ýasalman, biri-birinden izolirlenen ýuka plastinalar görnüşinde ýasalýar.

Köwlenme toklar magnit geçirijilerde magnit akymynyň deňölçegsiz paýlanmagyna getirýär. Sebäbi magnit geçirijiniň merkezinde köwlenme toklaryň döredýän magnit meýdanynyň güýjenmesi ýokary bolýar, ugry boýunça esasy magnit akymynyň tersine bolýar. Şu sebäpli ýokary ýygylykly meýdanyň akymynyň serdeçnikde diňe üstki, ýuka gatlak boýunça geçmegine getirýär. Bu hadysa **magnit skin effekti** diýilýär.

Köwlenme toklar üýtgeýän tok geçýän geçirijilerde hem ýüze çykýar. Netijede, yokary ýygylykly üýtgeýän tok geçirijiniň üstki ýuka gatlagyndan geçýär. Bu hadysa **elektrik skin effekti** diýilýär.

Köwlenme toklaryň esasy magnit akymy bilen täsiri geçirijini herekete getirip bilýär. Bu hadysa ölçeg tehnikasynda, üýtgeýän toguň maşynlarynda ulanylýar.

22.4. Konturyň induktiwligi we özara induksiýanyň koeffisiýenti

Geçiriji konturda toguň üýtgemegi sebäpli bu konturda elektromagnit induksiýanyň elektrik hereketlendiriji güýjüniň döremegine öz-özünde induksiýa diýilýär. Ýüze çykýan EHG bolsa öz-özünde induksiýasynyň elektrik hereketlendiriji güýji diýilýär. Öz-özünde induksiýa elektromagnit induksiýasynyň ýüze çykyş görnüşiniň biridir. Onuň EHG-si aşakdaky ýaly kesgitlenilýär:

$$\mathscr{E}_{öz} = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Bio-Sawar-Laplasyň kanunyna görä ýüze çykýan B magnit induksiýasy toguň güýjüne göni proporsionaldyr. Diýmek, Φ magnit akymy I tok güýjüne proporsionaldyr:

$$\Phi = LI \quad \text{ýa-da} \quad \mathscr{E}_{öz} = -L\frac{dI}{dt}. \qquad (22.6)$$

Bu aýdylanlar μ magnit syzyjylygy hemişelik bolan sredalar üçin dogrudyr. Bu deňlikdäki L proporsionallyk koeffisiýentine konturyň **induktiwligi** diýilýär. L induktiwlik konturyň geometrik ölçeglerine, sargy sanyna we μ magnit syzyjylyga baglydyr. Eger kontur suduryny üýtgetmeýän bolsa μ hemişelik bolan kontur üçin L hemişelik baha eýedir. HS-de induktiwligiň ölçeg birligi genridir (Gn).

Konturdaky tok $1A$ bolanda ondaky magnit akymy $1\,Wb$ bolan konturyň induktiwligi 1 Gn-e deňdir.

Solenoidiň induktiwligini hasaplalyň. Solenoidiň uzynlygy diametrinden has uly diýeliň we ony tükeniksiz uzyn solenoid diýip kabul edeliň. Solenoidden I tok geçende onuň içinde induksiýasy

$$B = \mu_0 \mu n I \qquad (22.7)$$

bolan birhilli magnit meýdany emele geler. Her sargynyň döredýän magnit akymy $\Phi = BS$ bolar. Onda

$$\Psi = N\Phi = nlBS = \mu_0 \mu n^2 lSI, \qquad (22.8)$$

bu ýerde $N = nl$ – sargylaryň sany, l – solenoidiň uzynlygy, n – birlik uzynlyga düşýän sargylaryň sany, S – kese-kesiginiň meýdany.(22.6) we (22.8) formulalary deňeşdirip alarys:

$$L = \mu_0 \mu n^2 lS = \mu_0 \mu n^2 V, \qquad (22.9)$$

bu ýerde $V = lS$ – solenoidiň göwrümi.

Bir konturda tok güýji üýtgände beýleki konturda EHG-niň ýüze çykmak hadysasyna **özära induksiýa** diýilýär. Özara induksiýany mukdar taýdan häsiýetlendirýän ululyga özara induktiwlik diýilýär. Golaý ýerleşen iki geçiriji konturlara seredeliň. I_1 tokly 1-nji konturyň magnit akymynyň bir bölegi 2-nji kontury kesip geçýän bolsun. Bu Φ_{12} ululyk I_1 toga göni proporsionaldyr:

$$\Phi_{12} = M_{12}I_1. \tag{22.10}$$

M_{12} – proporsionallyk koeffisiýenti konturlaryň formalaryna, sargylarynyň sanyna we ölçeglerine, olaryň arasyndaky uzaklyga, sredanyň μ magnit syzyjylygyna baglydyr. Oňa özara induksiýanyň koeffisiýenti diýilýär. HS-de onuň ölçeg birligi genridir (Gn).

Eger ikinji konturdan I_2 tok aksa, onda onuň magnit akymynyň bir bölegi (Φ_{21}) birinji kontury kesip geçer.

Bu ýagdaý üçin

$$\Phi_{21} = M_{21}I_2. \tag{22.11}$$

(22.10) we (22.11) deňliklerdäki M_{12} we M_{21} deňdir.

Konturlaryň magnit baglanyşygy olaryň birinde tok üýtgände beýlekisinde EHG-niň ýüze çykmagyna getirýär.

Elektromagnit induksiýa kanuny esasynda

$$\mathscr{E}_2 = -\frac{d\Phi_{12}}{dt} = -M_{12}\frac{dI_1}{dt},$$

$$\mathscr{E}_1 = -\frac{d\Phi_{21}}{dt} = -M_{21}\frac{dI_2}{dt}, \tag{22.12}$$

bu ýerde $\mathscr{E}_2$ we $\mathscr{E}_1$ – ikinji we birinji konturlarda ýüze çykýan EHG. (22.10), (22.11) we (22.12) deňlikler ferromagnit sredalar üçin dogry däldir. Çünki olaryň μ magnit syzyjylygynyň hemişelik däldigini hasaba almak zerurdyr.

Üýtgeýän toguň naprýaženiýesini köpeltmek ýa-da peseltmek üçin niýetlenen transformatorlaryň işleýiş prinsipleri özara elektromagnit induksiýa hadysasyna esaslanandyr.

22.5. Zynjyr çeşmä birikdirilende we aýrylanda döreýän tok

Geçiriji kontur hemişelik tok çeşmesine birikdirilende zynjyrdaky tok bada-bat durnukly baha eýe bolmaýar. Şeýle zynjyr çeşmeden aýrylanda bolsa tok bada-bat nola deň bolmaýar. Bu hadysalar geçiriji konturda öz-özünde induksiýanyň EHG--siniň döreýänligi we şol EHG-niň hasabyna goşmaça toklaryň ýüze çykýanlygy bilen düşündirilýär. Bu toklara **öz-özünde induksiýanyň ekstratoklary** diýilýär.

R garşylykly, L induktiwlikli we $\mathscr{E}_i$ EHG-li tok çeşmesi bolan yzygider zynjyra seredeliň. Çeşmäniň içki garşylygyny hasaba almasak, onda zynjyrdaky tok $I_0 = \mathscr{E}_i/R$ bolar. Zynjyr çeşmeden aýrylsa, tok güýji azalyp başlar. Zynjyrda $\mathscr{E}_{öz} = -LdI/dt$ öz-özünde induksiýanyň EHG-si bolar. Ol toguň azalmagyna päsgel berýär. Indi zynjyrdaky tok $I = \mathscr{E}_{öz}/R$ kanun bilen kesgitlener. Onda

$$IR = -L\frac{dI}{dt}. \qquad (22.13)$$

Bu deňligi

$$\frac{dI}{I} = -\frac{R}{L}dt$$

görnüşde ýazyp bolar. Soňky deňligi tok boýunça I_0-dan I-e çenli we wagt boýunça 0-dan t-e çenli integrirläp alarys:

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -\frac{Rt}{L}$$

ýa-da

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \qquad (22.14)$$

bu ýerde $\tau = \frac{L}{R}$ – relaksasiýa wagty diýlip atlandyrylýan hemişelik. Görnüşi ýaly, τ tok güýjüniň e esse azalýan wagtyna deňdir. Tok zynjyrda eksponensial kanun esasynda azalýar. Zynjyrdaky induktiwlik uly boldugyça tok haýal peselýär.

Geçiriji kontur hemişelik tok çeşmesine birikdirilende zynjyrda öz-özünde induksiýasynyň EHG-si ýüze çykýar: $\mathscr{E}_{öz} = -L\frac{dI}{dt}$ we toguň artmagyna päsgel berýär. Omuň kanuny boýunça

$$IR = \mathscr{E} + \mathscr{E}_{öz} \quad \text{ýa-da} \quad IR = \mathscr{E} - L\frac{dI}{dt}.$$

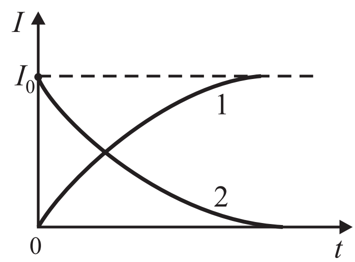
Täze u näbelli ululyk girizip ($u = IR - \mathscr{E}$), soňky deňligi şeýle özgertmek bolar:

$$\frac{du}{u} = \frac{dt}{\tau}.$$

Zynjyr birikdirilende ($t = 0$) tok güýji $I = 0$ we $u = -\mathscr{E}$ bolar. Onda soňky deňligi u boýunça $-\mathscr{E}$-den ($IR - \mathscr{E}$) çenli we t boýunça noldan t çenli integrirläp alarys:

$$\ln\frac{IR - \mathscr{E}}{-\mathscr{E}} = \frac{t}{\tau} \quad \text{ýa-da} \quad I = I_0\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \qquad (22.15)$$

bu ýerde $I_0 = \mathscr{E}/R$ – durnuklaşan tok.



22.3-nji çyzgy

Görnüşi ýaly, toguň bahasy başlangyç nol bahada asimtota egrisi boýunça ösüp $I_0 = \mathscr{E}/R$ baha eýe bolýar. (22.14) we (22.15) baglanyşyklaryň grafikleri 22.3-nji çyzgyda şekillendirilýär. Çyzgyda 1-nji egri birikdirmäniň, 2-nji egri öçürmäniň ekstratoklary.

Zynjyrlarda ýüze çykýan öz-özünde induksiýanyň EHG-sini hasaba almagyň iş ýüzünde ähmiýeti uludyr. Garşylygyň we induktiwligiň käbir bahalarynda öz-özünde induksýanyň EHG-si tok çeşmesiniň EHG-sinden birnäçe esse uly bolup bilýär. Beýle zynjyrlar öçürilende ölçeýji abzallaryň hatardan çykmagy, izolýasiýalaryň zaýalanmagy mümkin.

22.6. Magnit meýdanynyň energiýasy

Tokly geçirijiniň töwereginde hemişe magnit meýdany bardyr. Tok kesilende magnit meýdany hem ýok bolýar. Elektrik meýdanynda bolşy ýaly, magnit meýdanynyň hem energiýasy bardyr. Ol energiýa magnit meýdanyny döretmek üçin toguň işine deňdir. Magnit meýdanynyň energiýasynyň meýdanyň giňişliginde jemlenendigi subut edilendir.

R garşylykly we *L* induktiwlikli ýapyk kontura seredeliň. Kontur üçin Omuň kanunyny ýazalyň:

$$I = \frac{\mathscr{E} + \mathscr{E}_0}{R},$$

bu ýerde $\mathscr{E}_0 = -\frac{d\Phi}{dt}$.

Onda

$$\mathscr{E} = IR + \frac{d\Phi}{dt} \tag{22.16}$$

deňligi alarys. dt wagtda tok çeşmesiniň edýän işi

$$\mathscr{E}Idt = I^2Rdt + Id\Phi$$

bolar. Bu ýerde birinji goşulyjy geçirijiniň gyzmagyna sarp edilýän iş, ikinji goşulyjy magnit akymyny $d\Phi$ ululyga üýtgetmek üçin edilmeli iş. $d\Phi = LdI$ bolany üçin bu iş $dA = Id\Phi = LIdI$ bolar. Bu ýerden Φ magnit akymyny döretmek üçin işi tapýarys:

$$A = \int_0^1 LIdI = \frac{LI^2}{2}.$$

Şeýlelikde, kontur bilen baglanyşykly magnit meýdanynyň energiýasy:

$$W_m = \frac{LI^2}{2}. \tag{22.17}$$

Solenoide mysal hökmünde seredeliň. Onuň induktiwligi:

$$L = \mu_0 \mu n^2 V.$$

Solenoidiň magnit induksiýasy

$$B = \mu_0 \mu n I.$$

Onda

$$I = \frac{B}{\mu_0 \mu n}.$$

L we *B*-niň bahalaryny (22.17) deňlige goýup, solenoidiň magnit meýdanynyň energiýasyny taparys:

$$W_m = \frac{LI^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}V. \tag{22.18}$$

Birhilli magnit meýdanda magnit energiýasynyň göwrüm boýunça deň paýlanýandygyny göz öňünde tutup, **magnit energiýasynyň göwrüm dykyzlygy** üçin alarys:

$$w_m = \frac{W_m}{V} = \frac{B^2}{2\mu_0\mu}. \tag{22.19}$$

Magnit induksiýasynyň magnit meýdanynyň H güýjenmesi bilen $B = \mu_0 \mu H$ baglanşygyny ulansak, (22.19) deňligi

$$w_m = \frac{BH}{2} \tag{22.20}$$

görnüşinde ýazmak bolar.

(22.20) formula B bilen H-yň baglanyşygynyň çyzykly bolan sredalaryna, ýagny dia- we paramagnetiklere degişlidir.

Eger tok geçýän konturyň magnit meýdany birhilli bolmasa, onda energiýa meýdanyň hemme ýerine deň paýlanmaýar. Ujypsyzja dV göwrümde meýdan birhilli diýip kabul etsek,

$$dW_m = \frac{BH}{2}dV \tag{22.21}$$

formulany alarys.

Tutuş meýdanyň energiýasyny hasaplamak üçin soňky aňlatmany meýdanyň ähli V_n göwrümi boýunça integrirlemek gerek:

$$W_m = \int\limits_{(V_n)} \frac{BH}{2}dV. \tag{22.22}$$

XXIII BAP. MADDALARYŇ MAGNIT HÄSIÝETLERI

23.1. Magnit meýdanyndaky maddalaryň magnit induksiýasy we magnitlenmesi. Molekulýar toklar

Biz geçen baplarda wakuumdaky magnit meýdanyna degişli düşünjelere seretdik. Magnit meýdanynda haýsyda bolsa bir madda ýerleşdirilse ol magnit meýdanyny üýtgedýär. Maddalar daşky magnit meýdanynyň täsiri bilen magnitlenmäge, ýagny magnit meýdanyny ýüze çykarmaga ukyplydyr.

Maddalaryň magnit meýdany bilen täsirler öwrenilende maddalary magnetikler diýip atlandyrmak kabul edilendir. Magnitlenen madda $\vec{B}'$ induksiýaly magnit meýdanyny döredýär. Bu induksiýa daşky toklaryň döredýän B_0 magnit induksiýasy bilen goşulyp, netijeleýji

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' \tag{23.1}$$

magnit induksiýasyny döredýär. B induksiýa maddanyň içindäki molekulýar aralyklarda üýtgäp durýar. Bu ýerde B wektor induksiýanyň ortaça (makroskopik) bahasy ýaly kabul edilýär.

Jisimleriň magnitlenişini düşündirmek üçin **Amper molekulýar maddalarda aýlawly toklaryň (molekulýar toklaryň)** ýüze çykýandygy barada düşünje girizdi. Şeýle toklaryň her biriniň magnit momenti bardyr we olar giňişlikde magnit meýdanyny döredýärler. Daşky meýdan ýok mahaly magnit momentleri giňişlikde tertipsiz ugrukdyrylýarlar we şol sebäpli olaryň wektorlaýyn jemi nola deň bolup, olar netijeleýji magnit meýdanyny döredip bilmeýärler. Daşky meýdanyň täsiri bilen molekulalaryň magnit momentleri bir ugra gönügip başlaýarlar. Netijede, madda magnitlenip başlaýar, ýagny olaryň magnit momentleriniň geometrik jemi noldan tapawutlanyp başlaýar.

Magnetikleriň magnitlenişi birlik göwrümdäki magnit momentleri bilen häsiýetlendirilýär. Bu ululyga **magnitlenme** diýilýär we $\vec{J}$ harpy bilen bellenýär.

Eger magnetik deňölçegli magnitlenýän bolsa, berlen nokat üçin magnitlenme

$$\vec{J} = \frac{1}{\Delta V}\sum_i \vec{P}_m \qquad (23.2)$$

aňlatma bilen kesgitlenýär. Bu ýerde ΔV – öwrenilýän nokady gurşap alýan ujypsyz kiçi göwrüm, $\vec{P}_m$ – bir molekulanyň magnit momenti. Jem ΔV göwrümde ýerleşen ähli molekulalar boýunça alynýar. Magnitlenmäniň ölçeg birligi: A/m.

$\vec{B}'$ induksiýaly meýdanda B_0 induktsiýaly meýdan üçin bolşy ýaly çeşme ýokdur. Şonuň üçin, Gaussyň teoremasyndan gelip çykýan netije esasynda (*21.28-nji formula*) netijeleýji $\vec{B}$ induksiýanyň diwergensiýasy nola deňdir:

$$\mathrm{div}\vec{B} = \nabla\vec{B} = \nabla\vec{B}_0 + \nabla\vec{B}' = 0. \qquad (23.3)$$

Netijeleýji meýdanyň rotory üçin alarys:

$$\left[\nabla\vec{B}\right] = \left[\nabla\vec{B}_0\right] + \left[\nabla\vec{B}'\right].$$

Magnit induktsiýasynyň wektorynyň rotorynyň berlen nokatdaky toguň dykyzlygynyň wektoryna proporsionaldygy barada

$$\left[\nabla\vec{B}\right] = \mu_0\vec{j}$$

formulany öň alypdyk (21.23-nji formula). Bu formulany daşky meýdan üçin ýazalyň:

$$\left[\nabla\vec{B}_0\right] = \mu_0\vec{j},$$

bu ýerde j – makroskopik toklaryň dykyzlygy. $\vec{B}$ wektor üçin meňzeşlikden peýdalanyp alarys:

$$\left[\nabla\vec{B}'\right] = \mu_0 j_{mol}.$$

Onda

$$\left[\nabla\vec{B}\right] = \mu_0\left(\vec{j} + \vec{j}_{mol}\right). \qquad (23.4)$$

$\vec{B}$ wektoryň rotoryny kesgitlemek üçin makroskopik toklaryň $\vec{j}$ dykyzlygyndan başga-da, molekulýar toklaryň $\vec{j}_{mol}$ dykyzlygyny hem bilmek gerekdigi

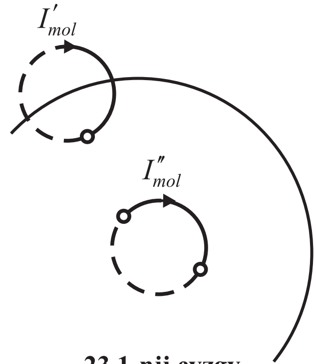
(23.4) formuladan görünýär. Molekulýar toklaryň dykyzlygy bolsa öz gezeginde $\vec{B}$ wektora baglydyr. Bu meseläni çözmek üçin rotory diňe makroskopik toklar bilen kesgitleýän kömekçi ululygy tapmak gerek bolýar.

23.2. Magnit meýdanynyň güýjenmesi

Bu kömekçi ululygy tapmak üçin molekulýar toklaryň $\vec{j}_{mol}$ dykyzlygyny magnetigiň magnitlenmesiniň üsti bilen aňlatmaga synanyşalyň. Bu maksat bilen haýsy-da bolsa bir G kontur bilen gurşalan molekulýar toklaryň algebraik jemini tapalyň. Bu jem

$$\int_{(S)} \vec{j}_{mol}\, d\vec{S} \tag{23.5}$$

bolar. Bu ýerde S – kontura dartylan üstün meýdany.



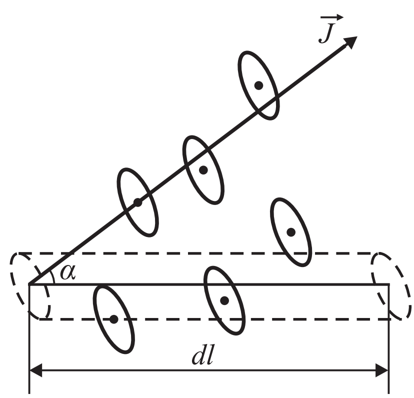
23.1-nji çyzgy

Bu algebraik jeme diňe kontura ilteşýän molekulýar toklar girer (*23.1-nji çyzgydaky* I'_{mol} tok).

Kontura ilteşmeýän toklaryň bir bölegi üsti kesip geçenok. Beýlekileri bolsa üsti iki gezek-bir gezek bir tarapa, ýene bir gezek hem garşylykly tarapa kesip geçýär (*23.1-nji çyzgy*, I''_{mol} tok). Netijede, konturyň gurşap alýan toklarynyň algebraik jemine soňkylaryň goşandy nola deň bolýar.

Magnitlenmäniň ugry bilen α burç emele getirýän konturyň dl tükeniksiz kiçi elementi 23.2-nji çyzgyda görkezilendir. Görnüşi ýaly, diňe merkezleri göwrümi $S_{mol}\cos\alpha dl$ bolan gyşyk silindre düşýän molekulýar toklar dl elemente ilteşýändir. (Bu ýerde S_{mol} – bir molekulýar toguň eýeleýän meýdany). Birlik göwrümdäki molekulalaryň sanyny n diýip alsak, dl elementiň gurşap alýan toklarynyň jemi $I_{mol}nS_{mol}\cos\alpha dl$ bolar.

$I_{mol}S_{mol}$ köpeltmek hasyly bir molekulýar toguň P_m magnit momentine deňdir. Diýmek, $I_{mol}nS_{mol}$ aňlatma birlik göwrümiň magnit momentidir, ýagny $\vec{J}$ magnitlenmedir. $I_{mol}nS_{mol}\cos\alpha$ bolsa $\vec{J}$ magnitlenme wektorynyň dl elementiň ugruna bolan proýeksiýasydyr. Şeýlelikde, dl elemetiň gurşap alan jemleýji molekulýar tok $\vec{J}d\vec{j}$ deňdir.



23.2-nji çyzgy

Konturyň gurşap alan molekulýar toklarynyň jemi

$$\int_{(S)} \vec{j}_{mol}\, d\vec{S} = \int_{(G)} \vec{J}\, d\vec{l}$$

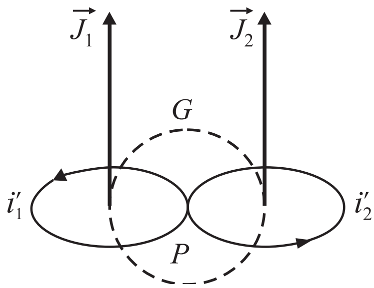
bolar. Deňligiň sag tarapyny Stoksyň teoremasy boýunça özgerdip alarys:

$$\int\limits_{(S)} \vec{j}_{mol}\, d\vec{S} = \int\limits_{(S)} \left[\nabla \vec{J}\right] d\vec{S}.$$

S üsti nähili saýlap alanymyzda-da, bu deňlik ýerine ýetmeli. Bu şertiň ýerine ýetmegi üçin integraldaky aňlatmalar magnetigiň hemme nokatlarynda deň bolmalydyr:

$$\left[\nabla \vec{B}'\right] = \mu_0 \left[\nabla \vec{J}\right]. \qquad (23.6)$$

Bu ýerden molekulýar toklaryň dykyzlygynyň magnitlenmäniň rotoryna deňdigi gelip çykýar. Haçanda $\left[\nabla \vec{J}\right] = 0$ bolanda molekulýar toklaryň dürli ugurlara gönügenligi sebäpli, olaryň jeminiň nola deň bolýandygyny görkezýär. 23.3-nji çyzgyda şekiller (23.6) formula üçin käbir düşündirişleri almaga mümkinçilik berýär. Çyzgyda *P* nokatdan daşda bolmadyk iki sany $\vec{J}_1$ we $\vec{J}_2$ magnitlenmäniň wektorlary görkezilen. Bu iki wektor we *P* nokat çyzgynyň tekizliginde ýatýar. Üzük çyzyk bilen görkezilen *G* kontur hem çyzgynyň tekizliginde ýatýar. Eger magnitlenmäniň aýratynlygyna baglylykda $\vec{J}_1$ we $\vec{J}_2$ wektorlaryň modullary deň bolsa, onda $\vec{J}$ wektorlaryň *G* kontur boýunça sirkulýasiýasy nola deň bolar. Degişlilikde $\left[\nabla \vec{J}\right]$ berlen *P* nokatda nola deň bolar.



23.3-nji çyzgy

$\vec{J}_1$ we $\vec{J}_2$ wektorlara degişli i_1' we i_2' molekulýar toklaryň konturlary çyzgyda bütewi çyzyklar bilen görkezilendir. Bu konturlar çyzgyda magnitlenme wektoryna perpendikulýar tekizlikde ýerleşýärler. $\vec{J}_1$ we $\vec{J}_2$ wektorlar parallel bolany üçin i_1' we i_2' toklaryň ugry *P* nokatda garşylyklydyr. $\left[\vec{J}_1\right] = \left[\vec{J}_2\right]$ bolany üçin *P* nokatda bu toklaryň ululyklary deňdir. Onda *P* nokatda $\left[\nabla \vec{J}\right]$ ululygyň nola deň bolşy ýaly, molekulýar toklar hem nola deňdir. Goý, $\vec{J}_1 > \vec{J}_2$ bolsun. Onda $\vec{J}$ wektoryň *G* kontur boýunça sirkulýasiýasy nola deň däldir. Netijede, *P* nokatda $\vec{J}$ wektor çyzgydan aňry tarapa ugrukdyrylan $\left[\nabla \vec{J}\right]$ wektor bilen häsiýetlendiriler. Uly magnitlenmä uly tok degişli bolýany üçin, $i_1' > i_2'$ bolar. Netijede, *P* nokatda noldan tapawutly magnitlenme bolar. Ony häsiýetlendirýän $\vec{J}_{mol}$ bolsa $\left[\nabla \vec{J}\right]$ ýaly çyzgynyň aňyrsyna ugrukdyrylandyr.

Noldan tapawutly magnitlenmäniň rotorynyň barlygy noldan tapawutly molekulýar toguň bardygyny görkezýär. Olaryň ikisi-de bir ugra ugrukdyrylandyr.

(23.6) formulany (23.1) formula goýup alarys:

$$\left[\nabla\vec{B}\right]=\mu_0\vec{j}+\mu_0\left[\nabla\vec{J}\right].$$

Bu deňligi μ_0 bölüp we rotorlary birleşdirip alarys:

$$\left[\nabla,\left(\frac{\vec{B}}{\mu_0}-\vec{J}\right)\right]=\vec{j}. \qquad (23.7)$$

Bu ýerden

$$\vec{H}=\frac{\vec{B}}{\mu_0}-\vec{J}. \qquad (23.8)$$

Bu ýerde $\vec{H}$ diňe makroskopik toklara bagly bolan kömekçi ululyk. Bu ululyga **magnit meýdanynyň güýjenmesi** diýilýär. (23.7) deňlikden

$$\left[\nabla\vec{H}\right]=\vec{j}, \qquad (23.9)$$

ýagny $\vec{H}$ wektoryň rotory makroskopik toklaryň dykyzlyk wektoryna deňdir.

Indi üstüne S üst dartylan G kontur alalyň we onuň üçin

$$\oint_{(S)}\left[\nabla\vec{H}\right]d\vec{S}=\int_{(S)}\vec{j}\,d\vec{S}$$

aňlatmany ýazalyň. Stoksyň teoremasy esasynda deňligiň çep tarapy $\vec{H}$ wektoryň G kontur boýunça sirkulýasiýasydyr. Diýmek,

$$\oint_{(L)}\vec{H}dl=\int_{(S)}\vec{j}\,d\vec{S}. \qquad (23.10)$$

Eger makroskopiki toklar G kontur bilen gurşalan üsti kesip geçýän bolsa, onda (23.10) deňligi şeýle ýazmak bolar:

$$\oint_{(L)}\vec{H}dl=\sum_k I_k. \qquad (23.11)$$

(23.10) we (23.11) formulalar $\vec{H}$ wektoryň sirkulýasiýasy baradaky teoremany aňladýar. **Magnit meýdanynyň güýjenmesiniň** $\vec{H}$ wektorynyň käbir kontur boýunça sirkulýasiýasy bu kontur bilen gurşalan toklaryň algebraik jemine deňdir.

Magnit meýdanynyň $\vec{H}$ güýjenmesi elektrik meýdanynyň $\vec{D}$ süýşme wektoryna meňzeş ululykdyr. Magnit meýdanynyň $\vec{B}$ induksiýasy bolsa elektrik meýdanynyň $\vec{E}$ güýjenmesine meňzeşdir.

Wakuumda tükeniksiz göni toguň magnit induksiýasynyň

$$B=\frac{\mu_0 I}{2\pi R}$$

bolýanlygy üçin, onuň güýjenmesi

$$H=\frac{I}{2\pi R}. \qquad (23.12)$$

Bu deňlikden görnüşi ýaly, magnit meýdanynyň güýjenmesiniň ölçeg birligi A/m.

23.3. Magnit syzyjylygy we magnit kabul edijiligi

Magnitlenme magnit meýdanynyň güýjenmesi bilen

$$\vec{J} = \chi\vec{H} \tag{23.13}$$

baglanşykdadyr. Bu ýerde χ – magnit kabul edijiligi. Ol maddany häsiýetlendirýän ululykdyr we ölçeg birligi ýokdur. χ uly bolmadyk meýdanlarda gowşak magnitli (ferromagnetik däl) maddalar üçin hemişelik ululykdyr.

(23.8) deňlige (23.13) deňlikden $\vec{J}$-niň bahasyny goýup alarys:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \chi\vec{H} \quad \text{ýa-da} \quad \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0(1+\chi)}. \tag{23.14}$$

Bu ýerde $1 + \chi = \mu$ ululyga maddanyň otnositel magnit syzyjylygy diýilýär.

Magnetikleriň magnit meýdanynda magnitlenişi bilen dielektrikleriň elektrik meýdanynda polýarlanyşyny (XVI baba ser.) deňeşdirip, aşakdakylary bellemek bolar.

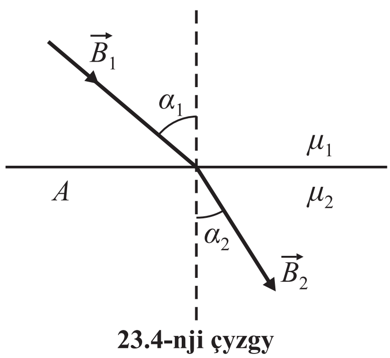
Diamagnetikler üçin χ-iň magnit kabul edijiligi otrisateldir ($\chi < 0$), magnit syzyjylygy μ birden kiçidir ($\mu < 1$). Paramagnetikler üçin $\chi > 0$; $\mu > 1$. Ferromagnetikler üçin bu görkezijiler has uly položitel bahalara eýedir.

Ähli dielektrikler üçin χ dielektrik kabul edijiligi noldan uludyr ($\chi_d > 0$), ε dielektrik syzyjylygy bolsa birden uludyr ($\varepsilon > 1$).

(23.14) formulany aşakdaky ýaly ýazmak bolar:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0\mu}. \tag{23.15}$$

Şeýlelikde, magnit meýdanynyň güýjenmesi $\vec{H}$ ululygy boýunça $\vec{B}$ wektordan $\mu_0\mu$ esse kiçi, ugry boýunça şonuň bilen gabat gelýän wektordyr (anizotrop sredalarda ugurlary gabat gelmän hem bilýär).



23.4-nji çyzgy

Iki sredanyň araçäginden geçende $\vec{B}$ özüni $\vec{D}$ wektora meňzeş alyp barýar. $\vec{H}$ wektor bolsa $\vec{E}$ wektora meňzeş alyp barýar.

23.4-nji çyzgyda **iki magnetigiň *A* araçägi** görkezilendir. Şeýle araçäkden $\vec{B}$ wektor geçende magnit induktsiýasynyň çyzygynyň

$$\frac{\mathrm{tg}\alpha_1}{\mathrm{tg}\alpha_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \tag{23.16}$$

döwülme kanuny ýerine ýetýär. Induksiýa çyzyklary kiçi magnit syzdyryjylygy μ_1 bolan maddadan uly μ_2 bolan madda geçende araçäge galdyrylan normala tarap gyşarýar. Bu bolsa güýç çyzyklarynyň gürelmegine getirýär. Bu gürelme magnit çogdamlaryny almaga, ýagny magnit akymyna dürli görnüşler we ugurlar bermäge mümkinçilik döredýär.

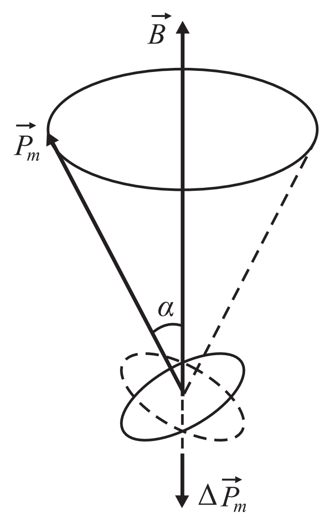
23.4. Diamagnetikler we paramagnetikler

Jisimleriň magnit häsiýetleri öwrenilende ähli jisimleri magnetikler diýip atlandyrmak kabul edilendir. Magnetikler özleriniň magnit häsiýetleri boýunça **diamagnetikler, paramagnetikler** we **ferromagnetikler** diýen esasy üç topara bölünýärler. Daşky magnit meýdanyna ýerleşdirilende islendik madda azda-kände magnitlenýär, ýagny özüniň hususy magnit meýdanyny döredýär.

Daşky magnit meýdanynda bu meýdanyň magnit induksiýasynyň wektorynyň garşylykly ugruna magnitlenýän maddalara **diamagnetikler** diýilýär. Diamagnetikleriň magnit kabul edijiligi χ otrisateldir we absolýut möçberi boýunça örän kiçidir. Daşky magnit meýdany ýok wagtynda atomlarynyň, molekulalarynyň we ionlarynyň magnit momentleriniň algebraik jemi nola deň bolan maddalar diamagnetiklere degişlidir. Inert gazlary, molekulýar wodorod, azot, wismut, sink, mis, altyn, kümüş, kremniý, germaniý, suw, aseton, gliserin, naftalin we başga-da birnäçe birleşmeler diamagnetiklere degişlidir.

Elektron atomda tegelek orbita boýunça aýlanýar diýip göz öňüne getireliň. Goý, orbita $\vec{B}$ wektor bilen α burçy emele getirýän bolsun (*23.5-nji çyzgy*). Onda Larmoryň teoremasyna görä magnit momentiniň $\vec{P}_m$ wektory α burçy hemişelik saklap, $\vec{B}$ wektoryň daşynda käbir burç tizligi bilen aýlanar.

Mehanikada beýle herekete presessiýa diýilýär. Elektronlaryň şeýle hereketi aýlaw toga ekwiwalentdir. Bu aýlaw mikrotoga daşky magnit meýdanyň täsiri netijesinde induksion tok ýüze çykýar. Lensiň kanunyna görä induksion toguň döredýän magnit induksiýasy daşky meýdanyň induksiýasynyň $\vec{B}$ wektorynyň özgermesiniň garşysyna ugrukdyrylandyr.



23.5-nji çyzgy

Şeýlelikde, Z elektronly atomyň ýüze çykarjak magnit momenti

$$\Delta\vec{P}_m = -\frac{e^2 Z < S_1 > \vec{B}}{4\pi m}. \qquad (23.17)$$

Bu ýerde $\langle S_1 \rangle$ – atomyň ähli elektronlarynyň orbitalarynyň S_1 meýdanynyň ortaça bahasy, e we m, degişlilikde elektronyň zarýady we massasy.

Izotrop diamagnetigiň ΔV kiçi göwrüminiň çäklerinde $\Delta\vec{P}_m$ wektor ähli n atom (molekula) üçin deňdir.

(23.17) deňlikden görnüşi ýaly, $\Delta\vec{P}_m$ induksiýanyň $\vec{B}$ wektoryna göni proporsionaldyr we garşylykly ugrukdyrylandyr. Şu esasda diamagnetigiň magnitliligi

$$\vec{J} = \frac{n\Delta\vec{P}_m}{\Delta V} = n_0 \Delta\vec{P}_m = \frac{\chi' \vec{B}}{\mu_0} \qquad (23.18)$$

aňlatma bilen kesgitlener. Bu ýerde n_0 – atomlaryň (molekulalaryň) konsentrasiýasy, χ'-maddanyň tebigatyna bagly bolan ölçeg birliksiz proportsionallyk koeffisiýent (ähli dielektrikler üçin $\chi' < 0$). (23.17) we (23.18) aňlatmalardan görnüşi ýaly atomlardan durýan diamagnetikler üçin

$$\chi' = -\frac{n_0 e^2 Z < S_1 > \mu_0}{4\pi m}. \tag{23.19}$$

Adatça maddanyň magnit häsiýetlerini aňlatmak üçin magnit kabul edijiligi χ peýdalanylýar. Ol χ' arkaly

$$1 + \chi = \frac{1}{1-\chi'} \quad \text{ýa-da} \quad \chi = \frac{\chi'}{1-\chi'} \tag{23.20}$$

aňlatmalar bilen baglanyşdyrylýar. Diamagnetikler üçin $|\chi'| << 1$ bolýandygyny ($|\chi'| \sim 10^{-6} \div 10^{-5}$) göz öňünde tutsak, χ bilen χ' ululyk deňdir:

$$\chi = -\frac{n_0 e^2 Z < S_1 > \mu_0}{4\pi m}. \tag{23.21}$$

L. D. Landau (1930) erkin elektronlar üçin diamagnetizmiň ýüze çykjakdygyny aýtdy. Bu hadysa Landaunyň diamagnetizmi diýilýär. Bu hadysanyň ýüze çykmagyna hereketdäki elektronlaryň traýektoriýalarynyň magnit meýdanyndaky egrelmesi sebäp bolýar. Elektronlaryň presessiýaly hereketiniň $\vec{B}$ wektoryň ugruna perpendikulýar bolan tekizlige proýeksiýalary ýapyk orbitany emele getirýär. Netijede, elektronlaryň $\vec{B}$ wektoryň tersine ugrukdyrylan orbital magnit momentleri ýüze çykýar.

Daşky magnit meýdanynda $\vec{B}$ wektoryň ugruna magnitlenýän maddalara **paramagnetikler** diýilýär. Paramagnetigiň atomlarynyň (molekulalarynyň ýa-da ionlarynyň) hususy $\vec{P}_m$ magnit momentleri bardyr. Paramagnetiklere Al, Li, Na, V, Pd, Pt, Ti we ş.m. metallar, metal garyndylary, kislorod, azodyň oksidi, marganesiň NnO oksidi, $FeCl_2$ – hlorly demir we başgalar degişlidir.

Daşky magnit meýdany ýok bolanda ýylylyk hereketi bilen atomlaryň magnit momentleriniň tertipsiz ugrukdyrylmagy netijesinde paramagnetik magnitlenmedikdir.

Paramagnetik daşky magnit meýdanynda ýerleşdirilende atomlaryň magnit momentleri $\vec{B}$ wektoryň daşynda presessirlenip başlaýarlar. Netijede, daşky meýdanyň täsiri bilen atomlaryň magnit momentleri bir tarapa ugrugyp başlaýarlar. Paramagnetik daşky meýdanyň ugruna magnitlenýär.

Paramagnetizmiň klassyky teoriýasy P. Lanžewen tarapyndan kämilleşdirildi (1905). Ol induksiýaly birhilli meýdanda molekulýar toklaryň we olaryň magnit momentleriniň özgermelerini statistiki mesele görnüşinde öwrenipdir. Şeýlelikde, paramagnetigiň J magnitlenmesi üçin

$$J = n_0 P_m L(a) \tag{23.22}$$

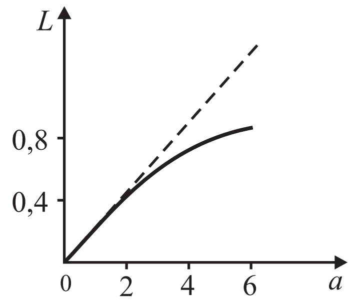
baglanşygy aldy. Bu ýerde $a = P_m B/kT$, k – Bolsmanyň hemişeligi, T – termodinamiki temperatura, n_0 – atomlaryň (molekulalaryň) konsentrasiýasy, $L = f(a)$ funksiýa Lanžeweniň klassyky funksiýasy diýilýär we şeýle kesgitlenýär:

$$L(a) = \mathrm{Cth}a - \frac{1}{a},$$

bu ýerde

$$\mathrm{Cth}a = \frac{[\exp a + \exp(-a)]}{[\exp a - \exp(-a)]}$$

giperboliki kotangens.



23.6-njy çyzgy

$L = f(a)$ funksiýanyň grafigi 23.6-njy çyzgyda görkezilýär. $a >> 1$ bolanda $L \approx 1$ bolýar, ýagny ähli atomlaryň magnit momentleri meýdana ugurdaş ýerleşýärler we daşky meýdanyň induksiýasynyň artmagy J magnitlenmäni artdyryp bilmeýär. Bu hala paramagnetigiň doýgun magnitlenen haly diýilýär. Bu haly pes temperaturalarda we örän güýçli magnit meýdanlarynda (meselem, $T = 300$ K, $a = 1$, $B = 100$ Tl) alyp bolýar. Adatça $a >> 1$ we $L(a) \approx a/3$ töweregi bolýar.

Şonuň üçin pes magnit meýdanlarynda izotrop paramagnetigiň magnitlenmesi meýdanyň magnit induksiýasyna proporsionaldyr:

$$J = \frac{n_0 P_m^2 B}{3kT}, \tag{23.23}$$

bu ýerde

$$\chi' = \frac{n_0 P_m^2 \mu_0}{3kT}.$$

Paramagnetikler üçin χ' položiteldir we örän kiçi baha (10^{-5} bilen 10^{-3} aralygynda) eýedir. Şu sebäbe görä χ' magnit kabul edijiligi χ-dan kän tapawutlanmaýar. Onda

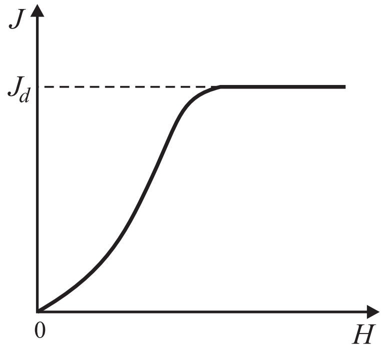
$$\chi = \frac{n_0 P_m^2 \mu_0}{3kT}, \tag{23.24}$$

Bu gatnaşyk Kýuriniň kanunyny (1895) aňladýar. Paramagnetigiň magnit syzyjylygy termodinamiki temperatura ters proporsionaldyr.

23.5. Ferromagnetikler

Ferromagnetikler toparyna girýän magnetikler daşky meýdanyň täsiri ýok wagty hem magnitli bolmaga ukyplydyrlar. Ferromagnetiklere arassa demir, nikel, kobalt, godoliniý, olaryň garyndylary we birleşmeleri, hromyň we marganesiň käbir birleşmeleri degişlidir. Ferromagnetizm, esasan kristal halyndaky maddalarda ýüze çykýar. Häzirki wagtda suwuk halyndaky magnetikler öwrenilýär we giňden ulanylýar.

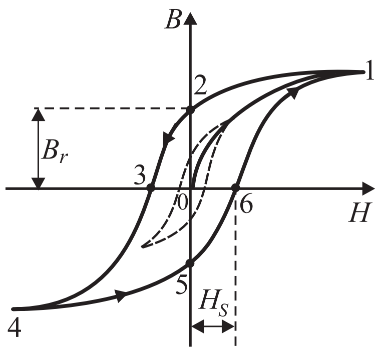
Gowşak magnitli diamagnetiklerde we paramagnetiklerde magnitlenme daşky meýdanyň induktsiýasyna göni proporsional bolsa, ferromagnetikler üçin bu baglanşyk örän çylşyrymly. Başdaky magnit momenti nola deň bolan ferromagnetik üçin magnitlenmäniň egri çyzygy 23.7-nji çyzgyda görkezilendir. Ondaky baglanyşyga magnitlenmäniň esasy egrisi diýilýär. Görnüşi ýaly, güýjenmäniň uly bahalarynda ($H \sim 100\,A/m$) magnitlenme J özüniň doýgun bahasyny alýar. $B = f(H)$ baglanşyk üçin magnitlenmäniň esasy egri çyzygyna 23.8-nji diagrammadaky 0-1 egri çyzygy degişlidir. H we J (hem-de H we B) baglanyşyklaryň



23.7-nji çyzgy

$$B = \mu_0(H + J)$$

göni dällikden başga-da, gisterezis halkasyny emele getirmek häsiýeti bardyr. Eger magnitlenmäni doýgun halyna (*23.8-nji çyzgynyň* 1 nokady) ýetirsek we soňra magnit meýdanyň güýjenmesini peseltsek, onda B induksiýa 0-1 egri çyzyk bilen peselmän, 1-2 egri çyzyk boýunça peselýär. Netijede daşky meýdanyň güýjenmesi nola deň bolsa-da, magnit induksiýasy nola deň bolman, B_r baha deň bolýar. Muňa galyndy induksiýa diýilýär. Bu nokada degişli J_r magnitlenmä galyndy magnitlenme diýilýär.

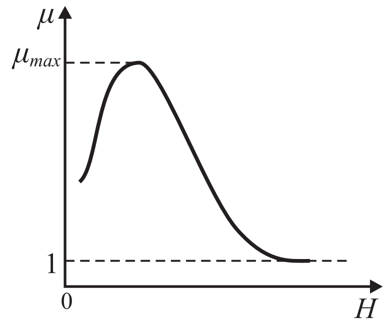


23.8-nji çyzgy

Garşylykly tarapa ugrukdyrylan güýjenmämiň käbir H_S bahasynda induksiýa nola deň bolýar. H_S güýjenmä **koersitiw güýç** diýilýär. Galyndy magnitlenmäniň bolmagy hemişelik magnitleri taýýarlamaga mümkinçilik berýär. Hemişelik magnitiň ugrukdyrylan magnit momentleri bardyr we töwereginde magnit meýdanyny döredip bilýär. Materialyň koersitiw güýji näçe uly bolsa, ondan ýasalan hemişelik magnit şonça-da özüniň magnit häsiýetlerini uzak wagtlap saklamaga ukyplydyr.

Ferromagnetige üýtgeýän magnit meýdany täsir etdirilende magnit induksiýasy gisterezisiň halkasy diýilip atlandyrylýan 1-2-3-4-5-1 egri çyzyklar boýunça üýtgeýär. Meýdanyň güýjenmesiniň iň uly bahasy magnitlenmäniň doýgun bahasyny almaga ýeterlik bolanda gisterezisiň iň uly halkasy emele gelýär. Eger H-yň amplituda bahasy doýgun hala ýeterden kiçi bolsa, onda kiçi, aýratyn halka emele gelýär. Beýle halkalara aýratyn aýlawlar diýilýär.

Gisterezisiň halkasy B bilen H arasynda anyk baglanşyk almaga mümkinçilik bermeýär. Bu baglanşyk ferromagnetigiň başky ýagdaýyna, ýagny öň nähili meýdanlarda bolandygyna bagly bolýar. Şeýle bolansoň ferromagnetikler üçin magnit syzyjylygy diýen düşünje diňe magnitlenmäniň esasy egri çyzygy üçin ulanylýar. Ferromagnetigiň μ magnit syzyjylygy (şeýle hem magnit kabul edijiligi) meýdanyň güýjenmesine bagly üýtgeýär. 23.9-njy çyzgyda μ bilen H baglanyşygy görkezilendir. Magnit meýdanynyň güýjenmesiniň doýgun baha degişli bahalardan pesräk bahalarda μ magnit syzdyryjylygy iň uly baha eýe bolýar. H-yň bahasy artsa μ-nyň bahasy asimptotik üýtgemek bilen bire golaýlaşýar. B_r, J_r, H_S we $\mu_{\max}$ ululylar ferromagnetigiň esasy häsiýetnamalarydyr. Eger H_S koersitiw güýç uly bolsa ferromagnetige berk (gaty) feromagnetik diýilýär. Onuň **gisterezisiniň halkasy** inli bolýar.



23.9-njy çyzgy

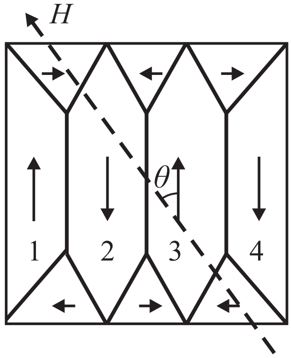
Koersitiw güýji kiçi bolan ferromagnetiklere, ýumşak ferromagnetikler diýilýär. Hemişelik magnitleri ýasamak üçin berk ferromagnetikler, transformatorlaryň serdeçniklerini we beýleki üýtgeýän toguň meýdanynda işlemek üçin serdeçnikleri ýasamak üçin bolsa ýumşak ferromagnetikler ulanylýar.

Ferromagnetik kesgitli bir temperaturada özüniň ferromagnit häsiýetlerini ýitirýär. Bu temperatura **Kýuriniň nokady** diýilýär. Ol demir üçin 768°C, nikel üçin 365°C deňdir. Kýuriniň nokadyndan ýokarky temperaturalarda ferromagnetikler özüni adaty paramagnetikler ýaly alyp barýarlar. Eger temperatura Kýuriniň nokadyndan peseldilse, olarda ýene-de ferromagnit häsiýetleri ýüze çykýar.

Amperiň çaklamasyna görä, islendik maddada elektronlaryň atomlardaky we molekulalardaky hereketi zerarly emele gelýän mikroskopik toklar bardyr. Bu mikroskopik molekulýar toklar özleriniň magnit meýdanlaryny döredýärler we daşky magnit meýdanynyň täsiri bilen öwrülmäge ukyplydyrlar. Diýmek, madda daşky magnit meýdany täsir etdirilende, ondaky meýdana içki we daşky meýdanlaryň jemi ýaly seredilmelidir. Netijeleýji meýdanyň induksiýasynyň wektory daşky magnit meýdanynyň B_0 induksiýasynyň we mikrotoklaryň döreden B' induksiýasynyň wektorlaýyn jemine deňdir. Ferromagnetizmiň bu teoriýasyna molekulýar tokly teoriýa diýilýär.

Ferromagnetizmiň kwant-mehaniki teoriýasy 1928-nji ýylda Ý. I. Frenkel we W. Geýzenberg tarapyndan döredildi. Bu teoriýa laýyklykda ferromagnetikleriň magnit häsiýetlerini elektronlaryň hususy (spin) magnit momentleri döredýär. Käbir kesgitli şertlerde kristallarda alyş-çalyş güýçleri diýilýän güýçler ýüze çykýar we olar elektronlaryň magnit momentleriniň özara parallel bir ugra ugrukdyrylmagyny üpjün edýär. Netijede, **domen** diýilip atlandyrylýan spontan (erkana) magnitlenen oblastlar ýüze çykýar. Her bir domeniň çäginde ferromagnetik doýgun hala çenli magnitlenen bolýar we özüniň kesgitli magnit momentini döredýär. Magnit momentleriniň ugurlary dürli domenlerde dürli taraplara ugrukdyrylandyr (*23.10-njy çyzgy*) we ferromagnetige daşky magnit meýdan täsir etmedik bolsa, onuň magnit momentleriniň jemi nola deňdir. Domenleriň ölçegleri 1 ÷ 10 *mkm* töweregidir.

Daşky magnit meýdanynyň domenlere täsiri magnitlenmäniň dürli etaplarynda dürlüdir. Gowşak daşky meýdanyň täsiri bilen domenleriň çákleriniň süýşmesi, netijede bolsa magnit momentleri H bilen, kiçi θ burç emele getirýän domenleriň beýlekileriň hasabyna ulalmasy bolup geçýär. Meselem, 2 we 4 domenleriň hasabyna 1 we 3 domenler ulalýarlar. Magnit meýdanynyň güýjenmesiniň ulalmagy bilen bu proses tä kiçi θ burç emele getirýän domenler beýleki domenleri özüne doly birikdirýänçä dowam edýär. H-yň ulalmagy bilen domenleriň magnit momentleriniň, parallelligini saklap, $\vec{H}$ wektoryň ugruna öwrülmesi bolup geçýär. Bu öwrülme doly öwrülişikli däldir. Bu bolsa gisterezisiň döremegine sebäp bolýar. Magnit meýdanynyň güýjenmesiniň mundan soňky artmagy bolsa ýylylyk energiýasynyň täsiri bilen meýdanyň ugruna öwrülip bilmän galan az sanly magnit momentleriniň öwrülmegine getirýär.



23.10-njy çyzgy

Käbir halatlarda alyş-çalyş güýçleri antiferromagnetikleriň (hrom, marganes we başg.) ýüze çykmagyna hem getirýär. Antiferromagnetiklerde elektronlaryň hususy magnit momentleri özara antiparallel ýerleşendir. Goňşy atomlar hem şu görnüşde ýerleşýärler. Netijede, antiferromagnetikleriň magnit syzyjylygy örän kiçidir we özlerini gowşak paramagnetikler ýaly alyp barýarlar. Antiferromagnetikler üçin hem spinleriň agzalan oriýentasiýasynyň ýitýän T_N temperaturasy bardyr. Bu temperatura **Neýeliň nokady** diýilýär. Käbir maddalar (erbiý, disproziý, marganesiň we misiň garyndylary) üçin bu temperatura ikidir. Bu maddalar şu iki temperaturanyň arasynda antiferromagnetik häsiýetleri ýüze çykarýarlar.Ýokarky nokatdan ýokarda bu antiferromagnetikler paramagnit halyna geçýärler. Aşaky nokatdan aşakda bolsa olar ferromagnetiklerdir.

Käbir maddalaryň atomlarynyň magnit momentleri biri-birine garşylykly ikileýin gözenekler ýa-da ondan-da çylşyrymly gözenek ülüşlerini emele getirýärler. Gözenek ülüşleriniň netijeleýji magnit momentleriniň noldan tapawutly bolmagy maddanyň erkana magnitlenmegine getirýär. Bu maddalara ferrimagnetikler diýilýär. Olara Fe_2O_3 demriň okisiniň beýleki metallar bilen himiki birleşmeleri bolan ferritler girýärler. Ferritler, adatça, geçirijiligi boýunça ýarymgeçirijileriň ýa-da dielektrikleriň häsiýetlerini ýüze çykarýarlar. Bu aýratynlyk olary radiotehnikada, radioelektronikada, kompýuterlerde magnit materialy hökmünde ulanmaga mümkinçilik berýär. Amorf maddalaryň käbirleri hem täsin magnit häsiýetlerini ýüze çykarýar. Amorf jisimleriň belli wekilleriniň biri aýnadyr. Şu sebäpli ferromagnit häsiýetlerini ýüze çykarýan amorf maddalara spinli aýnalar ýa-da metal aýnalar diýilýär. Metal aýnalaryň düzüminde 80%-e çenli elementleriň periodik sistemasynda geçiş elementlere degişli maddalar ýa-da gymmatbaha metallar bolmak bilen, galan bölegini aýna emele getiriji häsiýeti bolan ýarym walentli metal däl elementler (B, C, Ni, Si, Ge we başg.) düzýärler. Bulara ikileýin garyndylar ($Au_{81}Si_{19}$, $Pd_{81}Si_{19}$, $Fe_{80}B_{20}$ we başg.), 3-5 we ondanda köp düzüjilerden durýan garyndylar mysal bolup biler. Bu maddalary amorf halda almak üçin dürli usullar ulanylýar.

Metal aýnalaryň häsiýetlerini öwrenmek jisimleriň metal, magnit we beýleki häsiýetleriniň tebigatyny öwrenmäge mümkinçilik berýär. Bu maddalaryň poslamaga ýokary durnuklylygy, berkligi we maýyşgaklygy olaryň tehnikada giňden ulanylmagyna mümkinçilik berýär.

Magnit metallary tehnikanyň dürli pudaklarynda – energetikada, aragatnaşykda, awtomatikada, elektronikada we başgalarda giňden ulanylýar. Soňky ýyllarda dünýä boýunça konstruksion we elektrotehniki poladyň, pes we ýokary koersitiw magnit materiallaryň önümçiligi üznüksiz ösýär. Häzirki döwürde magnit sistemalary, şol sanda hemişelik magnitli sistemalary ulanmaýan tehnikanyň pudagyny tapmak kyn.

Örän uly udel garşylygy we üýtgeşik magnit häsiýetleri bolan ferritler magnit sistemalarynda uly orun tapýar. Olar hemişelik magnitleri taýýarlamakda, ferrit antennalarynda, radioýygylykly konturlaryň serdeçniklerinde, kompýuterleriň operatiw ýatlarynyň elementlerinde we beýleki gurluşlarda giňden ulanylýar.

XXIV BAP. ELEKTROMAGNIT MEÝDANY ÜÇIN MAKSWELLIŇ TEORIÝASYNYŇ ESASLARY

24.1. Köwlenme elektrik meýdany. Makswelliň birinji deňlemesi

Köpsanly tejribeleriň maglumatlaryny umumylaşdyrmak bilen **Faradeý** kontur bilen baglanyşykly magnit akymynyň induksiýasy üýtgände hemişe induksion tok ýüze çykýar diýen netijä gelýär. Induksion toguň ululygynyň, magnit induksiýasynyň akymynyň üýtgediliş usulyna bagly däl-de, diňe onuň üýtgeýiş tizligine baglydygy tejribeler arkaly anyklanandyr.

Makswell üýtgeýän magnit meýdanynda hereketsiz duran geçiriji kontur üçin elektromagnit induksiýa kanunyny umumylaşdyrdy. Bu ýagdaýda Lorens güýjüniň täsirini ulanmak bolmaz. Sebäbi hereketsiz zarýadlara bu güýç täsir etmeýär. Induksion toguň ýüze çykmagy magnit meýdany tarapyndan köwlenme elektrik meýdanynyň (elektrostatik däl) döredilýändigi bilen düşündirilýär.

Induksiýanyň EHG-si üçin

$$\mathscr{E}_{ind} = \oint\limits_{(L)} \vec{E}\, d\vec{l} \qquad \text{we} \qquad \mathscr{E}_{ind} = -\int\limits_{(S)} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}$$

formulalar alyndy. Bu ýerden

$$\oint\limits_{(L)} \vec{E}\, d\vec{l} = -\int\limits_{(S)} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}. \tag{24.1}$$

Bu deňlemä **Makswelliň integral görnüşdäki birinji** deňlemesi diýilýär. Bu ýerde $d\vec{S} = dS\vec{n}$; $\vec{n}$ – L üznüksiz kontura dartylýan S üstüň dS tükeniksiz kiçi elementine normal boýunça goýlan birlik wektor. Bu deňlemeden görnüşi ýaly, geçirjiniň materialy onda elektrik meýdanynyň induktirlenmegine hiç hili täsir etmeýär. Şonuň üçin Makswell elektromagnit induksiýa kanuny diňe bir geçiriji kontur üçin däl-de, üýtgeýän magnit meýdanynda alnan islendik hyýaly kontur üçin hem dogrudyr diýen pikiri öňe sürdi. Diýmek, geçirji konturyň barlygyna ýa-da ýoklugyna garamazdan, üýtgeýän magnit meýdan bilen induktirlenen **köwlenme elektrik meýdany** bardyr.

Bu köwlenme elektrik meýdanynyň häsiýetli aýratynlygy bardyr, ýagny onuň $\vec{E}$ güýjenme wektorynyň sirkulýasiýasy elektromagnit meýdanynda alnan islendik hyýaly kontur boýunça dartylýan S üstden geçýän magnit akymynyň üýtgeýiş tizliginiň ters alamaty bilen alnan bahasyna deňdir.

Stoksyň teoremasyna görä

$$\oint\limits_{(L)} \vec{E}\, d\vec{l} = \oint\limits_{(S)} \mathrm{rot}\vec{E}\, d\vec{S}.$$

Bu deňlemäni (24.1) deňleme bilen deňeşdirip alarys:

$$\mathrm{rot}\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}. \tag{24.2}$$

Muňa **Makswelliň differensial görnüşdäki birinji** deňlemesi diýilýär.

24.2. Süýşme togy. Makswelliň ikinji deňlemesi

Elektrik meýdanyny hem elektrik togy ýaly, magnit meýdanynyň çeşmesi hökmünde kabul edip, Makswell doly toguň kanunyny umumylaşdyrdy. Üýtgeýän elektrik meýdanynyň magnit täsirini mukdar taýdan häsiýetlendirmek üçin Makswell süýşme togy diýen düşünjäni girizdi. S meýdanly ýapyk üstden geçýän süýşme akymy üçin Gaussyň teoremasy esasynda alarys:

$$\Phi_e = \oint\limits_{(S)} \vec{D}\, d\vec{S} = q^{erk}, \tag{24.3}$$

bu ýerde q^{erk}, bu S meýdanly ýapyk üstdäki erkin elektrik zarýadlarynyň algebraik jemi. Bu deňligi wagta görä differensirläp alarys:

$$\frac{dq^{erk}}{dt} = \frac{d\Phi_e}{dt} = \frac{d}{dt}\oint_{(S)} \vec{D}d\vec{S}.$$

Eger S meýdanly üst deformirlenmeýän we gozganmaýan bolsa, onda bu üsti kesip geçýän süýşmäniň akymy $\vec{D}$ wektoryň wagta görä üýtgemesi bilen kesgitlenilýär.

Şonuň üçin deňligiň sag tarapyndaky doly önümi hususy önüm bilen çalşyryp, integralyň içinde almak bolar:

$$\frac{dq^{erk}}{dt} = \oint_{(S)} \frac{\partial\vec{D}}{\partial t}d\vec{S}.$$

Deňligiň sag tarapynyň ölçeg birligi tok güýjüniň ölçeg birligi bilen gabat gelýär. Bu formulany I tok güýji bilen j toguň dykyzlygyny baglanyşdyrýan

$$I = \int_{(S)} \vec{j}d\vec{S} = \int_{(S)} j_n dS$$

formula bilen deňeşdireliň. Bu ýerden $\frac{\partial\vec{D}}{\partial t}$-niň ölçeg birliginiň toguň dykyzlygynyň ölçeg birligi bilen gabat gelýändigi görünýär. Makswell $\frac{\partial\vec{D}}{\partial t}$ ululygy süýşme toguň dykyzlygy diýip belledi:

$$\vec{j}_{sm} = \frac{\partial\vec{D}}{\partial t}.$$

Giňişligiň berlen nokadynda süýşmäniň elektrik wektorynyň üýtgeýiş tizligi süýşme toguň dykyzlygyna deňdir.

Islendik S meýdanly üstden geçýän süýşme toguň dykyzlyk wektorynyň akymyna deň bolan fiziki ululyga bu üstden geçýän süýşme togy diýilýär:

$$I_{sm} = \int_{(S)} \vec{j}_{sm}\, d\vec{S} = \oint_{(S)} \frac{\partial\vec{D}}{\partial t}d\vec{S}. \qquad (24.4)$$

Süýşme togy düşünjesiniň girizilmegi bilen ýapyk zynjyr diýen düşünjä täze bir garaýyş döredi. Belli bolşy ýaly, hemişelik toguň zynjyry ýapyk bolmaly, ýogsam tok akmaýar. Üýtgeýän toguň zynjyry üçin bu şert hökman däldir. Meselem, üýtgeýän toguň kondensatorly zynjyryndan tok geçýär. Kondensatoryň obkladkalarynyň arasynda bolsa, mälim bolşy ýaly, dielektrik bardyr we ol zynjyry üzýär. Beýle zynjyryň bütewiligini süýşme togy üpjün edýär.

Süýşme togy hem adaty toklar ýaly köwlenme magnit meýdanynyň çeşmesidir. H güýjenmäniň ýapyk kontur boýunça sirkulýasiýasy nola deňdir diýip Makswell düşündirdi.

Dielektriklerde elektrik süýşmesiniň $\vec{D}$ wektory iki düzüjiden ybarat:

$$\vec{D} = \varepsilon_0\vec{E} + \vec{P}.$$

Bu ýerde ikinji düzüji $\vec{P}$ – polýarlanma wektory. Ol polýarlanmadyk molekulalaryň hakyky elektrik süýşmesini we dielektrigiň birlik göwrüminde ýerleşýän polýar molekulalaryň öwrülmelerini häsiýetlendirýär.

Dielektrikde süýşme togunyň dykyzlygy

$$\vec{j}_{sm} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{dt} + \frac{\partial \vec{P}}{\partial t}.$$

Bu ýerde birinji düzüjä wakuumdaky süýşme togunyň dykyzlygy diýilýär. Ikinji düzüji bolsa polýarlanma togunyň dykyzlygydyr:

$$\vec{j}_{sm}^{wak} = \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{dt}, \qquad \vec{j}_{pol} = \frac{d\vec{P}}{dt}, \tag{24.5}$$

bu ýerde $\vec{j}_{pol}$ – dielektrikde polýarlanmanyň üýtgemegi bilen baglanşykly zarýadlaryň tertipleşmegi netijesinde ýüze çykýan toguň dykyzlygy.

Süýşme togy geçirijilik tokdan tapawutlykda Joul-Lensiň ýylylygyny bölüp çykarmaýar. Umuman alnanda, geçirijilik togy we süýşme togy giňişlikde biri-birinden bölünen däldir. Hemme toklar şol bir göwrümdedir. Geçiriji we konweksion toklary hem-de süýşme toguny jemläp, doly tok diýen düşünjäni girizmek bolýar.

Doly toguň deňlemesiniň sag tarapyna bütewi L kontura dartylan S üstden geçýän süýşme toguny goşup, bu kanuny Makswell umumylaşdyrdy:

$$\oint_{(L)} \vec{H} d\vec{l} = I_{makro} + I_{sm}. \tag{24.6}$$

Bu deňleme Makswelliň ikinji deňlemesiniň integral görnüşidir. Bu deňligiň manysyny kesgitli görnüşde ýazalyň.

Elektromagnit meýdanynda alnan islendik L hyýaly bütewi konturyň magnit meýdanynyň $\vec{H}$ güýjenmesiniň sirkulýasiýasy mikrotoklaryň we ol kontura dartylan üstden geçýän süýşme togunyň algebraik jemine deňdir. Bu kesgitleme Makswell tarapyndan kesgitlenilen **elektromagnit induksiýa kanunydyr**.

Doly toguň dykyzlygy:

$$\vec{j}_{dol} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

formula bilen kesgitlenýär.

$$\oint_{(L)} \vec{H} d\vec{l} = \int_{(S)} \vec{j}_{dol}\, d\vec{S}$$

deňlikden we

$$\oint_{(L)} \vec{H} d\vec{l} = \int_{(S)} \mathrm{rot}\vec{H}\, d\vec{S}$$

görnüşdäki Stoksyň teoremasyndan peýdalanyp alarys:

$$\mathrm{rot}\vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}.$$

Bu deňlige **Makswelliň differensial görnüşdäki ikinji deňlemesi** diýilýär.

Mikrotoklaryň ýok giňişlikleri üçin Makswelliň differensial görnüşdäki birinji we ikinji deňlemeleri şeýle görnüşde bolar:

$$\mathrm{rot}\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \qquad \mathrm{rot}\vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}. \tag{24.7}$$

Bu ýerde Makswelliň birinji deňlemesiniň sag tarapyndaky minus alamaty Lensiň düzgüni bilen baglanyşyklydyr.

Soňky deňliklerden şeýle netijä gelmek bolar: **üýtgeýän elektrik we magnit meýdanlary biri-biri bilen üznüksiz baglydyr we bütewilikde elektromagnit meýdanyny emele getirýärler.**

24.3. Makswelliň üçünji we dördünji deňlemeleri

Gaussyň teoremasyny (24.3) Makswell elektrostatik meýdan üçin umumylaşdyrdy. Durnukly elektrik meýdany bolsun, üýtgeýän elektrik meýdany bolsun, islendik elektrik meýdany üçin bu teorema dogrudyr diýen çaklamany Makswell öňe sürdi. Bu esasda **Makswelliň üçünji deňlemesi integral görnüşde şeýle ýazylýar:**

$$\oint_{(S)} \vec{D}d\vec{S} = q^{erk} \quad \text{ýa-da} \quad \oint_{(S)} \vec{D}d\vec{S} = \int_{(V)} \rho dV. \tag{24.8}$$

Bu ýerde ρ – erkin zarýadlaryň göwrümleýin dykyzlygy. Deňligiň sag tarapyndaky integral S ýapyk üst bilen çäklendirilen V göwrüm boýunça alynýar.

Makswelliň üçünji deňlemesiniň şeýle manysy bardyr: **Elektromagnit meýdanynda alnan hereketsiz islendik ýapyk hyýaly üst boýunça geçýän süýşme akymy bu üst bilen çäklenen göwrüm giňişliginiň içinde ýerleşen erkin zarýadlaryň jemine deňdir.**

Gaussyň teoremasyny islendik magnit meýdany üçin umumylaşdyryp, Makswell **integral görnüşdäki dördünji deňlemäni** aldy:

$$\oint_{(S)} \vec{B}d\vec{S} = 0. \tag{24.9}$$

Gaussyň teoremasyndan peýdalanyp, Makswelliň integral görnüşdäki

$$\oint_{(S)} \vec{D}d\vec{S} = \int_{(V)} \rho dV$$

deňlemelerini differensial görnüşe getirmek bolar. **Makswelliň üçünji** we **dördünji deňlemeleri differensial görnüşde** aşakdaky ýaly bolar:

$$\mathrm{div}\vec{D} = \rho, \qquad \mathrm{div}\vec{B} = 0.$$

Onda, dört deňlemeden durýan Makswelliň deňlemeler sistemasyny differensial görnüşde şeýle ýazmak bolar:

$$\mathrm{rot}\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \qquad \mathrm{div}\vec{D} = \rho;$$

$$\mathrm{rot}\vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; \qquad \mathrm{div}\vec{B} = 0. \tag{24.10}$$

Segnetoelektrik däl we ferromagnit däl izotrop sredalar we Omuň kanunyna boýun egýän makrotoklar üçin $\vec{D}, \vec{E}, \vec{B}, \vec{H}$ we $\vec{j}$ deňlikler aşakdaky görnüşde ýazylýar:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}, \qquad \vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}, \qquad \vec{j} = \gamma \vec{E}.$$

Bu ýerde ε_0 we μ_0, degişlilikde elektrik we magnit hemişelikleri, ε we μ – sredanyň berlen nokady üçin otnositel dielektrik we magnit syzyjylygy, γ – sredanyň udel elektrik geçirijiligi.

Eger elektrik we magnit meýdanlary hemişelik bolsa, ýagny

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = 0, \tag{24.11}$$

onda bu meýdanlaryň biri-biri bilen baglanşyksyz boljakdygy Makswelliň deňlemelerinden görünýär. Onda elektrik meýdanyny

$$\mathrm{rot}\vec{E} = 0, \qquad \mathrm{div}\vec{D} = \rho \tag{24.12}$$

deňlemeler bilen, magnit meýdanyny bolsa

$$\mathrm{rot}\vec{H} = \vec{j}, \qquad \mathrm{div}\vec{B} = 0 \tag{24.13}$$

deňlemeler bilen ýazmak bolar.

24.4. Makswelliň doly deňlemeler sistemasy

Makswelliň doly deňlemeler sistemasy integral görnüşde şeýle ýazylýar:

$$\oint_{(L)} \vec{E} d\vec{l} = -\int_{(S)} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}; \qquad \oint_{(S)} \vec{D} d\vec{S} = \int_{(V)} \rho dV; \tag{24.14}$$

$$\oint_{(L)} \vec{H} d\vec{l} = \int_{(S)} \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}; \qquad \oint_{(S)} \vec{B} d\vec{S} = 0.$$

Eger zarýadlar we toklar giňişlikde üznüksiz ýaýran bolsa, onda bu deňlemelerden hem Makswelliň differensial deňlemelerinden gelip çykýan netije ýaly netije çykýar. (24.12), (24.13) we (24.14) deňlemelere salgylanyp, elektrik we magnit meýdanlarynyň häsiýetleriniň düýpli tapawutlydygyna göz ýetirmek bolýar. Elektrostatik meýdanyň rotory nola deň. Diýmek, **elektrik meýdany potensial meýdandyr we skalýar potensial** bilen häsiýetlendirilip bilner. Toguň bar bolan nokatlarynda magnit meýdanynyň rotory nola deň däl. Degişlilikde, $\vec{B}$ wektoryň sirkulýasiýasy konturyň toguna göni proporsional. Şu sebäplere görä magnit meýdanyna skalýar potensial hökmünde seretmek bolmaz. Bu skalýar potensial kontur boýunça doly aýlaw edilende $\mu_0 I$ ululyga üýtgär. Rotory noldan tapawutly bolan meýdana köwlenme ýa-da solenoidal meýdan diýilýär.

$\vec{B}$ wektoryň hemme ýerde diwergensiýasynyň nola deň bolýanlygy sebäpli, ony käbir A funksiýanyň rotory ýaly ýazmak bolar:

$$\vec{B} = \mathrm{rot}\vec{A}.$$

Rotoryň diwergentsiýasy hemişe nola deňdir. Bu ýerde $\vec{A}$ funksiýa magnit meýdanynyň **wektorly potensialy** diýilýär.

Makswelliň deňlemeleri dynçlykdaky sredadaky elektrik we magnit meýdanlary üçin hem umumy deňlemelerdir. Olaryň elektromagnetizm taglymatyndaky oýnaýan roluny mehanikadaky Nýutonyň kanunlarynyň ähmiýeti bilen deňeşdirmek bolar. Üýtgeýän magnit meýdany hemişe özüni döredýän elektrik meýdany, üýtgeýän elektrik meýdany bolsa özüni döredýän magnit meýdany bilen baglydyr. Elektrik we magnit meýdanlary biri-biri bilen üznüksiz baglydyr we olaryň bileligi elektromagnit meýdanyny döredýär.

Elektromagnit hadysalary ähli inersial sistemalarda meňzeş geçýär, ýagny otnositellik prinsipini kanagatlandyrýar. Şeýle bolansoň bir inersial sistemadan beýleki inersial sistema geçilende Makswelliň deňlemeleri görnüşini üýtgetmeýär. Olar relýatiwistik inwariant deňlemelerdir. Elektromagnit hadysalary üçin otnositellik prinsipiniň ýerine ýetmegi giňişlik we wagt baradaky klassyky düşünjeler bilen ylalaşmaýar. Bu ylalaşyksyzlyk ýörite otnositellik teoriýasynyň döremegine getirdi. Giňişlik koordinatalary we wagt, $\vec{E}, \vec{H}, \vec{D}$ we $\vec{B}$ wektorlar, toguň dykyzlygy $\vec{j}$ we zarýadyň dykyzlygy ρ **Lorensiň özgertmesi** esasynda üýtgese, **Makswelliň deňlemeleri** täze inersial hasaplaýyş sistemasyna geçilende görnüşini üýtgetmeýär. Makswelliň deňlemeleriniň relýatiwistik inwariant formada bolmagy elektrik we magnit meýdanlarynyň bütewi bir zatdygyny (birligini) görkezýär.

Makswelliň deňlemeleri ummasyz köp hadysalar üçin ulanylýar. Olar elektrotehnikanyň, radiotehnikanyň esasy bolup durýar we fizikanyň aktual ugurlary bolan plazma fizikasynda, sazlanylýan termoýadro sintezinde, magnit gidrodinamikasynda, yşykly optikada, zarýadly bölekleri tizlendirijileri konstruirlemekde, astrofizikada aýgytly orun eýeleýär. Kwant effektleri ýüze çykyp başlaýan ýokary ýygylykly elektromagnit tolkunlary üçin Makswelliň deňlemeleri ulanarly däldir.

XXV BAP. ELEKTROMAGNIT YRGYLDYLARY

25.1. Kwazistasionar tok

Üýtgeýiş çaltlygy ýokary bolmadyk, pursatlaýyn bahalary üçin hemişelik toguň kanunlary (Omuň kanuny, Kirhgofyň düzgünleri we başg.) ýerine ýetýän üýtgeýän toga **kwazistasionar tok** diýilýär. Kwazistasionar toguň şahalanmaýan zynjyrynyň ähli kese-kesiklerinde hemişelik tokdaky ýaly deň tok güýçleri bardyr. Ýöne kwazistasionar toguň hasabynda toguň üýtgemesi sebäpli ýüze çykýan induksiýanyň EHG-sini hasaba almak zerurdyr.

Berlen üýtgeýän togy kwazistasionar diýip kabul etmek üçin kwazistasionarlyk şerti ýerine ýetmelidir. Ol şerte görä, üýtgeýän tok üçin zynjyryň geometrik ölçegleri öwrenilýän toguň tolkun uzynlygyndan kiçi bolmalydyr. 50 *Gs* senagat ýygylykly tok üçin degişli tolkun uzynlyk 6000 *km* töweregi bolýar. Diýmek, senagat ýygylykly togy kwazistasionar hasaplap bolar.

Gelejekde, elektromagnit yrgyldylary öwrenilende toklar kwazistasionar hasaplanylar.

25.2. Üýtgeýän tok. Üýtgeýän toguň alnyşy we esasy häsiýetnamalary

Wagtyň geçmegi bilen üýtgeýän toguň ululygy, ugry üýtgeýär. Adatça, tehnikada bir periodyň dowamyndaky tok güýjüniň we naprýaženiýanyň orta bahalary nola deň bolan periodiki toga **üýtgeýän tok** diýilýär. Üýtgeýän toguň güýjüniň we naprýaženiýesiniň üýtgeýşi gaýtalanyp durýar. Bu gaýtalanmanyň bolýan wagtyna T period diýilýär. Perioda ters ululyga $\left(f = \frac{1}{T}\right)$ **ýygylyk** diýilýär. Ýygylygyň ölçeg birligi: gers (*Gs*). Türkmenistanda ulanylýan üýtgeýän toguň standart tehniki ýygylygy 50 *Gs*-dir.

Senagatda, esasan, naprýaženiýesi we tok güýji sinusyň (ýa-da kosinusyň) kanuny bilen üýtgeýän tok ulanylýar. Bu toga **sinusoidal tok** diýilýär.

Senagat ýygylykly üýtgeýän tok elektrostansiýalarda generatorlaryň (öndirijileriň) kömegi bilen alynýar. Olarda elektromagnit induksiýa hadysasy ulanylýar. Generatorda mehaniki energiýa üýtgeýän toguň elektrik energiýasyna öwrülýär.

Üýtgeýän toguň generatory hereketsiz, stator diýilýän bölekden we aýlanýan **rotordan** durýar. Stator boş silindr görnüşinde bolýar we ýuka listler görnüşindäki ferromagnit materiallardan ýasalýar. Onuň ýörite joýajyklarynda izolirlenen sim sargylary ýerleşdirilýär. Ol sargylaryň uçlarynda induksiýanyň EHG-si ýüze çykýar.

Rotor hemişelik tok bilen magnitlendirilýän, aýlanyp bilýän elektromagnitdir. Oňa hemişelik tok wala berkidilen mis halkalaryň kömegi bilen berilýär.

Jemläp aýdanymyzda, rotor üýtgeýän magnit meýdanyny döredýär, statoryň sarymlarynyň uçlarynda bolsa sinusoidal tok ýüze çykýar. Toguň ýygylygy rotoryň aýlaw ýygylygyna göni proporsionaldyr.

Sinusoidal toguň EHG-si

$$e = E_m \sin(\omega t + \varphi)$$

deňleme bilen ýazylýar. Bu ýerde E_m – EHG-niň amplituda bahasy, $\omega = \frac{2\pi}{T}$ – aýlaw ýygylyk, φ – başlangyç faza, e – EHG-niň pursatlaýyn bahasy.

25.3. Üýtgeýän toguň yzygider zynjyrlary

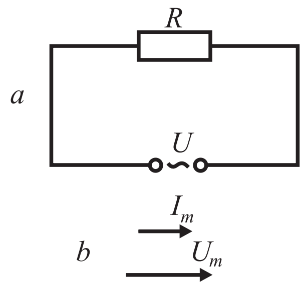
Üýtgeýan toguň zynjyrynda toguň we napräženiýanyň täsir ediji (effektiw) (I, U) bahalaryndan peýdalanylýar. Bu ululyklar toguň ýylylyk döredijilik ukyby boýunça alnan ululyklardyr. Meselem, üýtgeýän tok geçirijini $5A$ hemişelik tok ýaly gyzdyrýan bolsa, üýtgeýän toguň täsir ediji bahasy $5A$ hasaplanýar.

1. *R* garşylykly üýtgeýän toguň zynjyry. Zynjyra $u = U_m \cos\omega t$ naprýaženiýe goýlan bolsa (*25.1-nji a çyzgy*):

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R}\cos\omega t = I_m \cos\omega t \qquad (25.1)$$

tok döreýär. R garşylyk hemişelik bolany üçin tok we naprýaženiýe fazasy boýunça gabat gelýär.

Bu ýerde $I_m = \frac{U_m}{R}$ – tok güýjüniň amplitudasy, U_m – naprýaženiýanyň amplitudasy.



25.1-nji çyzgy

Amatly bolar ýaly, toguň we naprýaženiýanyň wektorlary üçin garmonik yrgyldy öwrenilendäki ýaly wektor diagrammalary usulyny ulanalyň (*25.1-nji b çyzgy*). Çyzgydan görnüşi ýaly, naprýaženiýe bilen toguň amplitudalarynyň wektorlarynyň ugurlary gabat gelýär, iki wektoryň arasyndaky fazalaryň süýşmesi nola deň.

Üýtgeýän toguň zynjyryndaky R garşylyga **aktiw garşylyk** diýilýär. Bu garşylyk elektrik energiýasyny energiýanyň beýleki görnüşlerine (ýylylyk we başg.) gutarnykly öwürýär. Aktiw garşylyga **rezistor** hem diýilýär.

2. *L* induktiwlikli üýtgeýän toguň zynjyry (*25.2-nji a çyzgy*). Zynjyryň induktiw tegeginde öz-özünde induktsiýanyň EHG-si ýüze çykýar:

$$\mathscr{E}_{öz} = -L\frac{di}{dt}. \qquad (25.2)$$

Onda Kirhgofyň ikinji düzgüni

$$U_m \cos\omega t - L\frac{di}{dt} = 0$$

görnüşde bolar. Bu ýerden

$$L\frac{di}{dt} = U_m \cos\omega t. \tag{25.3}$$

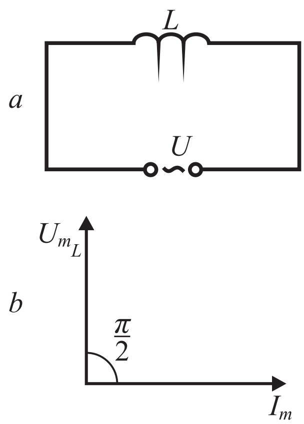
Bu ýerde daşky naprýaženiýanyň induktiw tegege goýlandygyny göz öňünde tutup belläliň:

$$U_L = L\frac{di}{dt}.$$

Ýerinde goýup alarys:

$$di = \frac{U_m}{L}\cos\omega t dt.$$

Toguň bahasyny tapmak üçin soňky deňligi integrirläliň. Tokda hemişelik düzüji ýoklugy üçin integrirlemäniň hemişeligini nola deň diýip alarys:



25.2-nji çyzgy

$$i = \frac{U_m}{\omega L}\sin\omega t = \frac{U_m}{\omega L}\cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = I_m \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right),$$

$$I_m = \frac{U_m}{\omega L}.$$

bu ýerde $X_L = \omega L$ – ululyga induktiw garşylyk diýilýär. Aňlatmalardan görnüşi ýaly, $\omega = 0$ bolanda, ýagny hemişelik tok üçin induktiwlik tegekde garşylyk ýüze çykarmaýar.

Induktiw tegekdäki naprýaženiýanyň peselmesi aşakdaky ýaly kesgitlenýär:

$$u_L = \omega L I_m \cos\omega t \tag{25.4}$$

Muny toguň pursatlaýyn bahasynyň (25.1) deňlemesi bilen deňeşdirip wektor diagrammasyny guralyň (*25.2-nji b çyzgy*).

Gornüşi ýaly induktiw tegekdäki naprýaženiýanyň U_{mL} peselmesi fazasy boýunça I tokdan $\frac{\pi}{2}$ ululyk öňe düşýär.

3. *C* sygymly üýtgeýän toguň zynjyry (*25.3-nji a çyzgy*). Kondensatora üýtgeýän naprýaženiýe goýlanda ol zarýadlanar we zynjyrda tok dörär. Zynjyrda diňe sygym bardygyny göz öňünde tutsak

$$\frac{q}{C} = u_C = U_m \cos\omega t.$$

Tok güýji

$$i = \frac{dq}{dt} = -\omega C U_m \sin\omega t = I_m \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Bu ýerden alarys:

$$I_m \omega C U_m = \frac{U_m}{\dfrac{1}{\omega C}},$$

bu ýerde I_m – toguň amplituda bahasy.

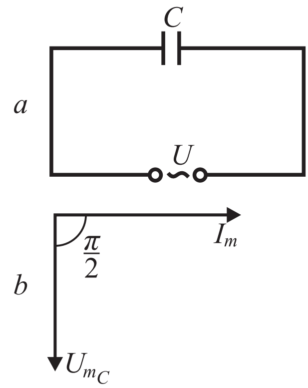
$X_C = \dfrac{1}{\omega C}$ – ululyga sygym garşylygy diýilýär. $\omega = 0$ bolanda $X_C = \infty$. Diýmek, kondensatoryň üstünden hemişelik tok geçmeýär. Kondensatordaky naprýaženiýanyň peselmesi aşakdaky ýaly kesgitlenýär:

$$u_C = \frac{1}{\omega C} I_m \cos \omega t.$$

Aňlatmalardan görnüşi ýaly, naprýaženiýanyň U_{mC} peselmesi tok güýjünden fazasy boýunça $\frac{\pi}{2}$ ululyk yza galýar (*25.3-nji b çyzgy*).

X_L induktiwlik we X_C sygym garşylyklaryna **reaktiw** garşylyklar diýilýär.

Öň belläp geçişimiz ýaly, R aktiw garşylykda elektrik energiýasy energiýanyň beýleki görnüşlerine gutarnykly öwrülýär. $X_L = \omega L$ induktiw garşylygyň ölçeg birligi omdyr. Ol garşylyk diýlip şertli atlandyrylýar. Ol fiziki manysy boýunça üýtgeýän toguň induktiwlikde döredýän öz-özünde induksiýasynyň EHG-siniň zynjyryň çeşmesiniň EHG-sine peseldiji täsirini häsiýetlendirýär.

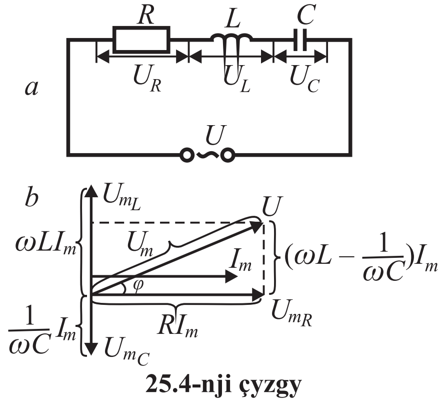


25.3-nji çyzgy

$X_C = \dfrac{1}{\omega C}$ sygym garşylygynyň hem ölçeg birligi omdyr. Kondensatoryň zarýadlanmagy pursatlaýyn toguň modulynyň artmagyna päsgel berýär. Tok güýjüniň modulynyň peselýän mahaly kondensatoryň zarýadsyzlanmagy toguň üýtgemegine garşylykly täsir edýär.

Zynjyrda diňe reaktiw garşylyk bolanda energiýa bölünip çykmaýar. Diňe elektrik energiýasynyň çeşmesi bilen ulanyjynyň arasynda energiýanyň yrgyldysy bolup geçýär. Zynjyrdaky tok iş etmeýär. Beýle toga reaktiw tok diýilýär. Ol tok çeşmesine we geçiriji liniýalara peýdasyz ýük döredýär.

4. Yzygider birikdirilen rezistoryň, tegegiň we kondensatoryň zynjyryndan elektrik togunyň geçişi. Beýle zynjyr üýtgeýän naprýaženiýa birikdirilende elementlerde, degişlilikde U_R, U_L, U_C naprýaženiýeleriň peselmeleri bolup geçýär. Bu ýagdaý üçin zynjyryň shemasy we wektor diagrammasy 25.4-nji çyzgyda görkezilendir.



25.4-nji çyzgy

Zynjyra goýlan naprýaženiýanyň U_m amplituda bahasy U_{mR}, U_{m_L}, U_{mC}, naprýaženiýeleriň wektorlaýyn jemi ýaly kesgitlenýär. Diagrammadaky φ burç naprýaženiýe bilen toguň arasyndaky fazalaryň süýşme burçuny görkezýär. Çyzgydan görnüşi ýaly

$$\mathrm{tg}\varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (25.6)$$

Gönüburçly üçburçlyk üçin

$$U_m^2 = (RI_m)^2 + \left[\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)I_m\right]^2$$

deňligi ýazmak bolar. Bu ýerden alarys:

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \quad (25.7)$$

Diýmek, zynjyra $u = U_m\cos\omega t$ naprýaženiýe goýlanda tok güýji üçin deňligi alarys:

$$i = I_m\cos(\omega t - \varphi),$$

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

ululyga zynjyryň **doly garşylygy** ýa-da **impedans** diýilýär.

$$X = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C} \quad (25.8)$$

ululyk bolsa **zynjyryň reaktiw garşylygydyr.**

Eger berlen zynjyr üçin X_L induktiw garşylyk X_C sygym garşylygyna deň bolsa, (25.6) we (25.7) deňliklerden alarys:

$$\varphi = 0, \qquad I_m = \frac{U_m}{R}.$$

Ýagny, tok bilen naprýaženiýanyň arasyndaky faza süýşmesi nola deň bolýar. Iki reaktiw garşylyklardaky naprýaženiýeler biri-birini kompensirleýär. Zynjyrda diňe rezistor bar ýaly ýagdaý döreýär. Bu hadysa **naprýaženiýeleriň rezonansydyr**.

Induktiw we sygym elementleri yzygider birikdirilen zynjyra goýlan naprýaženiýe bilen toguň fazasy boýunça gabat gelmegine **naprýaženiýeleriň rezonansy** diýilýär.

Bu ýagdaýda L we C elementlerdäki naprýaženiýe zynjyra goýlan naprýaženiýeden has ýokary bolup bilýär. $\omega L = 1/(\omega C)$ şert üçin aýlaw ýygylygynyň bahasy aşakdaky ýaly tapylýar:

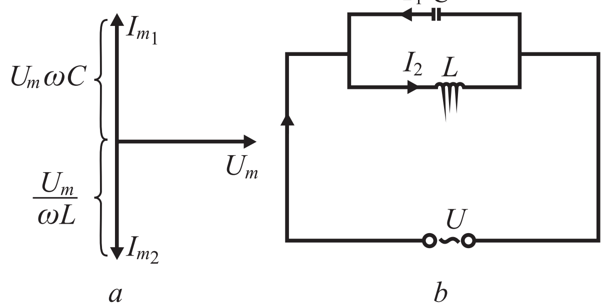
$$\omega = \omega_{rez} = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Bu ýygylyga rezonans ýygylyk diýilýär.

25.4. Üýtgeýän toguň parallel zynjyrlary

Aktiw garşylygy nola deň bolan parallel birikdirlen induktiwlik tegekden we kondensatordan düzülen üýtgeýän toguň zynjyry üçin gurlan wektor diagramma seredeliň (*25.5-nji a çyzgy*).

Bu ýagdaý üçin goýlan napryaženiýe iki element üçin hem umumydyr. Onda induktiw tegekdäki (I_2) tok $\pi/2$ burç napryaženiýeden yza galýar. Kondensatordaky tok bolsa, napryaženiýeden $\pi/2$ burç öňe geçýär. Netijede, zynjyryň umumy togunyň amplituda bahasy aşakdaky ýaly kesgitlenýär:



25.5-nji çyzgy

$$I_m = I_{m_1} - I_{m_2} = U_m\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right).$$

$\omega L \approx \dfrac{1}{\omega C}$ bolanda, toguň iň kiçi bahasy alynýar. Bu hadysa **toklaryň rezonansy** diýilýär. Rezonans ýygylygynyň formulasy

$$\omega = \omega_{rez} = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \qquad (25.9)$$

Beýle zynjyr ω ýygylygy ω_{rez} golaý bolan toklar üçin iň uly garşylygy görkezýär. Bu ýagdaý çylşyrymly görnüşdäki üýtgeýän tokda käbir ýygylyklary saýlap almaga mümkinçilik berýär.

25.5. Üýtgeýän toguň kuwwaty

Kuwwatyň pursatlaýyn bahasy:

$$P(t) = u(t)i(t).$$

Bu ýerde $u(t) = U_m\cos\omega t$, $i(t) = I_m\cos(\omega t - \varphi)$. Indi $\cos(\omega t - \varphi)$ aňlatmany dargadyp alarys:

$$P(t) = I_m U_m \cos\omega t\cos(\omega t - \varphi) = I_m U_m(\cos^2\omega t\cos\varphi + \sin\omega t\cos\omega t\sin\varphi).$$

Kuwwatyň ortaça $\langle P\rangle$ bahasy üçin $\langle\cos\omega t\rangle = \frac{1}{2}$, $\langle\sin\omega t\cos\omega t\rangle = 0$ deňliklerden peýdalanyp alarys:

$$\langle P\rangle = \frac{1}{2}I_m U_m\cos\varphi$$

ýa-da $U_m\cos\varphi = RI_m$ deňlikden peýdalansak,

$$\langle P\rangle = \frac{1}{2}RI_m^2.$$

Şonça kuwwaty hemişelik toguň $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ bahasy ýüze çykarýar. $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ we $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$ ululyklara toguň we naprýaženiýanyň effektiw bahalary diýilýär. Bulardan peýdanalyp ortaça kuwwat üçin alarys:

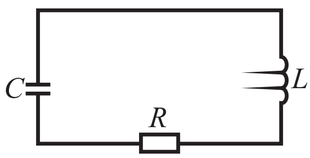
$$\langle P\rangle = IU\cos\varphi, \tag{25.10}$$

bu ýerde $\cos\varphi$ – **kuwwat koeffisiýenti.**

Eger zynjyrda reaktiw garşylyk nola deň bolsa $P = IU$ bolar. Reaktiw garşylygyň köpelmegi kuwwatyň ortaça bahasynyň peselmegine getirýär. Bu ýagdaýda gerekli kuwwaty almak üçin toguň güýjüni köpeltmeli. Bu bolsa geçirijilerden artykmaç ýylylygyň bölünip çykmagyna getirýär. Şonuň üçin hem praktikada senagat enjamlary $\cos\varphi$-niň bahasyny 0,8-den ýokary edilip ýasaýarlar.

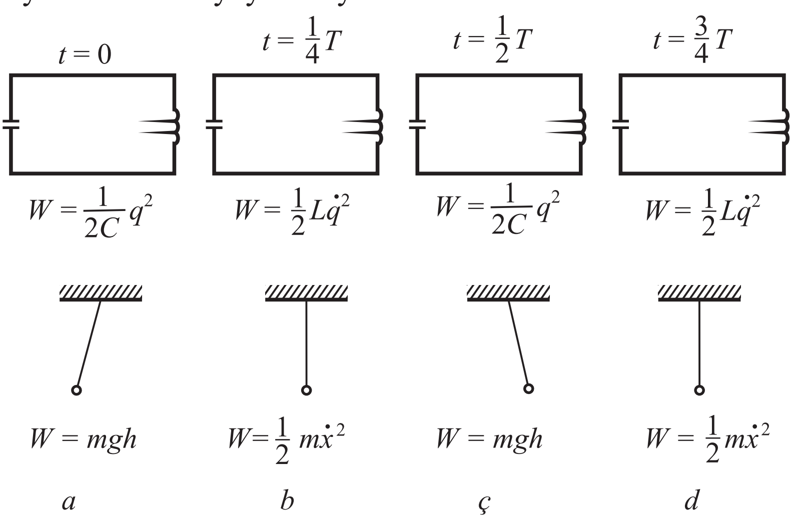
25.6. Yrgyldyly kontur we onda elektromagnit yrgyldylarynyň alnyşy

Yzygider birikdirilen induktiw tegekden, kondensatordan we garşylykdan durýan elektrik zynjyryna **yrgyldyly kontur** diýilýär (*25.6-njy çyzgy*). Yrgyldyly kontur zynjyrda elektrik yrgyldysyny almaga mümkinçilik berýär. Diýmek, yrgyldyly kontury ossilýator hökmünde kabul etmek bolar.



25.6-njy çyzgy

Aktiw garşylygy hasaba alardan az bolan ($R \approx 0$) ideal konturda döreýän yrgyldyly hadysanyň yzygiderligine seredeliň. Konturda yrgyldy döretmek üçin ilki bilen kondensatory zarýadlandyrmaly. Wagtyň başlangyç $t = 0$ pursatynda (*25.7-nji a çyzgy*) kondensatoryň obkladkalarynyň arasynda



25.7-nji çyzgy

$$W = \frac{1}{2C}q_0^2$$

energiýaly elektrik meýdany emele gelýär. Kondensator zynjyra birikdirilende ol zarýadsyzlanyp başlaýar we konturda wagta bagly artýan tok döreýär. Netijede, elektrik meýdanynyň energiýasy azalýar we tegegiň magnit meýdanynyň energiýasy köpelýär. $R = 0$ bolany sebäpli, energiýanyň saklanma kanuny esasynda doly energiýa

$$W = \frac{1}{2C}q^2 + \frac{1}{2}L\dot{q}^2 = const$$

bolýar. Şol sebäpden, wagtyň $t = \left(\frac{1}{4}\right)T$ pursatynda kondensator doly zarýadsyzlanýar, elektrik meýdanynyň energiýasy nola çenli kiçelýär we magnit meýdanyň energiýasy iň uly baha eýe bolýar (*25.7-nji b çyzgy*). Şu pursatdan başlap, zynjyrdaky tok peselip başlaýar. Bu bolsa tegegiň magnit meýdanynyň peselmegine getirýär. Bu peselme tegekde induksion togy döredýär. Toguň ugry üçin Lensiň kanunyny ulansak, kondensatoryň başdaky ýagdaý bilen deňeşdirenimizde ters atly zarýadlar bilen zarýadlanjakdygyna we elektrik meýdanynyň energiýasynyň iň uly baha eýe boljakdygyna göz ýetirmek bolar (*25.7-nji ç çyzgy*). Soňra bu hadysalar ters tertipde gaýtalanyp başlar we wagtyň belli pursatynda başky ýagdaýa geler (*25.7-nji d çyzgy*). Soňra seredilen öwrüm gaýtalanyp durýar. Yrgyldyly konturdaky elektrik yrgyldysyny matematiki maýatnigiň mehaniki yrgyldysy bilen deňeşdirmek bolar. Maýatnigiň *mgh* potensial energiýasy kondensatoryň elektrik meýdanynyň $q^2/2C$ energiýasyna, maýatnigiň $m\upsilon^2/2$ kinetik energiýasy bolsa, magnit meýdanyň $L\dot{q}^2/2$ energiýasyna meňzeşdir.

Maýatnigiň tizligi konturdaky tok güýji bilen kybapdaşdyr. Maýatnigiň inersiýasy tegegiň öz-özünde induksiýasyna, sürtülme güýçleri bolsa, konturyň aktiw garşylygyna meňzeşdir.

Eger konturda energiýanyň ýitgisi bolmasa, onda konturda T periodly togtamaýan periodiki elektromagnit yrgyldysy alnar. Periodyň birinji ýarymynda tok bir tarapa, ikinji ýarymynda bolsa beýleki tarapa akar. Yrgyldy netijesinde elektrik meýdanynyň we magnit meýdanynyň energiýalarynyň özara öwrülişigi yzygiderli bolup durar.

Aktiw garşylyksyz konturyň yrgyldysynyň differentsial deňlemesini tapalyň. Kondensatory zarýadlandyrýan toguň ugruny položitel diýip kabul edeliň. Onda

$$I = \frac{dq}{dt} = \dot{q}. \tag{25.11}$$

Omuň kanuny esasynda alarys:

$$IR = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathscr{E}_{12}. \tag{25.12}$$

Bu ýerde $R = 0$, $\varphi_1 - \varphi_2 = -\frac{q}{C}$, $\mathscr{E}_{12} = \mathscr{E}_{öz} = -L\frac{dI}{dt}$.

Onda (25.12) deňlik

$$0 = -\frac{q}{C} - L\frac{dI}{dt} \tag{25.13}$$

görnüşi alar. $\frac{dI}{dt}$ differensialy $\ddot{q}$ bilen çalşyp, (25.13) deňlikden alarys:

$$\ddot{q} + \frac{1}{LC}q = 0. \tag{25.14}$$

Bu ýerde $\frac{1}{\sqrt{LC}}$-i ω_0 bilen belläp, alarys:

$$\frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0, \qquad \text{ýagny} \tag{25.15}$$

$$\ddot{q} + \omega_0^2 q = 0. \tag{25.16}$$

Bu deňleme garmonik yrgyldynyň differensial deňlemesidir. Bu deňlemäniň umumy çözüwi:

$$q = A_1 \sin\omega t + A_2 \cos\omega t,$$

bu ýerde A_1 we A_2 – integrirlemäniň hemişelikleri. Olary başlangyç şertlerden tapyp bolýar. Başlangyç wagt pursaty ($t = 0$) üçin q we $\dot{q}$ ululyklaryň bahalaryny ulansak, $A_1 = \frac{1}{\omega_0}\left(\frac{dq}{dt}\right)_{t=0}$, $A_2 = q(0)$, umumy çözüwi aşakdaky görnüşe getirmek bolýar:

$$q = q_m \cos(\omega_0 t + \alpha). \tag{25.17}$$

Bu ýerde $A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2}$ amplituda zarýadyň q_m amplituda bahasy bilen çalşyrylýar: $\alpha = \operatorname{arctg}\left(A_2 / A_1\right)$. Bu ýerden kondensatoryň obkladkalaryndaky zarýadyň (25.17) aňlatma bilen kesgitlenýän garmonik kanun bilen ütgeýändigi görünýär. ω_0 ýygylyga konturyň hususy ýygylygy diýilýär we ol garmonik ossilýatoryň hususy ýygylygyna meňzeşdir. Yrgyldynyň periody **Tomsonyň**

$$T = 2\pi\sqrt{LC} \tag{25.18}$$

formulasy bilen kesgitlenýär.

Kondensatoryň naprýaženiýesi zarýatdan $\frac{1}{C}$ köpeldiji bilen tapawutlanýar:

$$U = \frac{q_m}{C}\cos(\omega_0 t + \alpha) = U_m \cos(\omega_0 t + \alpha). \tag{25.19}$$

(25.17) funksiýany differensirlesek tok güýji üçin

$$I = -\omega_0 q_m \sin(\omega_0 t + \alpha) = I_m \cos\left(\omega_0 t + \alpha + \frac{\pi}{2}\right) \tag{25.20}$$

aňlatmany alarys. Şeýlelikde, tok güýji kondensatoryň naprýaženiýasyndan fazasy boýunça $\pi/2$ ululyk öňe düşýär. (25.17) we (25.19) formulalary (25.20) formula bilen deňeşdirsek, toguň iň uly baha alan pursatynda zarýadyň we naprýaženýanyň nola öwrülýändigini we tersine U we q uly baha alanda I toguň nola deň bolýandygy görünýär. (25.19) we (25.20) formulalardan alarys:

$$U_m = \frac{q_m}{C}, \qquad I_m = \omega_0 q_m.$$

Bularyň gatnaşygyny we (25.15) aňlatmany peýdalanyp alarys,

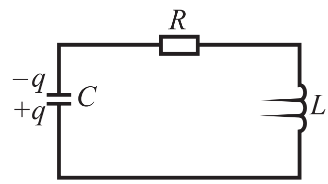
$$U_m = \sqrt{\frac{L}{C}} I_m. \tag{25.21}$$

Elektrik meýdanynyň energiýasynyň $CU_m^2/2$ iň uly bahasyny magnit meýdanynyň energiýasynyň $LI_m^2/2$ iň uly bahasy bilen deňleşdirip hem (25.21) deňligi alyp bolýar.

25.7. Togtama koeffisiýenti. Togtamanyň logarifmiki dekrementi we hillilik

Islendik real konturyň aktiw garşylygy bolýar. Aktiw garşylykdan tok geçende gyzma zerarly energiýanyň bir bölegi ýitýär. Şol sebäpli konturdaky yrgyldy peselýär we togtaýar. 25.8-nji çyzgydaky kontur üçin yrgyldynyň deňlemesi Kirhgofyň ikinji düzgüniniň esasynda aşakdaky görnüşde bolar:

$$IR = -\frac{q}{C} - L\frac{dI}{dt} \tag{25.22}$$



25.8-nji çyzgy

Bu deňligi L-e bölüp we I-ni $\dot{q}$ bilen, $\frac{dI}{dt}$-ni $\ddot{q}$ bilen çalşyp, alarys:

$$\ddot{q} + \frac{R}{L}\dot{q} + \frac{1}{LC}q = 0. \tag{25.23}$$

$\frac{R}{2L}$ ululygy β bilen belläp, alarys:

$$\beta = \frac{R}{2L} \tag{25.24}$$

(25.24) deňligi göz önünde tutup, (25.13) deňlikden alarys:

$$\ddot{q} + 2\beta\dot{q} + \omega_0^2 q = 0. \tag{25.25}$$

Bu deňleme **togtaýan mehaniki yrgyldynyň differentsial deňlemesi** bilen meňzeşdir. Bu ýerde β – konturyň erkin yrgyldysynyň **togtama koeffisiýenti.** $\beta^2 < \omega_0^2$, ýagny $\frac{R^2}{4L^2} < \frac{1}{LC}$ şert ýerine ýetende (25.25) deňlemäniň çözüwi

$$q = q_{m0} e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha). \tag{25.26}$$

Bu ýerde $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ ýa-da (25.15) we (25.24) deňlemelerden peýdalanyp alarys:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}. \tag{25.27}$$

Şeýlelikde, peselýän yrgyldynyň ω ýygylygy ω_0 hususy ýygylykdan kiçidir. $R = 0$ bolanda (25.27) aňlatma (25.15) görnüşi alýar. (25.26) deňligi C sygyma bölüp, kondensatordaky naprýaženiýe üçin aňlatmany alarys:

$$U = \frac{q_{m_0}}{C} e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha) = U_{m_0} C e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha). \tag{25.28}$$

Tok güýjüni tapmak üçin (25.26) aňlatmany wagta görä differensirleýäris:

$$I = \dot{q} = q_{m_0} e^{-\beta t} \left[-\beta \cos(\omega t + \alpha) - \omega \sin(\omega t + \alpha) \right].$$

Bu aňlatmany $\dfrac{\omega_0}{\sqrt{\omega^2 + \beta^2}} = \omega$ köpeldip we bölüp alarys:

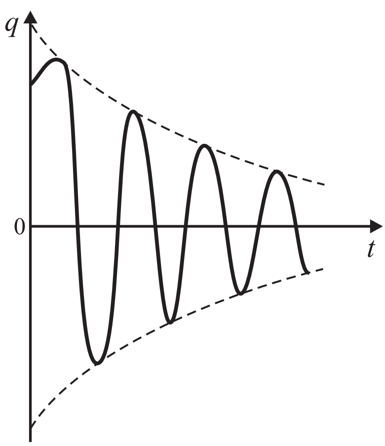
$$I = \omega_0 q_{m_0} e^{-\beta t} \left[-\frac{\beta}{\sqrt{\omega^2 + \beta^2}} \cos(\omega t + \alpha) - \frac{\omega}{\sqrt{\omega^2 + \beta^2}} \sin(\omega t + \alpha) \right].$$

Soňra

$$\cos\psi = -\frac{\beta}{\sqrt{\omega^2 + \beta^2}} = -\frac{\beta}{\omega_0}, \qquad \sin\psi = \frac{\omega}{\sqrt{\omega^2 + \beta^2}} = \frac{\omega}{\omega_0}$$

şertler bilen kesgitlenýän ψ burçy girizip alarys.

$$I = \omega_0 q_{m_0} \cdot e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha + \psi). \tag{25.29}$$



25.9-njy çyzgy

Şertlere görä $\cos\psi < 0$ we $\sin\psi > 0$ bolýandygyny hasaba alsak, ψ burçuň $\pi/2$-den uly π-den kiçidigine ($\pi/2 < \psi < \pi$) göz ýetirmek bolar. Bu ýerden görnüşi ýaly, konturda aktiw garşylyk bolanda tok güýji kondensatordaky naprýaženiýeden fazasy boýunça $\pi/2$-den uly burça öňe düşýär. (25.26) funksiýanyň grafigi 25.9-njy çyzgyda görkezilendir. Naprýaženiýanyň we tok güýjüniň grafigi hem şuňa meňzeşdir. Yrgyldynyň gowşamasyny **togtamanyň logarifmiki dekrementi**

$$\lambda = \ln \frac{a(t)}{a(t+T)} = \beta T \tag{25.30.}$$

bilen häsiýetlendirmek kabul edilendir. Bu ýerde a – degişli ululyklaryň (q, I, U) amplitudasy. Togtamanyň logorifmiki dekrementi amplitudanyň e (natural logarifmiň esasy) esse peselýän wagtynda bolup geçýän yrgyldylaryň N_e sanynyň ters ululygyna deňdir:

$$\lambda = \frac{1}{N_e}.$$

(25.24) deňlikden β-niň bahasyny (25.30) deňlige goýup we $T = \frac{2\pi}{\omega}$ deňligi ulanyp, λ üçin aňlatmany alarys:

$$\lambda = \frac{R}{2L}\frac{2\pi}{\omega} = \frac{\pi R}{\omega L}. \qquad (25.31)$$

ω konturdaky L, C, R ululyklara bagly bolany üçin λ hem konturyň häsiýetnamasydyr.

Eger togtama güýçli bolmasa $\beta^2 << \omega_0^2$, (25.31) deňlikde $\omega \approx \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ diýip kabul etsek, onda

$$\lambda = \frac{\pi R\sqrt{LC}}{L} = \pi R\sqrt{\frac{L}{C}}. \qquad (25.32)$$

Yrgyldyly kontury häsiýetlendirmek üçin **hillilik** Q diýen häsiýetnama girizilýär. Ol

$$Q = \frac{\pi}{\lambda} = \pi N_e \qquad (25.33)$$

aňlatma bilen kesgitlenýär. (25.33) deňlikden görnüşi ýaly, hillilik ýokary bolduguça amplitudanyň e esse azalýan wagtynda bolup geçýän N_e yrgyldylaryň sany hem köpdür.

Togtama gowşak bolsa (25.32) deňligiň esasynda

$$Q = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}} \qquad (25.34)$$

aňlatmany almak bolar.

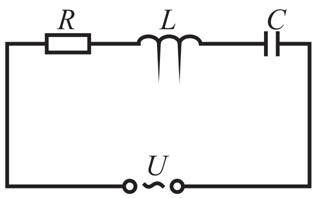
(25.34) formulada R aktiw garşylyk köpelende hilliligiň peselýändigi görünýär. (25.24) formula boýunça bolsa R köpelende togtama koeffisiýenti ulalýar. Bu baglanyşyklar sebäpli konturda aktiw garşylygyň köpelmegi periodiki däl (aperiodiki) prosesiň ýüze çykmagyna getirýär. Tehnikada periodiki elektromagnit yrgyldylarynyň örän köp ulanylýandygy sebäpli, sistemadaky yrgyldylaryň periodikligini saklamak üçin dürli usullar ulanylýar.

25.8. Mejbury elektromagnit yrgyldylary

Mejbury yrgyldy almak üçin sistema periodiki üýtgeýän daşky täsir gerek. Munuň üçin kontura onuň elementlerine yzygider üýtgeýän EHG-ni birikdirmeli ýa-da kontury üzüp emele gelen kontaktlara

$$U = U_m \cos\omega t \qquad (25.35)$$

naprýaženiýany bermeli (*25.10-njy çyzgy*). Bu naprýaženiýe tegegiň induksiýasynyň EHG-siniň üstüne goşulýar. Onda (25.35) formula



25.10-njy çyzgy

$$IR = -\frac{q}{C} - L\frac{dI}{dt} + U_m \cos\omega t \tag{25.36}$$

görnüşi alar. Bu ýerden (25.25) deňlemäni göz öňünde tutup alarys:

$$\ddot{q} + 2\beta\dot{q} + \omega_0^2 q = \frac{U_m}{L}\cos\omega t. \tag{25.37}$$

Bu ýerden ω_0^2 we β (25.14) we (25.25) formulalar arkaly kesgitlenýär.

(25.37) deňleme mehaniki yrgyldynyň differensial deňlemesine meňzeşdir. Bu deňlemäniň hususy çözüwi

$$q = q_m \cos(\omega t - \psi) \tag{25.38}$$

görnüşde bolýar. Bu ýerde

$$q_m = \frac{\frac{U_m}{L}}{\sqrt{\left(\omega_0^2 - \omega^2\right)^2 + 4\beta^2\omega^2}}, \qquad \mathrm{tg}\psi = \frac{2\beta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}.$$

Bu ýerde ω_0^2 we β-nyň bahalaryny goýup alarys:

$$q_m = \frac{U}{\omega\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}, \tag{25.39}$$

$$\mathrm{tg}\psi = \frac{1}{\frac{1}{\omega C} - \omega L}. \tag{25.40}$$

(25.38) çözüwiň üstüne degişli deňdeş deňlemäniň umumy çözüwini goşsak (25.37) deňlemäniň umumy çözgüdini alarys. Bu çözüw (25.26) formula görnüşde bolýar. Ol $e^{-\beta t}$ eksponensial köpeldijini özünde saklaýar.

Şonuň üçin hem wagtyň geçmegi bilen kiçelýär we hasaba alardan pes derejesine ýetýär. Şol sebäpden-de mejbury yrgyldy (25.38) funksiýa bilen ýazylýar. (25.38) aňlatmany wagta görä differensirläp, emele gelen yrgyldylar üçin tok güýjüni tapalyň:

$$I = -\omega q_m \sin\left(\omega t - \psi\right) = I_m \cos\left(\omega t - \psi + \frac{\pi}{2}\right).$$

Bu aňlatmany

$$I = I_m \cos(\omega t - \varphi) \tag{25.41}$$

görnüşde ýazalyň. Bu ýerde $\varphi = \psi - \frac{\pi}{2}$ – toguň goýlan naprýaženiýeden faza boýunça süýşmesi. (25.40) deňlik esasynda alarys:

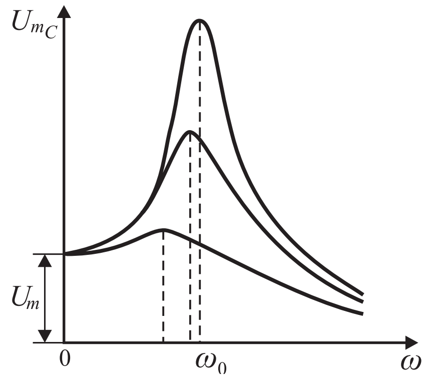
$$\mathrm{tg}\varphi = \mathrm{tg}\left(\psi - \frac{\pi}{2}\right) = -\frac{1}{\mathrm{tg}\varphi} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \tag{25.42}$$

Bu formuladan görnüşi ýaly, eger $\omega L > \frac{1}{\omega C}$ bolanda tok napryaženiýeden fazasy boýunça yza galýar ($\varphi > 0$), tersine $\omega L > \frac{1}{\omega C}$ bolanda tok öňe gidýär ($\varphi > 0$). (25.27) deňlikden peýdalanyp, rezonans ýygylygyny kesgitläp bolýar.

Kondensatoryň zarýady we ondaky napryaženiýe üçin **rezonans ýygylygy** aşakdaky ýaly kesgitlenýär:

$$\omega_r = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \leq \omega_0. \qquad (25.43)$$

U_C üçin **rezonans egri çyzyklary** 25.11-nji çyzgyda görkezilendir. q üçin rezonans egri çyzyklary hem şol görnüşde bolýar. $\omega \to 0$ bolanda rezonans egri çyzyklary ordinatanyň $U_{mC} = U_m$ nokadyna gelýärler. Bu napryaženiýe kondensator U_m hemişelik napryaženiýa birikdirilende ýüze çykýan napryaženiýe. $\beta = R/2L$ ululyk kiçi boldugyça rezonans egri çyzyklary ýiti we belent bolýar. Kondensatoryň U_{mC} napryaženiýesiniň iň uly bahalaryna degişli ýygylyk ω_0 bilen gabat gelmeýär, R we β ulaldygyça ýygylygyň kiçi bahalaryna tarap süýşýär.

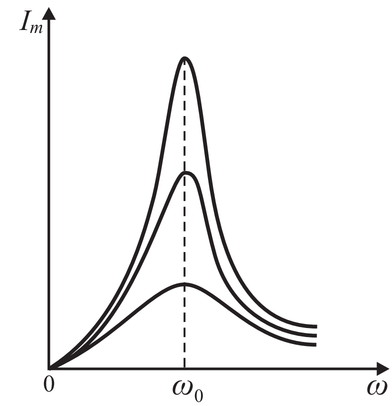


25.11-nji çyzgy

Tok güýji üçin rezonans egri çyzyklary 25.12-nji çyzgyda görkezilendir. Olar mehaniki yrgyldydaky tizligiň rezonans egri çyzyklaryna meňzeşdir. Tok güýjüniň amplitudasynyň iň uly bahalary $\omega L = 1/\omega C$ şerte degişlidir. Tok üçin

$$\omega_{I_{rez}} = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \qquad (25.44)$$

Toguň rezonans egri çyzyklary $\omega = 0$ bolanda $I_m = 0$ baha eýe bolýar, ýagny hemişelik napryaženiýede konturdan tok geçmeýär.



25.12-nji çyzgy

Yrgyldy peselende $(\beta^2 << \omega_0^2)$ napryaženiýanyň rezonans ýygylygy ω_0 bilen gabat gelýär. Bu şerti

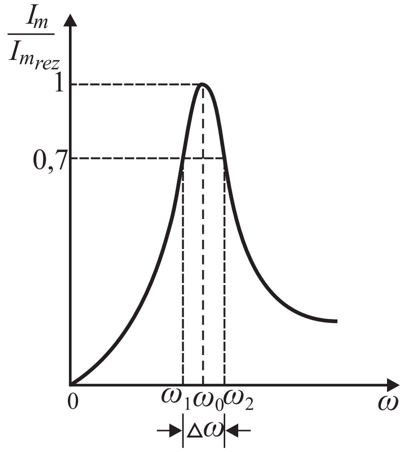
$$\omega_{rez} L - \frac{1}{\omega C} \approx 0$$

görnüşde ýazmak bolar. $U_{mC} = I_m / \omega C$ formula esasynda kondensatoryň rezonansdaky $I_{mC_{rez}}$ napryaženiýasynyň daşky napryaženiýanyň amplitudasyna bolan gatnaşygy

$$\frac{U_{m\,C_{rez}}}{U} = \frac{1}{\omega_0 CR} = \frac{\sqrt{LC}}{CR} = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}} = Q \qquad (25.45)$$

bolar. Bu ýerde Q – konturyň hilliligi. Şeýlelikde, konturyň Q hilliligi kondensatoryň naprýaženiýasynyň goýlan naprýaženiýeden näçe esse ulydygyny görkezýär.

Konturyň hilliligi rezonans egri çyzyklarynyň giňligi, ýitiligi bilen hem kesgitlenýär. 25.13-nji çyzgyda konturyň tok güýji üçin bir rezonans egri çyzygy görkezilendir. Wertikal ok boýunça $I_m / I_{m_{rez}}$ gatnaşyk goýlan. Bu gatnaşygyň 0,7 bahasy üçin ýygylygyň degişli bahalarynyň $\Delta\omega$ aralygy alynýar. $0{,}7^2 \approx 0{,}5$ bolýanlygy üçin, gatnaşygyň 0,7 bahasy kuwwatyň gatnaşygynyň 0,5 bahasyna degişlidir. $\Delta\omega$ aralygyň bahasynyň ω_0 ýygylyga bolan gatnaşygy konturyň hilliliginiň ters ululygyna deňdir:



25.13-nji çyzgy

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{1}{Q}. \qquad (25.46)$$

(25.45) we (25.46) formulalar Q hilliligiň uly bahalary (gowşak togtama) üçin dogrudyr.

Rezonans hadysasy çylşyrymly spektrli naprýaženiýeden gerekli düzüjini saýlap almak üçin peýdalanylýar. Goý, kontura goýlan naprýaženiýe

$$U = U_{m_1}\cos(\omega_1 t + \alpha_1) + U_{m_2}\cos(\omega_2 t + \alpha_2) + ...$$

bolsun. Konturda L we C ululyklary üýtgetmek bilen kontury gerekli ýygylyga sazlap, kondensatorda gerekli naprýaženiýanyň Q esse ulaldylan bahasyny almak bolýar. Beýleki naprýaženiýeler konturda örän gowşak duýulýar. Bu hadysa radiokabuledijiler gerekli tolkun uzynlygyna sazlananda amala aşyrylýar.

Goý, konturyň C sygymy we L induktiwligi degişli abzallaryň kömegi bilen pereodiki üýtgedilýän bolsun. Beýle sistemanyň yrgyldysy (26.23) deňleme bilen kesgitlenýär:

$$L\ddot{q} + R\dot{q} + \frac{q}{C} = 0. \qquad (25.47)$$

R hemişelik bolanda (25.47) periodik koeffisiýentli çyzykly differensial deňlemedir. R tok güýjüne bagly bolanda bu deňleme çyzykly däl deňlemä öwrülýär.

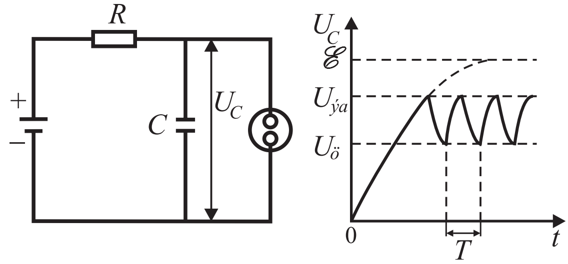
Käbir kesgitli şertlerde seredilýän sistemalar durnuksyz ýagdaýa geçýärler, ýagny tötänden deňagramlyk ýagdaýyndan çykmaklyk goşmaça yrgyldynyň ýüze çykmagyna getirýär. Sistemanyň parametriniň üýtgemegi zerarly ýüze çykýanlygy üçin, bu hadysa ossilýatorda döreýän **parametrik yrgyldy** diýilýär.

Parametrik yrgyldynyň ýüze çykma şertini periodik koeffisiýentli çyzykly differensial deňlemeleriň çözüwlerini derňemek bilen anyklap bolýar.

Şeýle hem bu derňewler yrgyldynyň ýüze çykmak şertini görkezse-de, yrgyldynyň durnukly amplitudasynyň emele gelmek şertini kesgitläp bilenok. Şeýle bolansoň, teoriýada, köplenç, hususy hallara, ýagny sygymyň ýa-da induktiwligiň bahalarynyň şol bir degişli bahalara periodiki böküş bilen geçip durmasy we şuňa meňzeş hallara seredilýär.

25.9. Relaksasion yrgyldylar barada düşünje

Awtoyrgyldyly sistemalaryň esasy bölegi yrgyldyly konturdyr. Emma yrgyldylaryň kontursyz alynýan usuly-da bar. 25.14-nji çyzgyda yrgyldyly shemanyň induktiwliksiz görnüşi görkezilendir.



25.14-nji çyzgy

Bu shemada özara parallel birikdirilen kondensator we neon çyrasy uly garşylygyň üsti bilen tok çeşmesinden iýmitlendirilýär. Eger neon çyrasy bolmadyk bolsa, onda kondensatordaky U_C naprýaženiýe sagdaky çyzgyda görkezilen üzük egri çyzyk boýunça üýtgärdi we wagtyň geçmegi bilen tok çeşmesiniň $\mathscr{E}$ elektrik hereketlendiriji güýjüne asimptotik golaýlaşardy. Bu egri çyzygyň deňlemesi

$$U_C = \mathscr{E}\left[1 - \exp\left(1 - \frac{t}{2C}\right)\right] \qquad (25.48)$$

formula bilen aňladylýar. Onuň başlangyç bölegini

$$U_C = \frac{\mathscr{E}}{RC}t$$

bilen aňlatmak bolar. Neon çyrasynyň täsirine seredeliň. Haçanda U_C naprýaženiýe çyrany ýakyp bilýän $U_{ýa}$ naprýaženiýe bilen deňleşende çyrada gaz zarýadsyzlanmasy bolup geçýär we R garşylygyň ulylygy zerarly kondensatoryň zarýadsyzlanmasy bolýar. Haçanda U_C naprýaženiýe peselip, gaz razrýadynyň öçýän $U_ö$ naprýaženiýesi bilen deňleşende gazda zarýadsyzlanma kesilýär we ýene-de kondensatoryň zarýadlanmasy başlanýar. Netijede, kondensatoryň naprýaženiýesi ýene-de artyp başlaýar. Ýene-de çyra ýanýar we ýokarda agzalan prosesler yzygiderli gaýtalanyp durýar. Şonuň üçin hem shema bize byçgynyň dişleri görnüşdäki egri çyzygy bolan naprýaženiýanyň yrgyldysyny berýär. Kondensatoryň zarýadsyzlanmasy hem şu kanun boýunça üýtgeýär.

Sadalyk üçin kondensatoryň zarýadlanýan wagty zarýadsyzlanýan wagtyndan has kiçi diýip kabul edeliň. Onda naprýaženiýäniň $U_ö$ bahadan $U_{ýa}$ baha çenli ýetýän döwrüni yrgyldynyň periody hökmünde kabul etmek bolar.

Periodyň bahasy bolsa

$$T = \frac{U_{ýa} - U_{ö}}{\mathscr{E}} RC$$

aňlatma bilen kesgitlener.

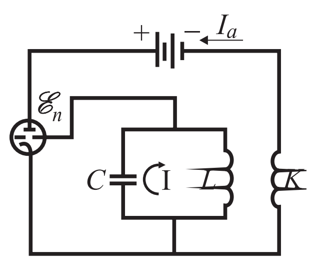
Sereden ýagdaýymyzda konturyň relaksasiýa wagty $\tau = RC$ diýilýän kesgitli wagtyň barlygy zerarly, elektrik yrgyldysy ýüze çykýar. Relaksasiýa wagty period bilen hem bagly. Şonuň üçin hem bu yrgydylara **relaksasiýa yrgydylary** diýilýär.

Relaksasiýa yrgydylary garmonik görnüşe getirmek mümkin. Onuň üçin shemada birnäçe kondensatorlar, garşylyk bilen neon çyrasy utgaşdyrylýar. Bu generatorlara gysgaça *RC* generatorlar diýilýär. Olardan radiotehnikada we ölçeýji gurallarda giňden peýdalanylýar.

25.10. Awtoyrgyldyly sistemalar. Çyraly generatorlar. Öz-özünden oýandyrmanyň şerti

Uzak wagt dowam edýän yrgyldylar awtoyrgyldyly sistemalaryň kömegi bilen alynýar. Bu sistemalar togtamaýan yrgyldylary döretmäge ukyplydyr. Alnan yrgyldylar garmonik ýa-da has çylşyrymly görnüşde bolup bilýärler. Emma olar örän uzak wagtlap dowam edip bilýärler.

Elektrikli **awtoyrgyldylar sistemasyna** energiýanyň çeşmesi hökmünde tok çeşmesi girýär. Bu çeşme sistema tarapyndan periodik birikdirilip durulýar we ýitirilen energiýanyň öwezini dolduryp durýar.



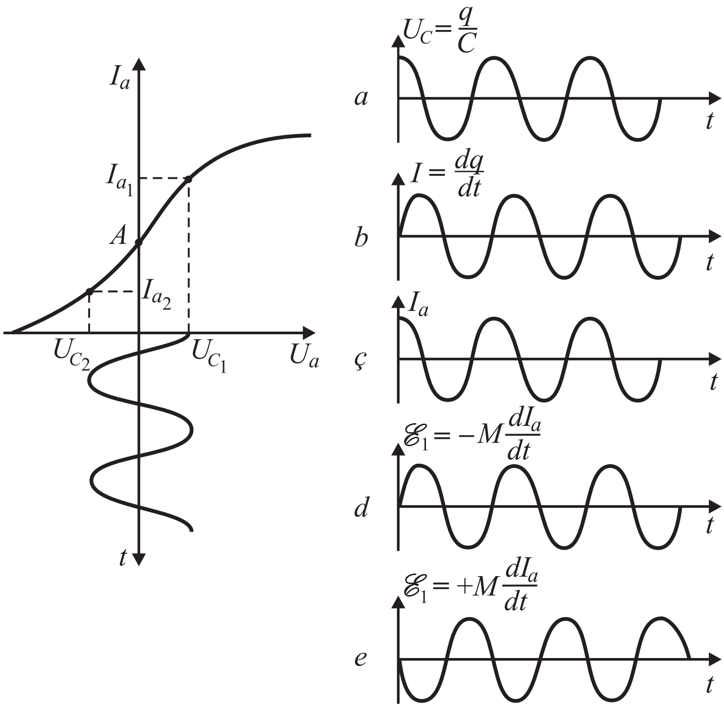
25.15-nji çyzgy

Häzirki döwürde, köplenç çyraly ýa-da ýarymgeçijili awtoyrgyldyly shemalar ulanylýar. **Çyraly generatoryň** mysalynda işleýän gurala seredeliň (*25.15-nji çyzgy*). Yrgyldyly kontur toruň zynjyryna birikdirilendir. Anodyň zynjyrynda tok çeşmesi we *L* tegek bilen baglanyşykly *K* tegek bar.

Yrgyldyly konturda yrgyldy ýüze çykanda kondensatoryň obkladkalarynyň arasynda üýtgeýän naprýaženiýe döreýär. Tor bilen katodyň arasynda hem edil şonuň ýaly naprýaženiýe döreýär. Netijede, anod zynjyrynda üýtgeýän I_a tok döreýär. *L* we *K* tegekler induktiw baglanyşykly bolany üçin I_a tok *L* tegekde üýtgeýän

$$\mathscr{E} = -M\frac{dI_a}{dt} \qquad (22.49)$$

EHG döredýär. Bu ýerde *M* – özara induksiýanyň koeffisiýenti. Bu EHG, *K* tegegiň ýerleşişine baglylykda yrgyldyly kontura päsgelçilikli ýa-da goltgy bilen täsir edip bilýär. *K* tegek yrgyldynyň peselmeginiň öňüni almak üçin ýerleşdirilýär. Tegekleriň arasyndaky induktiw baglanyşyk güýçli bolanda konturyň alýan energiýasy sarp edýän energiýasyndan köp bolýar. Bu ýagdaýda yrgyldynyň amplitudasy artyp



25.16-njy çyzgy

başlaýar. Konturyň alýan energiýasy sarp edilýäne deňleşende, amplituda kadaly baha eýe bolýar we togtamaýan yrgyldy alynýar.

Aýdylanlara düşünmek üçin 25.16-njy çyzga ýüzleneliň. Torda potentsial ýüze çykanda kondensator položitel zarýadlanan diýip kabul edeliň. Onda toruň U_C naprýaženiýesi *a* egri çyzyk boýunça üýtgese, konturdaky tok *b* egri çyzyk boýunça üýtgär. U_a naprýaženiýe zerarly ýüze çykýan anod toguny triodyň tor häsiýetnamasynyň üsti bilen tapyp bolar (*25.16-njy çepki çyzgy*).

Onuň *A* “iş nokady” häsiýetnamasynyň gönümelräk ortaky böleginde alnandyr. Toruň položitel potentsialy položitel I_a toguny döredýänligi üçin, I_a-nyň üýtgemesi *ç* egri çyzyk bilen häsietlendirilýär; *d* we *e* egri çyzyklar *K* tegegiň sargylarynyň mümkin bolan iki hili ugurlaryna degişli özara induksiýanyň elektrik hereketlendiriji güýçleridir. Bu egrileri *b* egri çyzyk bilen deňeşdireliň.

Görnüşi ýaly *e* egri çyzykda EHG-niň we *b* egri çyzykdaky toguň yrgyldylary ters fazaly, ýagny özara induksiýanyň EHG-si yrgylda peseldiji täsir edýär. *b* bilen *d* egri çyzyklar deňeşdirilende olaryň fazadaşdygy görünýär. Bu ýagdaýda peselme azalar. *L* bilen *K* tegekleriň degişli baglanyşygy bolanda togtaýan yrgyldy alynar.

Yrgyldyly konturyň anod zynjyryna täsir etmesi we anod togunyň tersine kontura täsir etmesi bu shemanyň aýratyn häsiýetidir. Şeýle usul giňden peýdalanylýar we oňa garşylyklaýyn baglanyşyk diýilýär.

Awtoyrgyldylaryň bolmagynyň şertine **öz-özünden oýandyrmanyň şerti** diýilýär. Bu şert mukdar taýdan

$$\frac{SM}{C} > R$$

görnüşde kesgitlenýär. Bu ýerde S – tor häsiýetnamasynyň ýapgytlygy (kriwizna), C – kondensatoryň sygymy, R – yrgyldyly konturyň aktiw garşylygy. Generator öz-özünden oýandyrylandan soň yrgyldynyň artýan amplitudasy başlangyç şertlere bagly bolman, generatoryň häsietleri bilen kesgitlenýän çäge ymtylýar.

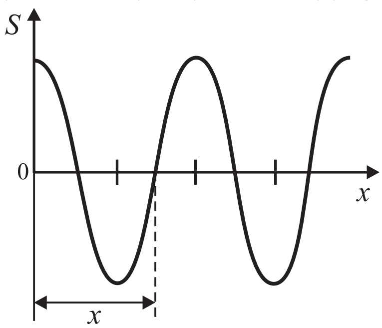
XXVI BAP. ELEKTROMAGNIT TOLKUNLARY

26.1. Tolkunlaryň görnüşleri. Tolkunyň deňlemesi

Mehaniki tolkunlar öwrenilende mehaniki yrgyldynyň bütewi sredada ýaýramagyna tolkun diýilýär. Gutarnykly tizlik bilen giňişlikde ýaýraýan üýtgeýän elektromagnit meýdanyna **elektromagnit tolkuny** diýilýär.

Tolkunlar öwrenilende olar birnäçe görnüşlere bölünýärler. Tolkunyň fazasynyň deňbahaly nokatlarynyň emele getirýän üstüne **tolkun fronty** (ýa-da **üsti**) diýilýär. Tolkun üstleri parallel tekizlikler bolan tolkunlara **tekiz tolkunlar** diýilýär. *Ox* oky boýunça maýyşgak sredada ýaýraýan tekiz tolkunyň deňlemesi

$$S = A\cos\omega\left(t - \frac{x}{\upsilon}\right) \qquad (26.1)$$



26.1-nji çyzgy

görnüşde bolar (*26.1-nji çyzgy*). Bu ýerde υ – tolkunyň fazalaýyn tizligi.

$t = t_0$ kesgitli wagt we ω bilen υ ululyklaryň berlen bahalary üçin hem-de $x = const$ bolanda (26.1) deňlemäniň argumenti aşakdaka deňdir:

$$\omega\left(t_0 - \frac{x}{\upsilon}\right) = const.$$

Bu ýerden tolkunyň deňfazaly üstüniň x oka perpendikulýar tekizlik boljakdygy görünýär. Şeýle tolkun tekiz tolkundyr. Sreda siňdiriji bolmasa, tekiz tolkunyň amplitudasy hemişelikdir ($A = const$). Tekiz tolkunlardan başga-da, **sferik** we **silindrik** tolkunlar hem bardyr.

Siňdiriji däl sredada sferik we silindrik tolkunlar, degişlilikde

$$S = \frac{d}{R}\cos\omega\left(t - \frac{R}{\upsilon}\right), \qquad (26.2)$$

$$S = \frac{l}{\sqrt{r}}\cos\omega\left(t - \frac{r}{\upsilon}\right) \qquad (26.3)$$

deňlemeler bilen kesgitlenýär. Bu ýerde $R = \sqrt{x^2 + y^2 + r^2}$, $r = \sqrt{a^2 + b^2}$, a we b – hemişelik ululyklardyr.

$t = t_0$, ω, υ ululyklaryň degişli bahalarynda hemişelik fazaly üst $\omega(t - R/\upsilon) = const$ we bu şerti $R = const$ ýagdaý kanagatlandyrar. Bu bolsa R radiusly sferadyr. (26.3) deňlikde hem $\omega(t - r/\upsilon) = const$ şert üçin $r = const$ bolmagy zerur. Bu bolsa r radiusly silindrik üstdür. **Sferik tolkuny** yrgyldynyň nokatlanç çeşmesi, silindrik tolkuny bolsa, inçe uzyn yrgyldy çeşmesi döredýär.

(26.2) we (26.3) deňliklerden görnüşi ýaly, sferik tolkunyň amplitudasy $\frac{d}{R}$, **silindrik tolkunyň** amplitudasy bolsa $\frac{l}{\sqrt{r}}$ ululyga görä kiçelýär. Sferik we silindrik tolkunlaryň amplitudasynyň kiçelmesi aralygyň uzalmagy, tolkunyň frontunyň ulalýanlygy, bu ulalma bolsa tolkun üstüniň birlik meýdanyna düşýän energiýasynyň azalmagy bilen düşündirilýär.

Tolkun teoriýasynda erkin ugra ýaýraýan tekiz tolkun baradaky düşünje hem ulanylýar. Onuň deňlemesini k tolkun sanynyň ýa-da $\vec{k}$ tolkun wektorynyň üsti bilen ýazmak amatlydyr. Tolkun sany

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

gatnaşyk bilen kesgitlenýär. Bu tolkun sany 2π birlige deň bolan aralykda näçe tolkun uzynlygynyň ýerleşjekdigini görkezýär.

Onda (26.1) deňligi

$$S = A\cos(\omega t - kx)$$

görnüşinde ýazmak bolar. $\vec{k}$ tolkun wektory san taýdan k tolkun sana deň bolmak bilen tolkunyň ýaýraýan ugruna gönükdirilen wektordyr:

$$\vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda}\vec{n}, \tag{26.4}$$

bu ýerde $\vec{n}$ – tolkun üste normal bolan birlik wektordyr. $\vec{k}$ wektory düzüjileriň üsti bilen

$$\vec{k} = k_x\vec{i} + k_y\vec{j} + k_z\vec{k} \tag{26.5}$$

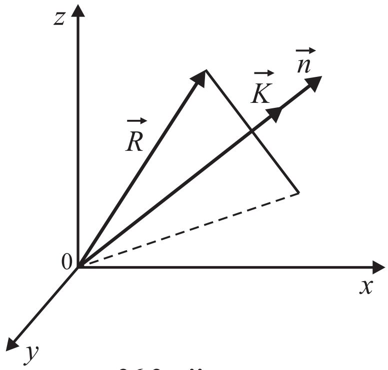
görnüşde ýazmak bolar.

Erkin ugra ýaýraýan tekiz tolkun

$$S = A\cos\left(\omega t - \vec{k}\vec{R}\right) \tag{26.6}$$

aňlatma bilen ýazylýar.

(26.6) deňlikden görnüşi ýaly, $\omega t - \vec{k}\vec{R} = const$ deňfazaly üst, bu ýerde $\left(\vec{k}\vec{R}\right) = const$ tekizlikdir. $\left(\vec{k}\vec{R}\right) = const$ şert bolsa $\vec{k}$ wektora perpendikulýar üsti kesgitleýär. Bu ýerde $\vec{R}$ tekizligi emele getirýän nokatlaryň koordinatalaryny kesgitleýän radius-wektordyr (*26.2-nji çyzgy*). Diýmek, (26.6) deňleme $\vec{k}$ wektor bilen kesgitlenýän tarapa ýaýraýan tekiz tolkunyň deňlemesidir.



26.2-nji çyzgy

Erkin ugra ýaýraýan tekiz tolkunyň differensial deňlemesini tapalyň. Onuň üçin $\vec{k}\vec{R}$ skalýar köpeltmek hasylynyň

$$\vec{k}\vec{R} = k_x x + k_y y + k_z z \tag{26.7}$$

bolýandygyny göz öňünde tutup, (26.6) deňlemäni koordinatalar we wagt boýunça iki gezek differensirläliň. x koordinatanyň ugruna (t) wagt boýunça differensirläp alarys:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -\, k_x A \sin(\omega t - \vec{k}\vec{R}), \tag{26.8}$$

$$\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} = -\, k_x^2 A \cos(\omega t - \vec{k}\vec{R}) = -\, k_x^2 S.$$

(26.7) aňlatmanyň ähli koordinatalar üçin simmetrikdigini göz öňünde tutup alarys:

$$\frac{\partial^2 S}{\partial y^2} = -\, k_y^2 S, \qquad \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} = -\, k_z^2 S. \tag{26.9}$$

Laplasyň operatoryndan peýdalanyp ýazmak bolar:

$$\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} = \nabla S = -\, k^2 S. \tag{26.10}$$

(26.6) deňlemäni wagt boýunça iki gezek differensirläp alarys:

$$\frac{\partial^2 S}{\partial t^2} = -\omega^2 A \cos(\omega t - \vec{k}\vec{R}) = -\omega^2 S. \tag{26.11}$$

$k = \frac{\omega}{\upsilon}$ deňligi hasaba alyp, (26.10) deňlikden k-nyň bahasyny (26.11) deňlige goýup alarys:

$$\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} = \frac{1}{\upsilon^2}\frac{\partial^2 S}{\partial t^2} \tag{26.12}$$

ýa-da

$$\nabla S = \frac{1}{\upsilon^2}\frac{\partial^2 S}{\partial t^2}. \tag{26.13}$$

(26.12) ýa-da (26.13) deňleme erkin tolkunyň differensial deňlemesidir. Onuň çözüwi bolsa (26.6) deňlemedir.

Tekiz tolkun üçin bu deňleme

$$\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} = \frac{1}{\upsilon^2}\frac{\partial^2 S}{\partial t^2} \tag{26.14}$$

görnüşde bolýar. Bu deňlemä **tolkun deňlemesi** diýilýär.

26.2. Elektromagnit tolkunynyň differensial deňlemesi

Makswelliň teoriýasy elektrik we magnit hadysalarynyň umumylaşdyrylan kanuny bolmak bilen, belli bolan tejribe maglumatlaryny düşündirdi we onuň bilen çäklenmän, birnäçe açylmadyk hadysalary hem öňünden aýtdy. Teoriýanyň esasy netijeleriniň biri-de, süýşme toguň magnit meýdanynyň bolmagydyr. Bu ýagdaý Makswelle, entek tejribede açylmanka, elektromagnit tolkunlarynyň bardygyny aýtmaga mümkinçilik berdi. Elektromagnit meýdanynyň oýanmasynyň giňişlikde gutarnykly tizlik bilen ýaýramagyna **elektromagnit tolkuny** diýilýär. Zarýad we tok bilen baglanyşyksyz erkin **elektromagnit tolkunynyň wakuumdaky ýaýraýyş tizliginiň** $c = 3 \cdot 10^8$ m/s-e deňdigi soňra açyldy. Bu netijeler we teoretiki gözlegler Makswell tarapyndan ýagtylygyň elektromagnit teoriýasynyň açylmagyna getirdi. Bu teoriýa esasynda ýagtylyk elektromagnit tolkunydyr. Erkin zarýady özünde saklamaýan we makrotoklar bolmadyk oblastlar üçin Makswelliň deňlemeleri:

$$\mathrm{rot}\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \qquad \mathrm{rot}\vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \qquad \mathrm{div}\vec{D} = 0, \qquad \mathrm{div}\vec{B} = 0 \qquad (26.15)$$

görnüşde bolýar. Segnetoelektrik we ferromagnetik häsiýetleri bolmadyk birhilli izotropik sreda üçin alarys:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}, \qquad \vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H},$$

bu ýerde ε we μ – wagta we koordinatlara bagly däl hemişelik skalýar ululyklardyr. Bu ýagdaý üçin Makswelliň (26.15) deňliklerini ýazalyň:

$$\mathrm{rot}\vec{E} = -\mu_0 \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \qquad \mathrm{rot}\vec{H} = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t},$$

$$\mathrm{div}\vec{E} = 0, \qquad \mathrm{div}\vec{H} = 0. \qquad (26.16)$$

Dekartyň koordinata oklaryna bolan proeksiýalar üçin alarys:

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = -\mu_0 \mu \frac{\partial H_x}{\partial t}, &&\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -\mu_0 \mu \frac{\partial H_y}{\partial t},\\
&\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -\mu_0 \mu \frac{\partial H_z}{\partial t}, &&\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = 0, \qquad (26.17)\\
&\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t}, &&\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t},\\
&\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t}, &&\frac{\partial H_x}{\partial x} + \frac{\partial H_y}{\partial y} + \frac{\partial H_z}{\partial z} = 0.
\end{aligned}$$

(26.17) deňliklerden alarys:

$$\varepsilon_0\varepsilon\frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial t}\left[\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z}\right] = \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial H_z}{\partial t}\right) - \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial H_y}{\partial t}\right) =$$

$$= \frac{1}{\mu_0\mu}\left[\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x}\right)\right] =$$

$$= \frac{1}{\mu_0\mu}\left[\frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} - \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial E_y}{\partial y} - \frac{\partial E_z}{\partial z}\right)\right] = \frac{1}{\mu_0\mu}\left(\frac{\partial^2 E_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2}\right).$$

Şeýlelikde

$$\nabla^2 E_x - \varepsilon_0\varepsilon\mu_0\mu\frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2} = 0. \qquad (26.18)$$

deňlemäni alarys. Bu ýerde ∇ – Laplasyň operatory. E_y, E_z, H_x, H_y, H_z üçin hem şuňa meňzeş deňlemeler alynýar, onda

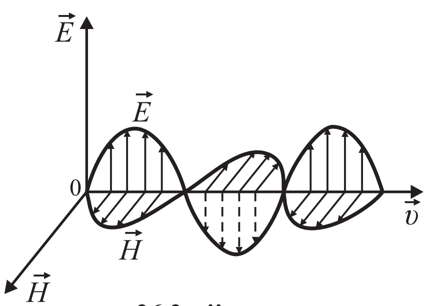
$$\nabla^2 \vec{E} - \varepsilon_0\varepsilon\mu_0\mu\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0, \qquad (26.19)$$

$$\nabla^2 \vec{H} - \varepsilon_0\varepsilon\mu_0\mu\frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0. \qquad (26.20)$$

(26.19) we (26.20) görnüşdäki deňlemeler **tolkun deňlemeleridir.** Şeýlelikde, elektromagnit meýdany giňişlikde tolkun görnüşde ýaýraýar diýmäge esas döreýär. Bu dogrudan-da şeýledir. Onuň faza tizligi

$$\upsilon = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}} \qquad (26.21)$$

formula bilen hasaplanýar. Bu ýerde $c = \dfrac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}$ – elektromagnit tolkunynyň wakuumdaky tizligi. $c = 3\cdot 10^8$ *m/s* ululyk ýagtylygyň wakuumdaky tizligi bilen gabat gelýär. Bu bolsa ýagtylygyň elektromagnit tolkunydygyny subut edýän ýene-de bir maglumatdyr.



26.3-nji çyzgy

Elektromagnit tolkuny kese tolkundyr. Tolkunyň meýdanynyň $\vec{E}$ we $\vec{H}$ wektorlary tolkunyň ýaýraýyş ugruna perpendikulýar ugurlarda ýatýarlar. Eger tolkunyň ýaýraýyş tizligini $\vec{\upsilon}$ wektor bilen bellesek, onda $\vec{E}$, $\vec{H}$ we $\vec{\upsilon}$ wektorlar saglakaý hyr sistemasyny emele getirýärler (*26.3-nji çyzgy*).

Makswelliň deňlemelerinden elektromagnit tolkunynyň $\vec{E}$ we $\vec{H}$ wektorlarynyň birmeňzeş fazada yrgyldaýandygy gelip çykýar. Olaryň pursatlaýyn bahalary

$$\sqrt{\varepsilon_0\varepsilon}\,E = \sqrt{\mu_0\mu}\,H \qquad (26.22)$$

gatnaşyk bilen baglydyr.

(26.19) we (26.21) deňlemelerden

$$\frac{\partial^2 \vec{E_y}}{\partial x^2} = \frac{1}{\upsilon^2}\frac{\partial^2 \vec{E_y}}{\partial t^2}, \tag{26.23}$$

$$\frac{\partial^2 \vec{H_z}}{\partial x^2} = \frac{1}{\upsilon^2}\frac{\partial^2 \vec{H_z}}{\partial t^2} \tag{26.24}$$

deňlemelere geçmek bolar. Bu ýerde E we H-yň ýanyndaky y we z indeksler $\vec{E}$ we $\vec{H}$ wektorlaryň özara perpendikulýar y we z oklary bilen ugurdaşdygyny görkezýär.

(26.23) we (26.24) deňlemeleri tekiz monohromatik elektromagnit tolkunynyň

$$E_y = E_0\cos(\omega t - kx + \varphi), \tag{26.25}$$

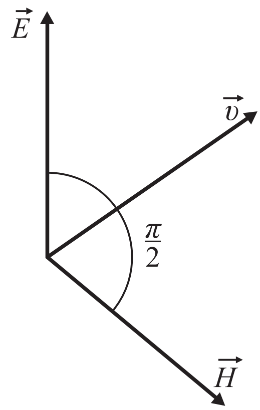
$$H_z = H_0\cos(\omega t - kx + \varphi) \tag{26.26}$$

görnüşdäki deňlemeleri kanagatlandyrýar. Monohromatik tolkun diýmek diňe bir kesgitli ýygylykly tolkundyr. Bu ýerde E_0 we H_0 – tolkunyň elektrik we magnit meýdanlarynyň güýjenmesiniň amplituda bahalarydyr; $k = \frac{\omega}{\upsilon}$ – tolkun sany, ω – tolkunyň aýlaw ýygylygy, φ – koordinatasy $x = 0$ bolan nokat üçin başlangyç faza, (26.25) we (26.26) deňlemelerde φ-ler deňdir. Sebäbi, $\vec{E}$ we $\vec{H}$ wektorlar deňfazaly yrgyldy edýärler.

26.3. Elektromagnit tolkunynyň häsiýetleri. Dipolyň şöhlelenmesi

Makswelliň deňlemelerinden tolkun deňlemelerine geçilişini derňäp, aşakdaky netijeleri almak bolar:

1. Elektromagnit tolkuny kese tolkundyr. Sebäbi $E_x = H_x = 0$ şert tekiz tolkunyň x ugur boýunça ýaýraýandygyny, $\vec{E}$ we $\vec{H}$ wektorlaryň bolsa ýaýraýyş ugra perpendikulýar tekizlikde yrgyldaýandygyny görkezýär. Onda $\vec{E} \perp \vec{\upsilon}$ we $\vec{H} \perp \vec{\upsilon}$ bolar.



26.4-nji çyzgy

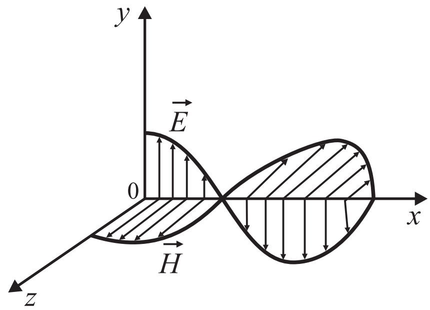
2. Elektromagnit tolkunynda $\vec{E_y}$ we $\vec{H_z}$ wektorlar bir-birlerine hemişe perpendikulýardyrlar. $\vec{E_y}$ we $\vec{H_z}$ ýa-da $\vec{E_z}$ we $\vec{H_y}$ düzüjileriň noldan uly bolýandygy muny tassyklaýar. $\vec{E}$ we $\vec{H}$ wektorlaryň $\vec{\upsilon}$ wektora görä ugry saglakaý hyryň düzgüni bilen kesgitlenýär (*26.4-nji çyzgy*).

Wagtyň berlen pursaty üçin tekiz elektromagnit tolkunyny 26.4-nji çyzgydaky ýaly grafiki şekillendirmek dogrudyr.

Dielektrik sredada ýaýraýan elektromagnit tolkunynyň $\vec{E}$ we $\vec{H}$ wektorlarynyň deň fazada yrgyldaýandygy (*26.5-nji çyzgy*), şeýle hem $\vec{E}$ we $\vec{H}$ wektorlaryň amplitudalarynyň

$$\sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon}\, E_m = \sqrt{\mu_0 \mu}\, H_m$$

aňlatma bilen baglanyşýandygy Makswelliň deňlemelerinden gelip çykýar.



26.5-nji çyzgy

Dipolyň elektromagnit tolkunyny şöhlelendirişine seredeliň. Goý, dipolyň $\vec{P}$ elektrik momenti wagta görä

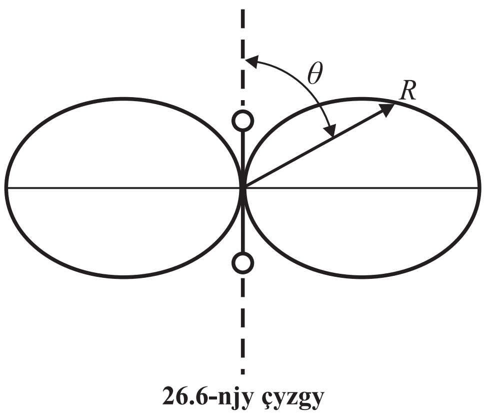
$$\vec{P} = \vec{P}_m \cos \omega t \qquad (26.13)$$

garmonik kanun bilen üýtgeýän bolsun. Onda Makswelliň differensial görnüşli deňlemelerine esaslanýan teoriýasynyň görkezişi ýaly, dipoldan uzak ($R >> \lambda$) aralykdaky, ýagny tekiz tolkunly zolakda elektromagnit meýdany

$$E = \frac{E_m}{R} \cos \omega \left(t - \frac{R}{\upsilon}\right) \sin \theta,$$

$$H = \frac{H_m}{R} \cos \omega \left(t - \frac{R}{\upsilon}\right) \sin \theta \qquad (26.14)$$

aňlatmalar bilen kesgitlener. Aňlatmalardan görnüşi ýaly, üýtgeýän momentli elektrik dipolynyň uzak aralykdaky elektromagnit meýdany sferiki elektromagnit tolkunyň häsiýetindedir. Bu bolsa şeýle dipolyň hakykatdan-da elektromagnit tolkunyny şöhlelendirýändigini tassyklaýar. Aňlatmalardaky θ burç (*26.6-njy çyzgy*) dipolyň $\vec{P}$ momenti bilen dipolyň ortasyndan gözegçilik edilýän nokada geçirilen radius-wektoryň arasyndaky burçdur.



26.6-njy çyzgy

Aňlatmalarda $\sin\theta$ köpeldijiniň bolmagy şöhlelenmäniň ugurlar boýunça üýtgeýändigini görkezýär. Dipoldan has uly aralyklarda sferiki elektromagnit tolkuny tekiz tolkuna öwrülýär.

Dipolyň meýdanynyň öwrenilmeginiň radiotehnika we antenna teoriýalary üçin uly ähmiýeti bardyr. Sebäbi elektromagnit tolkunyny şöhlelendirýän antennalar sistemasyna elementar şöhlelendirijileriň toplumy ýaly seredip bolýar.

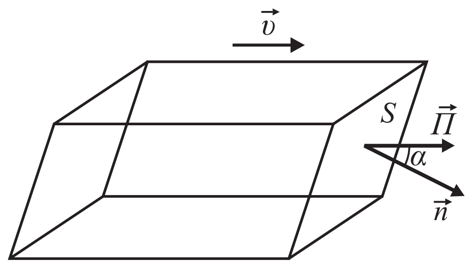
Üýtgeýän magnit momentli magnit dipoly hem elektromagnit tolkunyny şöhlelendirýär. Üýtgeýän tokly sargyny ýa-da tegegi şeýle dipol hökmünde kabul etmek bolar. Emma ol sargynyň ýa-da tegegiň gönümel ölçegleri geçýän üýtgeýän toguň tolkun uzynlygyndan has kiçi bolmalydyr.

26.4. Elektromagnit tolkunynyň energiýasy

Islendik S meýdançadan tükeniksiz kiçi dt wagtda geçýän elektromagnit tolkunynyň dW energiýasyny öwreneliň (*26.7-nji çyzgy*). Onuň üçin esasy S meýdança, gapyrgalary υdt bolan parallelepipedi alalyň. Bu parallelepipediň göwrümi

$$\Delta V = S\upsilon dt\cos\alpha, \qquad (26.28)$$

bu ýerde α – meýdança inderilen $\vec{n}$ normal bilen tizlik wektorynyň arasyndaky burç. dt wagtda tolkunyň υdt aralygy geçýändigini göz önünde tutsak, berlen meýdançadan geçýän dW energiýa parallelepipediň içinde jemlenen energiýa deňdir. Elektromagnit tolkunynyň energiýasy onuň ýaýraýan giňişliginde jemlenendir. Ony häsiýetlendirmek üçin energiýanyň göwrüm dykyzlygy diýen düşünje girizilýär. Onda göwrüm birligindäki energiýany aşakdaky görnüşde ýazmak bolar:



26.7-nji çyzgy

$$dW = wdV = wS\upsilon dt\cos\alpha.$$

Energiýanyň göwrüm dykyzlygy elektrik meýdanynyň we magnit meýdanynyň energiýalarynyň w_e we w_m göwrüm dykyzlyklarynyň jemine deňdir:

$$w = w_e + w_m = \frac{1}{2}(\varepsilon_0\varepsilon E^2 + \mu_0\mu H^2).$$

Elektromagnit tolkunynyň $\vec{E}$ we $\vec{H}$ güýjenmeleri

$$\sqrt{\varepsilon_0\varepsilon}\,E = \sqrt{\mu_0\mu}\,H \qquad (26.29)$$

aňlatma bilen baglanyşyklydyr. Onda

$$w = \frac{\varepsilon_0\varepsilon E^2}{2} + \frac{\mu_0\mu H^2}{2}.$$

(26.29) deňlemä görä islendik wagt pursaty üçin elektrik we magnit meýdanlarynyň energiýalarynyň deň bolýandygyny ($w_{el} = w_{mag}$) hasaba alyp, ýazmak bolar

$$w = 2w_{el} = \varepsilon_0\varepsilon E = \sqrt{\varepsilon_0\mu_0}\sqrt{\varepsilon\mu}\,EH. \qquad (26.30)$$

$$\upsilon = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}\cdot\sqrt{\varepsilon\mu}}$$

baglanşygy we (26.30) deňligi peýdalanyp, (26.28) deňlikden alarys:

$$dW = EHdt\cos\alpha.$$

Bu ýerden, S meýdançadan birlik wagtda geçýän energiýany hasaplasak

$$\frac{dW}{dt} = EHS\cos\alpha$$

bolar. Elektromagnit energiýasynyň akymynyň wektory $\vec{\Pi}$ diýen düşünjäni girizip, alnan netijäni

$$\vec{\Pi} = [\vec{E}\vec{H}] \tag{26.31}$$

görnüşde ýazmak bolar. Elektromagnit tolkunynda $\vec{E}$ bilen $\vec{H}$ wektorlaryň perpendikulýardygyny göz öňünde tutsak, $\vec{\Pi}$ wektoryň bahasy $\Pi = EH$ bolar. $\vec{\Pi}$ wektoryň ugry $\vec{E}$ we $\vec{H}$ wektorlaryň ikisine-de perpendikulýardyr, ýagny $\vec{\upsilon}$ wektoryň ugry bilen gabat gelýär. Onuň moduly tolkunyň ýaýraýan ugruna perpendikulýar bolan birlik meýdandan bir sekuntda geçýän elektromagnit tolkunynyň energiýasyna deňdir.

Diýmek, **elektromagnit meýdanynyň energiýasyny** we onuň hereketini energiýanyň akymynyň $\vec{\Pi}$ wektorynyň üsti bilen häsiýetlendirip bolar.

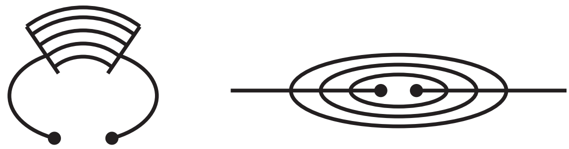
Energiýanyň akymynyň wektory diýen düşünje I.A. Umowyň dürli sredalardaky tolkunyň hereketine degişli işlerinde girizildi. Elektromagnit meýdany üçin (26.31) aňlatma Poýting tarapyndan girizildi. Şonuň üçin hem elektromagnit energiýasynyň akymynyň $\vec{\Pi}$ wektoryna **Umowyň-Poýtingiň** ýa-da **Poýtingiň wektory** diýilýär.

26.5. Elektromagnit tolkunlarynyň eksperimentde alnyşy

Geçirijiden hemişelik tok geçende onuň töwereginde hemişelik magnit meýdany döreýär. Tok üýtgeýän bolsa üýtgeýän magnit meýdany döreýär. Makswelliň teoriýasyna laýyklykda, üýtgeýän magnit meýdany üýtgeýän elektrik meýdanyny, üýtgeýän elektrik meýdany bolsa, ýene-de üýtgeýän magnit meýdanyny döredýär. Diýmek, elektromagnit tolkuny döreýär. Üýtgeýän tok geçýän islendik geçiriji we yrgyldyly kontur elektromagnit tolkunynyň çeşmesidir, ýöne bu çeşmeleriň şöhlelendiriş ukyby pesdir. Sebäbi çeşmäniň şöhlelendiriş ukyby onuň formasyna, ölçeglerine we yrgyldynyň ýygylygyna baglydyr.

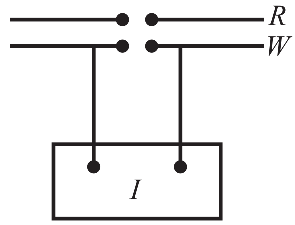
Ýokary şöhlelendiriş ukyply çeşme almak üçin Gers öz tejribelerinde kondensatoryň plastinalarynyň meýdanyny ulaltdy we olaryň arasyny açyp adaty ýapyk konturdan **açyk yrgyldyly kontury (Gersiň wibratoryny)** döretdi. Gersiň wibratory aralary uçgun döreýän giňişlik bilen bölünen iki sterženden ybaratdyr.

Açyk konturda üýtgeýän elektrik meýdany diňe obkladkalaryň ýakynynda däl-de, kontury gurşap alan giňişlikde-de ýüze çykýar (*26.8-nji çyzgy*). Bu ýagdaý bolsa, elektromagnit şöhlelenmesiniň depginini güýçlendirýär. Beýle sistemada elektrik energiýasynyň ýitgisi kondensatoryň obkladkalaryna birleşdirilýän EHG-niň çeşmesiniň hasabyna doldurylýar.



26.8-nji çyzgy

Elektromagnit tolkunyny oýandyrmak üçin Gersiň wibratory (*W*) induktora (*I*) birikdirilýär (*26.9-njy çyzgy*). Uçgun giňişliginde napryýaženiýe böwşüliş baha ýetende uçgun döreýär we ol wibratoryň iki bölegini birleşdirýär. Wibratorda erkin togtamaýan yrgyldy döreýär. Uçgun ýok bolanda kontur üzülýär we yrgyldy bolmaýar. Soňra induktor ýene-de kondensatora zarýad berýär we yrgyldy ýüze çykýar.



26.9-njy çyzgy

Elektromagnit tolkunyny kabul ediji hökmünde Gers rezonator (*R*) diýilýän ikinji wibratory ulandy. Rezonatoryň hususy ýygylygy wibratoryň hususy ýygylygyna deňdir. Şeýle bolansoň, elektromagnit tolkunlary rezonatora düşende elektrik uçguny ýüze çykýar.

Bu wibratoryň kömegi bilen Gers tolkun uzynlygy 3 metre çenli bolan elektromagnit tolkunyny aldy. P. Lebedew bu usuly kämilleşdirip, 4 ÷ 6 *m* uzynlygy bolan elektromagnit tolkunyny almagy başardy. Soňra, A. Glagolýewa-Arkadýewa başga gurluşly, köpçülikleýin şöhlelendiriji diýilýän çeşme ýasady. Bu gurluşda şöhlelendirijiler bolup ýagda göwrüm boýunça paýlanan metal gyryndylar hyzmat edýär. Gyryndylaryň arasynda uçgun döredilýär we atomlardaky (ionlardaky) elektrik zarýadlarynyň yrgyldylary gysga elektromagnit tolkunyny şöhlelendirýär. Şeýle usul bilen uzynlygy 50 *mm*-den 80 *mkm*-e çenli bolan elektromagnit tolkuny alyndy.

Seredip geçilen çeşmelerde döredilýän elektromagnit yrgyldylary tiz togtaýar we kiçi kuwwatlydyr. Häzirki wagtda elektromagnit tolkunlary yrgyldyly kontura onuň hususy ýygylygyna deň ýygylykly togtamaýan yrgyldy berýän çyraly we ýarymgeçirijili awtoyrgylygy sistemalary ulanmak bilen alynýar.

Elektromagnit tolkunlary ýygylygyň giň çäklerinde ýerleşmek bilen biri-birlerinden öndürilişi, kabul edilişi we başga-da birnäçe häsiýetleri boýunça tapawutlanýarlar. Elektromagnit tolkunlary radiotolkunlar, ýagtylyk tolkunlary, rentgen we gamma şöhleleri diýen birnäçe görnüşe bölünýär. Bu görnüşler barada käbir maglumatlar 26.1-nji tablisada berlendir. Elektromagnit şöhleleriniň dürli görnüşlere bölnüşi şertlidir.

26.1-nji tablisa

Şöhlenmäniň görnüşi	**Tolkun uzynlygy, *m***	**Tolkunyň ýygylygy, *Gs***	**Şöhlenmäniň çeşmesi**
Radiotolkunlar	$10^3 - 10^{-4}$	$3 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^{12}$	Yrgyldyly kontur, Gersiň wibratory, Köpçülikleýin şöhlelendiriji, Çyraly generator
Ýagtylyk tolkunlary: – infragyzyl şöhlelenme. Görünýän şöhle	$5 \cdot 10^{-4} - 8 \cdot 10^{-7}$ $8 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{11} - 3{,}75 \cdot 10^{14}$ $3{,}75 \cdot 10^{14} - 7{,}5 \cdot 10^{14}$	Çyralar, lazerler
Ultramelewşe şöhle	$4 \cdot 10^{-7} - 10^{-9}$	$7{,}5 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{17}$	
Rentgen şöhlesi	$2 \cdot 10^{-9} - 6 \cdot 10^{-12}$	$1{,}5 \cdot 10^{17} - 5 \cdot 10^{19}$	Rentgeniň turbasy
Gamma şöhlelenme	$< 6 \cdot 10^{-12}$	$> 5 \cdot 10^{19}$	Radioaktiw dargama Ýadro prosesleri Kosmiki prosesler

Radiotolkunlar aşa uzyn tolkunlar (λ = 100 *km* – 10 *km*, meriametrlik); uzyn tolkunlar (10 – 1 *km*, kilometrlik); orta tolkunlar (1 *km* – 100 *m*, gektometrlik); gysga tolkunlar (100 *m* – 10 *m*, dekametrlik); ultragysga tolkunlar (10 – 1 *dm*, metrlik), (1 *m* – 1 *dm*, desimetrlik), (10 – 1 *sm*, santimetrlik), (10 – 1 *mm*, millimetrlik), (1 – 0,1 *mm*, desimillimetrlik) diýen görnüşlere bölünýärler.

Santimetrlik we millimetrlik elektromagnit tolkunlarynyň päsgelçiliklerden serpikme häsiýeti bar. Bu hadysa olary radiolokasiýada ulanmaga we onuň kömegi bilen daş aralykdaky uçarlary, gämileri görmäge, olaryň giňişlikdäki ornuny takyk kesgitlemäge mümkinçilik berýär. Şeýle-de radiolokasiýasynyň kömegi bilen bulutlaryň emele gelşine, atmosferanyň ýokary gatlaklaryndaky meteoritleriň hereketlerine we ş.m. syn edip bolýar.

Elektromagnit şöhleleriniň päsgelçilikden öwrülip geçmek häsiýeti bardyr, ýagny onda difraksiýa hadysasy ýüze çykýar. Ýeriň üstüniň güberçekdigini göz öňüne getirsek, onda daşrak ýerüsti nokatlar bilen radioaragatnaşygyny gurmaga difraksiýa hadysasynyň mümkinçilik berýändigine göz ýetirmek bolýar. Difraksiýa hadysasy uzyn tolkunlara has mahsusdyr. Gysga tolkunlar ýeriň üsti boýunça egri ugur boýunça ýaýramaýarlar. Olar göni çyzyk boýunça ýaýraýarlar we telegörkezijilerde şekilleri uzak bolmadyk aralyklara ýaýratmak üçin ulanylýar.

Radiogepleşik üçin ulanylýan gysga tolkunlaryň ionosfera gatlagyndan we ýerden serpikme häsiýetleri bardyr. Gysga tolkunlaryň bu häsiýeti, ýagny ionosferadan we ýerden serpikmesi we onuň yzygiderli gaýtalap durmagy ýeriň islendik nokady bilen radioaragatnaşygy amala aşyrmaga mümkinçilik berýär. Ultragysga tolkunlar ionosfera gatlagyndan serpikmän parran geçýär. Bu häsiýeti üçin olar emeli hemralar, kosmiki korabllar bilen aragatnaşyk saklamakda we beýleki kosmiki jisimleri öwrenmekde ulanmaga mümkinçilik berýär. Elektromagnit tolkunlary radiogeodeziýada, radioastronomiýada, keseli anyklaýyş enjamlarynda hem ulanylýar. Jemläp aýdylanda, tehnikanyň we ylymyň elektromagnit tolkunlaryny ulanmaýan pudagy ýokdur.

IV bölüm

OPTIKA

XXVII BAP. ÝAGTYLYGYŇ INTERFERENSIÝASY

27.1. Umumy düşünjeler

Fizikanyň optika bölüminde ýagtylygyň şöhlelendirilişi, ýaýraýşy we ýagtylyk maddalar bilen täsirleşende bolup geçýän hadysalar öwrenilýär. Ýagtylyk şöhlesi elektromagnit tolkunydyr. Şeýle bolany üçin optika elektromagnit meýdany baradaky taglymatyň bir bölegi ýaly seretmek bolar. **Optiki şöhlelenme** diýen düşünjä adamyň gözüne görünýän şöhlelenmeden başga-da, infragyzyl we ultramelewşe şöhleler girýär. Optiki şöhlelenmäniň ýygylygy $3 \cdot 10^{11} \div 3 \cdot 10^{17}$ *Gs* aralyklardadyr. Göze görünýän ýagtylyk şöhleleriniň ýygylygy $0{,}39 \cdot 10^{15} \div 0{,}75 \cdot 10^{15}$ *Gs* aralykdadyr.

Fiziki optikada ýagtylygyň tebigaty we ýagtylyk hadysalary öwrenilýär. Ýagtylyk elektromagnit tolkunydyr diýen düşünje ýagtylygyň interferensiýasyny, difraksiýasyny, polýarlanmasyny we ýagtylygyň anizotrop giňişliklerde ýaýramagyna degişli öwrenilen köp tejribeleriň netijesinde kabul edilendir. Ýagtylygyň tolkun tebigatynyň ýüze çykýan hadysalary optikanyň **tolkun optikasy** diýilýän bölüminde öwrenilýär. Onuň matematiki esasy bolup, klassyky elektrodinamikanyň umumy deňlemeleri, ýagny Makswelliň deňlemeleri hyzmat edýär.

Tolkun optikasynyň ösüşinde ε dielektrik we μ magnit syzyjylyklarynyň maddanyň kristallik gurluşyndaky baglanyşyklary öwrenmekde ähmiýeti uludyr.

Klassyky tolkun optikasynda sredanyň görkezijileri ýagtylygyň intensiwligine bagly däl diýlip hasaplanýar. Şonuň üçin optiki hadysalar çyzykly differensial deňlemeler bilen ýazylýar. Ýöne köp halatlarda, aýratynda ýagtylyk akymynyň has ýokary intensiwliginde ýokarky tekrarlama bozulýan ýagdaýlary bar.

Material sredalarda ýagtylygyň ýaýramagyny oňat düşündirýän tolkun optikasy ýagtylygyň goýberilişini we siňdirilmesini düşündirip bilmedi. Bu hadysalary we elektromagnit tolkunynyň maddalar bilen täsirleşişini termodinamiki nukdaý nazardan öwrenmek elementar sistemanyň (atomyň, molekulanyň) diňe energiýasy ýygylyga göni bagly bolan kwantlar görnüşinde goýberýändigi baradaky netijä getirdi. Şonuň üçin ýagtylyk elektromagnit şöhlesini ýagtylyk kwantynyň akymy (fotonlar) bilen deňeşdirmek zerurlygy ýüze çykýar. Ýagtylygyň maddalar bilen täsirleşmegi netijesinde elementar sistemalarda ýüze çykýan hadysalar **kwant optikasynda** öwrenilýär.

Ýagtylygyň tebigatynyň ikileýinligi, ýagny onda şol bir wagtda tolkunlara we bölejiklere mahsus häsiýetleriň ýüze çykmagyna **korpuskulýar-tolkun dualizmi** (ikileýinlik) diýilýär.

27.2. Kogerent tolkunlar. Ýagtylygyň interferensiýasy

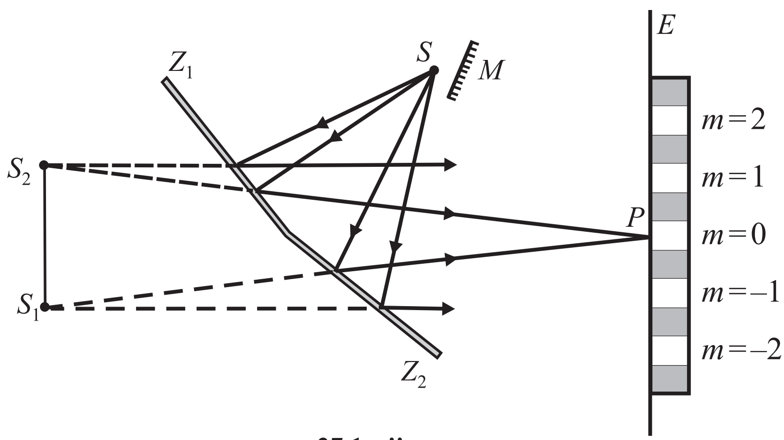
Ýagtylyk tolkuny elektromagnit tolkuny bolany üçin elektrik we magnit wektorlary ($\vec{E}$ we $\vec{B}$) bilen häsiýetlendirilýär. Tejribeleriň görkezişi ýaly, elektrik güýjenmesiniň $\vec{E}$ wektorynyň optiki hadysalarda has kesgitli täsiri bardyr. Şonuň üçin $\vec{E}$ wektora **ýagtylyk wektory** hem diýilýär. Tolkunyň elektrik we magnit wektorlarynyň ($\vec{E}$ we $\vec{B}$) düzüjileri hemişelik ýygylyk bilen gormonik yrgyldy edýän bolsa, bu tolkuna **monohromatik tolkun** diýilýär.

Fazalarynyň tapawudy wagta bagly üýtgemeýän iki tolkuna **kogerent tolkunlar** diýilýär. Bu şert monohromatik tolkunlar üçin ýerine ýetýär.

Iki kogerent tolkun üsti-üstüne ýerleşdirilende giňişlikde ýagtylyk akymynyň paýlanyşygynyň netijesinde käbir ýerlerde intensiwligiň iň uly bahalary, beýleki bir ýerlerde bolsa iň kiçi bahalary ýüze çykýar. Bu hadysa **ýagtylygyň interferensiýasy** diýilýär.

Iki ýagtylyk şöhlesi (lazer bolmasa), adatça, kogerent şöhleler goýbermeýär. Kogerent tolkunlary almak üçin, bir çeşmäniň şöhlesini iki ýa-da birnäçe şöhlelere bölmek usuly ulanylýar. Kogerent tolkunlary almagyň kämil usullarynyň biri Freneliň zerkalolaryny ulanmak usulydyr.

Freneliň zerkalolarynyň kömegi bilen interferensiýa şekiliniň alnyşy 27.1-nji çyzgyda görkezilendir. Z_1 we Z_2 zerkalolar 180°-a golaý burç bilen ýerleşdirilýär. S



27.1-nji çyzgy

ýagtylyk çeşmesinden zerkalolara monohromatik ýagtylyk şöhlesi düşende her zerkaloda S_1 we S_2 hyýaly kogerent ýagtylyk çeşmeleri emele gelýär. Olardan kogerent şöhleler E ekrana düşýär. S ýagtylyk çeşmesinden ekrana ýagtylyk düşmezligi üçin M serpikdiriji goýulýar. S_1 we S_2 kogerent ýagtylyk çeşmelerinden ekrana düşýän ýagtylyk gaýtalanyp gelýän ýagty zolaklar we garaňky zolaklar görnüşinde interferensiýa şekillerini döredýär.

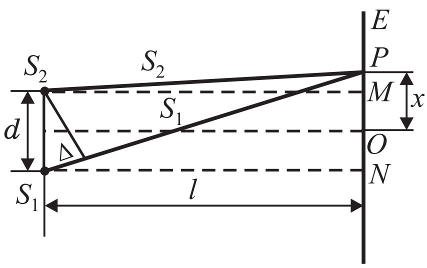
Ekranyň P nokadynda ýagtylandyryşyň maksimumynyň bolmagy üçin şöhleleriň optiki ýollarynyň tapawudy

$$\Delta = S_1P - S_2P = 2m\frac{\lambda}{2} \quad (m = 0, 1, 2...) \tag{27.1}$$

bolmaly, ýagny ýollaryň tapawudy bir ýa-da birnäçe jübüt ýarymtolkunyň uzynlygyna deň bolmaly. Ýagtylandyryşyň minimumynyň ýüze çykmagy üçin

$$\Delta = (2m + 1)\frac{\lambda}{2} \tag{27.2}$$

şert ýerine ýetmeli. Ýagny, optiki ýollaryň tapawudy täk ýarymtolkunyň uzynlygyna deň bolmaly.



27.2-nji çyzgy

Ýollaryň tapawudyny hasaplamak üçin 27.2-nji çyzgydan peýdalanalyň. Çyzgyda S_1 we S_2 şöhleleriň arasy d bilen, çeşmeleriň tekizliginden ekrana çenli aralyk l bilen bellenen.

Ekrandaky O nokat S_1 we S_2 çeşmelerden deň aralyklarda ýerleşendigi üçin S_1O we S_2O ýollar deň bolýar. O nokat maksimal ýagtylandyrylan bolýar (nolunjy tertipli maksimum).

Beýleki interferensiýa maksimumlarynyň boljak nokatlaryny P bilen belläp olara çenli bolan x aralyklary kesgitläliň. S_1PN we S_2PM gönüburçly üçburçlyklardan alarys:

$$(S_1P)^2 = l^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2,$$

$$(S_2P)^2 = l^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2,$$

bu ýerden

$$(S_1P)^2 - (S_2P)^2 = (S_1P - S_2P)(S_1P + S_2P) = 2xd.$$

$d << l$ bolany üçin $S_1P + S_2P \approx 2l$ deňligi ulanmak bolar. $S_1P - S_2P = \Delta$ bilen belläp, gutarnykly deňligi alarys:

$$\Delta = \frac{xd}{l}.$$

Şeýlelikde, maksimumlaryň ýerleşýän nokatlaryna çenli x aralygy

$$\frac{xd}{l} = 2m\frac{\lambda}{2}$$

şertden tapmak bolar:

$$x = \frac{x\lambda l}{d}. \quad (27.3)$$

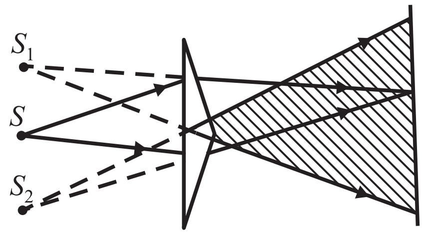
Minimumlar üçin meňzeş şert

$$x = (2m + 1)\frac{\lambda l}{2d} \quad (27.4)$$

görnüşde bolar.

Bu deňliklerden ekranda gezekleşip gelýän ýagty we garaňky zoloklaryň boljakdygy görünýär. x, d we l ululyklaryň bahalaryny ölçäp, (27.3) formuladan peýdalanyp, ýagtylyk tolkunynyň λ uzynlygyny kesgitläp bolýar.

Freneliň biprizmasynda hem (*27.3-nji çyzgy*) ýokarkylara meňzeş interferensiýa şekillerini alyp bolýar. Freneliň biprizmasy döwüji burçlary kiçi bolan, esaslary birleşdirilen iki prizmadan ybaratdyr.



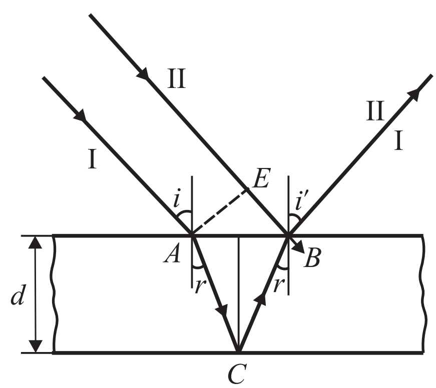
27.3-nji çyzgy

S çeşmeden çykýan ýagtylyk şöhlesi iki prizmada hem döwülýär we iki çeşmeden çykýan kogerent şöhleler ýaly bolýar. Şeýlelikde ekranda kogerent ýagtylyk desseleriniň üsti-üstüne goýulmasy bolýar we interferensiýa hadysasy ýüze çykýar.

27.3. Ýagtylygyň ýuka plastinalardaky interferensiýasy

Ýagtylyk tolkuny ýuka dury plastina (ýa-da plýonka) düşende plastinanyň iki üstünden hem serpikme bolup geçýär, ýagny iki ýagtylyk tolkuny döreýär we olar käbir şertlerde interferensiýa şekillerini ýüze çykaryp bilýär (*27.4-nji çyzgy*).

Galyňlygy d, döwülme görkezijisi n bolan ýuka tekiz parallel plastina i düşme burçy bilen howadan ($n_h = 1$) parallel ýagtylyk dessesi düşýän bolsun. Plastinanyň A nokadyna düşýän I şöhläniň bir bölegi serpigýär, beýleki bölegi bolsa r döwülme burçy bilen plastina girýär. Ol C nokada baranda bir bölegi plastinadan howa çykýar, beýleki bölegi bolsa serpigip B nokada gönükýär.



27.4-nji çyzgy

B nokatda şöhläniň bir bölegi i' döwülme burç bilen howa çykýar. Mundan başga-da B nokada II şöhle düşýär we onuň bir bölegi i' serpikme burç bilen plastinadan serpigýär. Şeýlelikde, bir ugur boýunça gönügen we dürli optiki ýollary geçen iki şöhle alynýar.

Tolkunyň *AE* frontunda şöhleler deň fazalarda bolýarlar. Soňra olar dürli sredalarda dürli ýollary geçýärler. Şeýle-de, *EB* şöhle optiki taýdan dykyz sredadan serpigende $\frac{\lambda_0}{2}$ ýarym tolkun uzynlygyny ýitirýändigini hasaba almaly. Bulary hasaba alyp, I we II şöhleleriň optiki ýollarynyň tapawudyny ýazalyň:

$$\Delta = n(AC + CB) - \left(EB + \frac{\lambda_0}{2}\right) = n\frac{2d}{\cos r} - 2d\operatorname{tg} r \sin i - \frac{\lambda_0}{2}.$$

Döwülme kanunynyň

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n$$

formulasyndan peýdalanyp alarys:

$$\Delta = \frac{2nd}{\cos r} - 2d\operatorname{tg} r \sin r - \frac{\lambda_0}{2} = 2nd\frac{1-\sin^2 r}{\cos r} - \frac{\lambda_0}{2} = 2nd\cos r - \frac{\lambda_0}{2} =$$

$$= 2nd\sqrt{1-\sin^2 r} - \frac{\lambda_0}{2} = 2d\sqrt{n^2 - n^2\sin^2 r} - \frac{\lambda_0}{2}.$$

Bu ýerden

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} - \frac{\lambda_0}{2}. \tag{27.5}$$

Interferensiýa şekillerini synlamak üçin I we II şöhleler linzadan geçirilip fokal tekizlikdäki ekrana düşürilýär.

$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} - \frac{\lambda_0}{2} = m\lambda_0; \quad (m = 0, 1, 2...) \tag{27.6}$$

şert ýerine ýetende ekranyň synlanýan nokadynda maksimum alnar.

$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} - \frac{\lambda_0}{2} = (2m+1)\frac{\lambda_0}{2} \tag{27.7}$$

şert ýerine ýetende bolsa minimum alnar. Şeýlelikde, kogerent şöhleleriň üsti-üstüne goýulmagy sebäpli interferensiýa zolaklarynyň sistemasy alnar.

(27.5) deňlikden görnüşi ýaly, optiki ýollaryň Δ tapawudy i, n we d görkezijilere bagly bolany üçin her hili hallar ýüze çykyp biler.

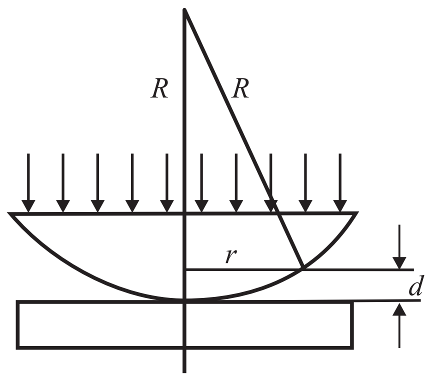
Plastinka dürli düşme burçlar bilen giňeýän (ýa-da daralýan) ýagtylyk dessesi (parallel däl) düşende plastinkanyň ýagtylandyrylyşy üýtgeýär we ýagty hem-de garaňky zolaklar emele gelýär. Olara **deň eňňitlikli zolaklar** diýilýär. Interferensiýa şekilleri bolsa, ýygnaýjy linzanyň fokal tekizliginde ýerleşen ekranda ýüze çykýar. Eger plastinkanyň galyňlygy yzygiderli üýtgeýän bolsa, ýagny plastinka pahna görnüşinde bolsa, onda onuň üstünde **deň galyňlykly zolaklar** emele gelýär. Ýagty zolaklar (27.6) şert ýerine ýetende, garaňky zolaklar bolsa (27.7) şert ýerine ýetende emele gelýär.

Tekiz parallel plastinka ak şöhle bilen ýagtylandyrylanda (27.6) maksimum şerti käbir kesgitli tolkun uzynlyklary üçin ýerine ýetýär we plastinanyň üsti diňe bir reňkde bolar. Eňňitlik burçy üýtgedilse, plastinanyň reňki üýtgär. Galyňlygy üýtgeýän (meselem, pahna şekilli) plastinalarda we plýonkalarda dürli bölgüler dürli reňklerde bolar.

Alnan netijeleriň hemmesi plýonkalar üçin hem dogrudyr.

Nýutonyň halkalary deň galyňlykly zolaklaryň gowy mysalydyr. Ol tekiz parallel plastinka bilen galtaşýan uly egrilik radiusly tekiz güberçek linzanyň arasynda emele gelýän howa giňişliginde ýüze çykýar (*27.5-nji çyzgy*).

Ýagtylygyň parallel dessesi linzanyň tekiz üstüne normal düşýär we plastinka bilen linzanyň arasyndaky howa giňişliginiň ýokarky hem-de aşaky üstlerinden bölekleýin serpigýär. Serpigen şöhleleriň üsti-üstüne goýulmagy sebäpli, deň galyňlykly zolaklar emele gelýär. Ýagtylyk normal düşende olar konsentrik tegelekler görnüşinde bolýarlar.



27.5-nji çyzgy

Serpigen şöhlede optiki ýollaryň tapawudy $n = 1$, $i = 0$ şert üçin

$$\Delta = 2d + \frac{\lambda_0}{2}$$

bolar. Bu ýerde d – howa gatlagynyň galyňlygy. Soňky deňlikde serpikmedäki ýarym tolkunyň ýitmesi hasaba alnandyr.

27.5-nji çyzgydan $R^2 = (R - d)^2 + r^2$, bu ýerde R – linzanyň egrilik radiusy, r – hemme nokatlaryna deň galyňlykly howa gatlaga degişli bolan tegelegiň radius-wektory. d-niň kiçidigini hasaba alsak

$$d = \frac{r^2}{2R}.$$

Onda

$$\Delta = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda_0}{2}. \qquad (27.8)$$

Bu deňligi maksimumyň (27.6) we minimumyň (27.7) şertlerine deňläp, m tertipli ýagty halkanyň radiusy üçin alarys:

$$r_m = \sqrt{\left(m - \frac{1}{2}\right)\lambda_0 R}, \quad (m = 1, 2...). \qquad (27.9)$$

Tertibi m bolan garaňky halkanyň radiusy:

$$r_m' = \sqrt{m\lambda_0 R}, \quad (m = 0, 1, 2...) \qquad (27.10)$$

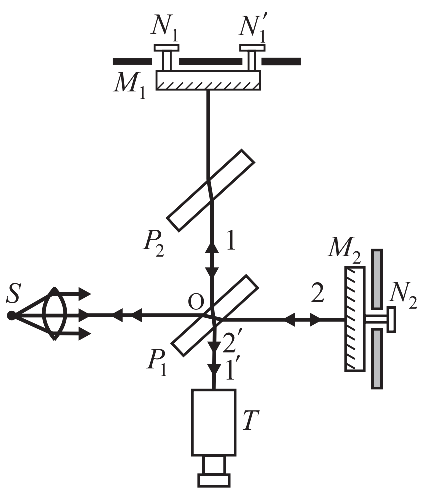
Linzanyň egrilik radiusy R belli bolanda, degişli halkanyň radiusyny ölçäp, ýagtylygyň tolkun uzynlygyny kesgitläp bolýar.

Deň eňňitlikli we deň galyňlykly zolaklar üçin maksimumlaryň ýagdaýy λ_0 tolkun uzynlygyna baglydyr. Şeýle bolansoň ýagty ýa-da garaňky halkalaryň sistemasy diňe monohromatik ýagtylyk bilen şöhlelendirilende ýüze çykýar. Sistema ak ýagtylyk bilen şöhlelendirilende dürli tolkun uzynlykly şöhleler tarapyndan emele getirilen älemgoşara meňzeş halkalar alynýar. Şu wagta çenli alan netijelerimiz diňe serpigen şöhlelere degişlidir.

Interferensiýa geçýän tolkunda hem ýüze çykýar. Bu ýagdaýda ýarym tolkunyň ýitmesi bolmaýar. Diýmek, geçýän we serpigýän şöhleler üçin optiki ýollaryň tapawudy $\frac{\lambda_0}{2}$ bolýar, ýagny geçýän şöhläniň maksimumy serpigýän şöhläniň minimumyna degişli bolýar ýa-da tersine, geçýän şöhläniň minimumy serpigýän şöhläniň maksimumyna degişli bolýar.

27.4. Ýagtylygyň interferensiýasynyň ulanylyşy. Interferometrler

Tolkunlaryň interferensiýasynyň esasynda işleýän ölçeýji abzala **interferometr** diýilýär. Interferometrler tolkun uzynlygyny ölçemek we spektrleri öwrenmek, dury sredalaryň döwülme görkezijilerini kesgitlemek, aralyklary has ýokary takyklykda ölçemek, ýyldyzlaryň we beýleki kosmos jisimleriniň burçlaýyn ululyklaryny ölçemek üçin ulanylýar.



27.6-njy çyzgy

Interferometrleriň dürli görnüşleri bardyr. 27.6-njy çyzgyda Maýkelsonyň interferometriniň shemasy şekillendirilendir. S çeşmeden ýagtylyk akymy ýagtylygyň akymynyň ýarysyny geçirýän P_1 plastinka düşýär. Ol ýuka kümüş gatlagy bilen örtülen plastinkadyr. Düşen ýagtylyk akymynyň ýarysy serpigip, 1-nji şöhläniň ugry bilen gidýär. Beýleki ýarysy plastinkadan geçip 2-nji şöhläniň ugry bilen gidýär. 1-nji şöhle M_1 zerkalodan serpigip ýene-de P_1 plastinka gelýär we ol plastinkada intensiwligi deň bolan iki dessä bölünýär. Olaryň biri P_1 plastinkadan geçýär we $1'$ dessäni emele getirýär. Beýlekisi S çeşmä tarap serpigýär. 2-nji ýagtylyk akymy hem M_2 zerkalodan serpigip, P_1 plastinka düşýär we iki şöhlä bölünýär. Olaryň biri serpigen $2'$ şöhle, beýlekisi P_1 plastinkadan döwlüp geçen bölegi. Bizi diňe $1'$ we $2'$ şöhleler gyzyklandyrýar. $1'$ we $2'$ desseleriň intensiwlikleri deňdir.

Giňişlik we wagt boýunça kogerentligiň şertleri ýerine ýetende 1′ we 2′ şöhleler interferensiýa hadysasyny ýüze çykarar. Interferensiýa şekilleri T görüş turbasyndan synlanýar. Interferensiýanyň netijesi P_1 plastinkadan M_1 we M_2 zerkalolara çenli bolan optiki ýollaryň tapawudyna baglydyr. 2-nji şöhle P_1 plastinkadan üç gezek geçýär. 1-nji şöhle bolsa, diňe bir gezek geçýär. Ýagtylyk desseleriniň ýoluna P_2 dury plastinkany goýmak bilen şöhleleriň plastinkalardaky ýollary deňleşdirilýär. Şeýlelik-de, 1′ we 2′ şöhleleriň optiki ýollarynyň uzynlygy

$$\Delta = 2n_1(l_1 - l_2) \tag{27.11}$$

bolýar. Bu ýerde n_1 – howanyň döwülme görkezijisi, l_1 we l_2, degişlilikde P_2 plastinkanyň O nokadyndan M_1 we M_2 zerkalolara çenli aralyklar. $l_1 = l_2$ bolanda interferensiýanyň maksimumy emele gelýär.

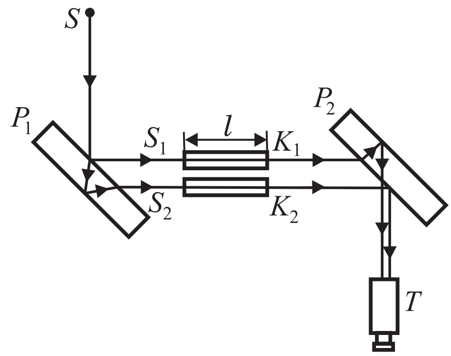
N_1 we N_1' nurbatlary towlamak bilen, M_1 zerkalony kiçi burçlara gyşardyp bolýar. Şeýle bolanda M_2 zerkalonyň dürli nokatlaryna düşýän şöhleler dürli ýollary geçýärler. Netijede, okulýardan garaňky we ýagty parallel çyzyklaryň sistemasy görünýär.

Olar deň galyňlykly zolaklary emele getirýärler. N_2 nurbadyň kömegi bilen M_2 zerkalo süýşürilende, deň galyňlykly zolaklarda orun üýtgeme bolup geçýär. Mysal üçin, M_2 zerkalo $\frac{\lambda_0}{4}$ aralyga süýşürilse, iki şöhläniň optiki ýollarynyň tapawudy $\frac{\lambda_0}{2}$ aralyga ulalar. Diýmek, interferensiýa şekilleriniň örän ujypsyz üýtgemesi boýunça zerkalonyň näçe aralyga süýşendigini kesgitläp bolýar. Şeýlelikde, Maýkelsonyň interferometri örän ýokary takyklyk bilen ($\sim 10^{-9}$ m) aralyklary ölçemäge mümkinçilik berýär.

Maýkelsonyň interferometri fiziki ölçeglerde we tehniki abzallarda giňden ulanylýar. Onuň kömegi bilen ilkinji gezek ýagtylygyň tolkun uzynlygy ölçenildi. Ýagtylyk çeşmesiniň tizliginiň ýagtylygyň tizligine täsiriniň ýokdugy subut edildi.

Interferometrleriň ählisiniň-de işleýiş prinsipi meňzeşdir. Olar diňe kogerent tolkunlaryň alnyş usuly we haýsy ululygyň ölçeýänligi bilen tapawutlanýarlar.

Gazlaryň we suwuklyklaryň döwülme görkezijilerini ölçemek üçin niýetlenen, iki şöhleli interferometrler hem bardyr. Olaryň birine Žameniň interferometri diýilýär (*27.7-nji çyzgy*).



27.7-nji çyzgy

S ýagtylyk çeşmesinden gelýän ýagtylyk şöhlesi P_1 aýna plastinkanyň öňdäki we yzdaky üstlerinden serpigip, S_1 we S_2 şöhlelere dargaýar. Bu şöhleler K_1 we K_2 kýuwetalardan (dury materialdan ýasalan gaplardan) geçip, P_2 plastinkanyň öňdäki we yzdaky üstlerinden serpigip, synlanýan T turba düşýärler. P_2 plastinka P_1 plastinka görä örän kiçi burça öwrülýär. S_1 we S_2 şöhleleler T turbada deň eňňitlikli zolaklary bolan interferensiýa şekillerini döredýärler. Eger K_1 kýuweta n_1 döwülme görkezijili madda bilen, K_2 bolsa n_2 döwülme görkezijili madda bilen doldurylan bolsa, onda döwülme görkezijileriň tapawudy

$$\Delta n = n_1 - n_2 = \frac{m\lambda}{l}, \tag{27.12}$$

bu ýerde λ – şöhläniň tolkun uzynlygy, l – kýuwetiň uzynlygy, m – interferensiýa şekillerindäki zolaklaryň $n_1 = n_2$ bolandakydan näçe zolaga süýşendiginiň sany. Δn-iň ölçeniliş takyklygy örän ýokarydyr. Bu interferometrlere **interferension refraktometrler** hem diýilýär.

Interferometrleriň ulanylyşy örän köp ugurlydyr. Olar sanalanlardan başga-da optiki detallaryň hilini barlamak, kiçi burçlary ölçemek, uçujy apparatlaryň töweregindäki howada tiz bolup geçýän hadysalary öwrenmek üçin hem ulanylýar.

Ýagtylyk çeşmesi hökmünde ýokary monohromatik we kogerent häsiýetleri bolan lazerler ulanylanda ölçeýji interferometrleriň ölçeýiş takyklygy has-da ýokarlanýar.

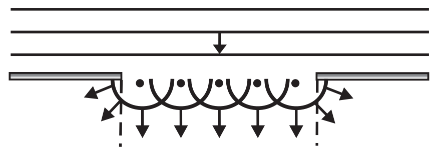
XXVIII BAP. ÝAGTYLYGYŇ DIFRAKSIÝASY

28.1. Gýugens-Freneliň prinsipi

Ýagtylygyň päsgelçilikden öwrülip geçmegine ýa-da başgaça, ýagtylygyň gönüçyzykly ýaýrama kanunynyň bozulmagyna **difraksiýa** diýilýär. Geometrik optikanyň kanunlaryna görä ýagtylyk päsgelçiligiň aňyrsyndaky kölege emele gelýän ýerlere aralaşmaly däl. Ýöne hakykatda weli ýagtylyk geometrik kölegäniň emele gelýän giňşiliginiň hemme ýerlerine belli bir derejede aralaşýar. Ýagtylyk päsgelçilikdäki deşikden ýa-da ýşdan geçende we deşigiň ýa-da ýşyň ölçegleri kiçi bolanda bu aralaşma has uly bolýar. Agzalan ölçegler ýagtylygyň tolkun uzynlygy bilen deňeşdirerlikli bolanda ýagtylygyň gönüçyzykly ýaýrama kanuny ýerine ýetmeýär.

Päsgelçiligiň deşiginden geçen ýagtylyk şöhlesiniň özüni alyp barşy **Gýugensiň prinsipi** bilen düşündirilýär. Bu prinsipde wagtyň t pursatynda tolkun frontunyň ýagdaýy belli bolanda $t \rightarrow \Delta t$ wagt pursaty üçin tolkun frontuny gurmagyň usuly öwredilýär. Gýugensiň prinsipine görä ýagtylygyň düşen her bir nokady ikinji tolkuny döredijі merkeze öwrülýär. Bu merkezleriň geometrik orunlary $t + \Delta t$ wagt pursatyna degişli ikinji tolkun frontuny emele getirýär.

28.1-nji çyzgyda päsgelçiligiň deşiginden geçen ýagtylygyň ikinji tolkun döredijі merkezleriniň emele gelşi görkezilendir. Sreda birhilli we izotrop bolany üçin tolkun fronty sferik görnüşde şekillendirilendir. Ikinji tolkunlar üçin çyzylan tolkun fronty ýagtylygyň geometrik kölegeli giňişligine aralaşjakdygyny görkezýär.



28.1-nji çyzgy

Gýugensiň prinsipi hadysany hil taýdan düşündirýär we ýagtylygyň intensiwligini hasaplamaga mümkinçilik bermeýär.

Ikinji tolkunlaryň interferensiýasyny hasaba almak bilen Frenel bu ýetmezçiligi düzetdi. **Gýugens-Freneliň prinsipine** görä haýsydyr bir *S* çeşmeden goýberilen ýagtylyk tolkuny köpsanly hyýaly çeşmelerden "goýberilen" ikinji kogerent tolkunlaryň üsti-üstüne goýlany ýaly göz öňüne getirilýär. Bu hyýaly çeşmeler bolup, çeşmäni gurşap alýan islendik ýapyk üstüň ujypsyz elementi hyzmat edip biler diýlip hasaplanýar. Şeýlelik bilen, çeşmeden ýaýraýan tolkun ähli ikinji kogerent tolkunlaryň interferensiýasynyň netijesidir diýen tekrarlama gelmek bolýar. Bu prinsipde tersleýin ikinji tolkun ýüze çykmaýar diýlip kabul edilendir.

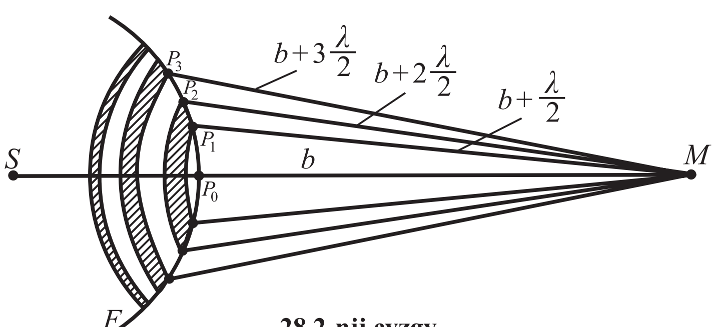
Ikinji tolkunlaryň amplitudalaryny we fazalaryny hasaba alyp, bu usulyň kömegi bilen netijeleýji tolkunyň giňişlikdäki islendik nokat üçin amplitudasyny hem-de ýaýraýyş kanunlaryny kesgitläp bolýar.

28.2. Freneliň zolaklary

Umuman alnanda ikinji tolkunlaryň interferensiýasynyň hasabyny çykarmak örän çylşyrymly meseledir. Ýöne Freneliň görkezişi ýaly, anyk simmetrik gurluşlar üçin netejeleýji tolkunyň amplitudasyny ýönekeý algebraik ýa-da geometrik jem görnüşinde hasaplap bolýar.

Bu usula **Freneliň zolaklar usuly** diýilýär. Onuň manysyna düşünmek üçin *S* monohromatik ýagtylyk çeşmesiniň *M* nokatdaky tolkunynyň amplitudasynyň hasaplanyşyna seredeliň (*28.2-nji çyzgy*).

Kömekçi üst hökmünde *F* tolkunlanç üsti kabul edeliň. Bu üst Freneliň zolaklary diýilip atlandyrylýan halkalaýyn zolaklara bölünýär. Zolaklary emele getirmek üçin *M* nokat tegelekleriň merkezi hökmünde kabul edilip,

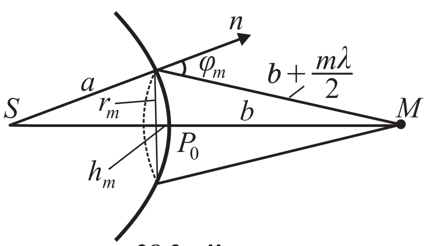


28.2-nji çyzgy

$$b,\ b+\frac{\lambda}{2},\ b+2\frac{\lambda}{2},\ ...,\ b+\frac{m\lambda}{2}$$

radiuslar bilen çyzylýar. Bu ýerde λ – monohromatik ýagtylyk tolkunynyň uzynlygy. Şeýlelikde, emele gelen goňşy zolaklardan gelýän ýagtylyk tolkunlary M nokatda garşylykly fazalary bolan yrgyldylary döredýärler. Sebäbi olaryň ýollarynyň tapawudy $\frac{\lambda}{2}$ ýarym tolkun uzynlygyna deň. M nokatdaky netijeleýji yrgyldynyň amplitudasy

$$A = A_1 - A_2 + A_3 - A_4 + ... \qquad (28.1)$$



28.3-nji çyzgy

Bu ýerde A_1, A_2, A_3 – birinji, ikinji, üçünji we ş.m. zolaklarda döreýän ikinji çeşmeleriň M nokatda döredýän yrgyldylarynyň amplitudalary. Bu amplitudalar zolaklaryň meýdanyna baglydyr. Zolaklaryň meýdanyny hasaplamak üçin 28.3-nji çyzgydan peýdalanalyň.

m-nji zolagyň daşky çägi tolkun üstde h_m belentlikli sferik segmenti emele getirýär. Bu segmentiň meýdanyny S_m bilen belläliň.

Onda m-nji zolagyň meýdanyny

$$\Delta S_m = S_m - S_{m-1}$$

deňlik bilen kesgitläp bolar. S_{m-1} – nomeri $(m - 1)$ bolan zolagyň daşky çäginiň emele getirýän segmentiniň meýdany. 28.3-nji çyzgydan alarys:

$$r_m^2 = a^2 - (a - h_m)^2 = \left(b + m\frac{\lambda}{2}\right)^2 - (b + h_m)^2. \qquad (28.2)$$

Bu ýerde a – tolkun üstüň radiusy, r_m – nomeri m bolan zolagyň daşky radiusy. (28.2) deňlikden alarys:

$$r_m^2 = 2ah_m - h_m^2 = bm\lambda + m^2\left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 - 2bh_m - h_m^2.$$

Bu ýerden

$$h_m = \frac{bm\lambda + m^2\left(\frac{\lambda}{2}\right)^2}{2(a+b)}$$

deňligi alarys. $\lambda << a$ we $\lambda << b$ bolýandygyny hasaba alyp, soňky deňligi

$$h_m = \frac{bm\lambda}{2(a+b)} \qquad (28.3)$$

görnüşde ýazmak bolar.

Sferik segmentiň meýdany $S = 2\pi Rh$ formula bilen hasaplanýar (R – sferanyň radiusy, h – segmentiň belentligi).

Onda h_m belentlikli segmentiň meýdany

$$S_m = 2\pi a h_m = \frac{\pi ab}{a+b} m\lambda$$

bolar. m-nji zolagyň meýdany

$$\Delta S_m = S_m - S_{m-1} = \frac{\pi ab\lambda}{a+b} \tag{28.4}$$

bolar.

(28.4) deňlikden peýdalanyp, zolaklaryň radiuslaryny kesgitläp bolýar. Zolaklaryň tertip nomeriniň has uly bolmadyk ýagdaýynda $h_m << a$ bolýar. Şonuň üçin $r_m^2 = 2ah_m$ deňlikden peýdalanmak bolýar. Bu deňlige (28.3) deňlikden h_m-iň bahasyny goýup, m-nji zolagyň daşky radiusy üçin

$$r_m = \sqrt{\frac{ab}{a+b} m\lambda} \tag{28.5}$$

deňligi alarys. Bu deňlige $a = b = 1m$ we $\lambda = 0,5$ *mkm* bahalary goýsak, birinji (merkezi) zolagyň radiusy $r_1 = 0,5$ *mm* bolýar. Indiki zolaklaryň radiuslaryny hasaplamak üçin bu sany her gezek $\sqrt{m}$ ululyga köpeltmek ýeterlikdir.

(28.4) deňlikden görnüşi ýaly, zolaklaryň meýdany olaryň m tertip nomerine bagly däldir. Diýmek, Freneliň zolaklarynyň meýdanlary, m sanyň has uly bolmadyk bahalarynda, deňdir. Ýöne zolaklaryň tertip nomeriniň artmagy bilen tolkunyň ugrunyň we tolkun üste normalyň arasyndaky burç ulalýar. Bu bolsa Gýugensiň--Freneliň prinsipine görä M nokatdaky şöhlelenmäniň depginliliginiň peselmegine getirýär. Şeýle-de, zolaklaryň tertip nomeriniň artmagy sebäpli M nokada çenli aralyk uzalýar. Diýmek, zolaklaryň tertip sanynyň artmagy bilen degişli yrgyldy amplitudalary barha gowşaýar. (28.1) deňligi

$$A = \frac{A_1}{2} + \left(\frac{A_1}{2} - A_2 + \frac{A_3}{2}\right) + \left(\frac{A_3}{2} - A_4 + \frac{A_5}{2}\right) + ... \tag{28.6}$$

görnüşde ýazyp we A_m amplitudanyň monoton peselýändigini hasaba alyp, takmynan

$$A_m = \frac{A_{m-1} + A_{m+1}}{2}$$

deňligi ýazmak bolar. (28.6) deňlikdäki ýaýlaryň içindäki aňlatmalary, takmynan nola deň diýip hasaplasak,

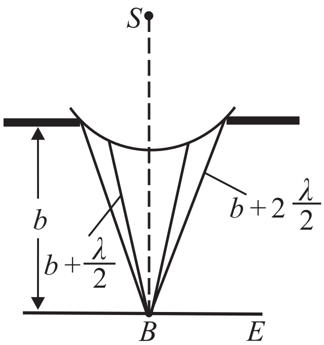
$$A = \frac{A_1}{2} \tag{28.7}$$

deňligi alarys. Bu formula görä sferik tolkun üstüň käbir M nokatda döredýän yrgyldysynyň amplitudasy Freneliň merkezi zolagynyň döredýän amplitudasynyň ýarysyna deňdir. Eger tolkunyň ýoluna diňe Freneliň merkezi zolagy üçin açyk bolan deşikli päsgelçilik goýulsa, onda M nokatdaky yrgyldynyň amplitudasy A_1 bolar, ýagny A amplitudadan iki esse köp bolar.

28.3. Tegelek deşikde we diskde döreýän Freneliň difraksiýasy

Päsgelçilige sferik ýa-da tekiz tolkun düşende päsgelçiligiň yzynda kesgitli aralykda ýerleşen ekranda difraksiýa şekiliniň emele gelmegine Freneliň difraksiýasy diýilýär.

Tegelek deşikdäki difraksiýa. Sferik ýagtylyk tolkunynyň ýoluna r_0 radiusy bolan tegelek deşikli ekran ýerleşdirilen (*28.4-nji çyzgy*). Deşikli ekran ýagtylygyň ýaýraýyş ugruna perpendikulýar bolmaly. S çeşmeden gaýdýan we deşikden geçýän şöhläniň ugrundaky B nokatda ýerleşdirilen E ekranda difraksiýa şekili emele gelýär. Ekran deşigiň tekizligine parallel we ondan b aralykda ýerleşdirilýär.



28.4-nji çyzgy

Ekrandaky difraksion şekiliň görnüşi deşikde ýerleşýän Freneliň zolaklarynyň sanyna baglydyr. Freneliň zolaklar usulyna görä B nokatdaky ygryldylaryň netijeleýji amplitudasy

$$A = \frac{A_1}{2} \pm \frac{A_m}{2}$$

bolar. Bu ýerde goşmak alamaty täk, minus alamaty bolsa jübüt nomerli zolaklara degişlidir.

Birinji ýagdaýda (m – täk) B nokatda interferensiýa maksimumy, ikinji ýagdaýda (m – jübüt) bolsa interferensiýa minimumy ýüze çykýar. A_m amplituda A_1 amplituda golaý boldugyça maksimum we minimum biri-birinden has anyk tapawutlanar. Ýagtylyk çeşmesi dynçlykda duranda zolaklaryň sany deşigiň diametrine we b aralyga baglydyr. Diýmek, deşigiň diametri üýtgedilse ýa-da E ekran golaýlaşdyrylsa ýa-da daşlaşdyrylsa B nokatdaky interferensiýa şekili üýtgär. Eger deşigiň diametri uly bolup $A_m << A$ ýagdaý dörese, E ekranda interferensiýa şekili ýüze çykmaýar. Ýagtylygyň ýaýramagy deşikli päsgelçiligiň ýok ýagdaýyndaky ýaly bolar. Deşige Freneliň diňe bir zolagy ýerleşse B nokatda amplituda $A = A_1$ bolar. Eger deşige Freneliň iki zolagy ýerleşse, onda olar B nokatda interferensiýa sebäpli biri-birini ýok eder. Şeýlelikde, B nokatdaky ekranda gezekleşip gelýän garaňky we ýagty halkalar görnüşindäki difraksiýa şekili emele geler. m san jübüt bolsa merkezde garaňky tegmil emele geler, m täk bolanda – ýagty tegmil emele geler. Merkezden daşlaşdygyça maksimumlaryň intensiwligi gowşar. Eger deşik monohromatik däl-de, ak ýagtylyk bilen şöhlelendirilse, onda E ekranda reňkli halkalar emele geler.

Diskdäki difraksiýa. Nokatlanç ýagtylyk çeşmesinden (S) ýagtylyk geçirmeýän diske ýagtylyk şöhlesi düşýän bolsun (*28.5-nji çyzgy*). Diske parallel ýerleşdirilen E ekranyň B nokadynda döreýän interferensiýa şekiline seredeliň.

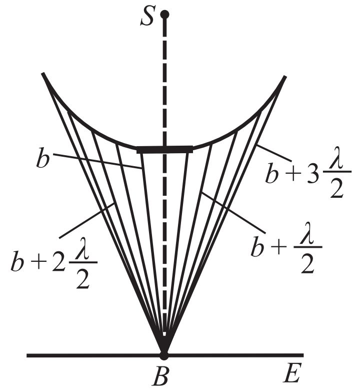
Diskden ýagtylyk geçmeýänligi sebäpli, Freneliň zolaklaryny diskiň daşyndan çyzyp başlamaly bolýar. Disk Freneliň ilkinji *m* zolaklaryny ýapýar diýip hasaplalyň. Onda *B* nokatdaky yrgyldylaryň netijeleýji amplitudasy

$$A = A_{m+1} - A_{m+2} + A_{m+3} \ldots =$$
$$= \frac{A_{m+1}}{2} + \left(\frac{A_{m+1}}{2} - A_{m+2} + \frac{A_{m+3}}{2}\right) + \ldots$$

aňlatma bilen ýazylar. Bu deňligi käbir takyklyk bilen

$$A = \frac{A_{m+1}}{2}$$

görnüşde ýazmak bolar. Diýmek, *B* nokatda hemişe interferensiýa maksimumy bolar. Merkezi maksimumyň töwereginde gezekleşip gelýän garaňky we ýagty halkalar emele geler. Intensiwlik bolsa merkezden daşlaşdygyňça gowşar.



28.5-nji çyzgy

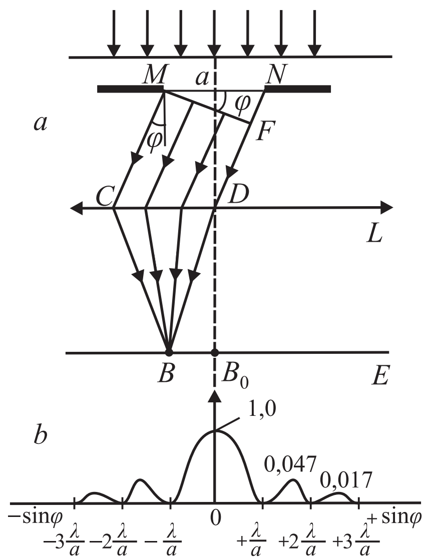
28.4. Bir yşda Fraungoferiň difraksiýasy

Fraungoferiň difraksiýasy tekiz ýagtylyk tolkunlarynda ýa-da parallel ýagtylyk şöhlelerinde ýüze çykýar. Fraungoferiň difraksiýasyny synlamak üçin ýagtylyk çeşmesi we synlanýan nokat difraksiýany döredýän päsgelçilikden has uzakda ýerleşmeli.

Linzalary ulanmak bilen has golaý aralyklarda-da Fraungoferiň difraksiýasyny döredip bolýar. Onuň üçin ýagtylyk çeşmesi ýygnaýjy linzanyň fokusynda ýerleşdirilýär. Difraksion şekiliň synlanýan ekrany bolsa päsgelçiligiň aňyrsynda ikinji ýygnaýjy linzanyň fokal tekizliginde ýerleşdirilýär.

Ini uzynlygyndan has kiçi bolan yşda ýüze çykýan Fraungoferiň difraksiýasyna seredeliň. Monohromatik tekiz ýagtylyk şöhlesi ini *a* bolan yşyň tekizligine perpendikulýar düşýän bolsun (*28.6-njy çyzgy*).

MN nokatlaryň tekizliginden ýagtylygyň başky ugry bilen käbir φ burçy emele getirýän tolkunyň ýaýraýşyna serediliň. Bu parallel şöhleler linzada döwlüp *E* ekranyň *B* nokadynda ýygnanýarlar. φ burçuň beýleki erkana bahalary boýunça ýaýraýan tolkunlar ekranda interferensiýa şekilini emele getirýärler. *M* nokatdan *ND*



28.6-njy çyzgy

şöhläniň ugruna perpendikulýar *MF* çyzygy geçireliň. Interferensiýanyň şertini kesgitleýän ýollaryň tapawudy

$$\Delta = NF = a\sin\varphi. \qquad (28.8)$$

MN yşy Freneliň zolaklaryna böleliň. Emele gelen zolaklaryň ugry *MF* göni çyzyga normal bolmaly. Zolaklaryň ugry her zolagyň gyralary üçin ýoluň tapawudy $\frac{\lambda}{2}$ bolar ýaly giňlikde alynmaly. Şeýlelikde, yşyň ininde $\left(\frac{2\Delta}{\lambda}\right)$ zolak ýerleşer. Bu gurluşda goňşy zolaklar boýunça ýaýraýan tolkunlar *B* nokada garşylykly fazalarda geler we biri-birini öçürer. Gurluşdaky zolaklaryň sany jübüt bolsa, *B* nokatda iň pes ýagtylandyryş alarys. Bu minimumlara degişli burçlar

$$a\sin\varphi = \pm\, 2m\frac{\lambda}{2}; \qquad (m = 1, 2, 3...), \qquad (28.9)$$

şert arkaly kesgitlenýär. Minimumlaryň aralarynda ýagtylandyryşyň maksimumlaryna degişli burçlar

$$a\sin\varphi = \pm(2m + 1)\frac{\lambda}{2} \qquad (28.10)$$

şert arkaly kesgitlenýär. Bu şertiň ýerine ýetmegi üçin ýagtylyk tolkunynyň *MN* frontunda Freneliň zolaklarynyň täk sany ýerleşmeli. $\varphi = 0$ bolanda, ýagny ýagtylyk göni ugur bilen ýaýranda iň uly intensiwlik alynýar. B_0 nokatda merkezi iň uly ýagtylandyryş alynýar. Difraksiýanyň netijesinde intensiwligiň ekranda paýlanyşy 28.6-njy *b* çyzgyda görkezilendir. Çyzgydaky şekil diňe monohromatik ýagtylyga degişlidir. Yş ak ýagtylyk bilen şöhlelendirilende öňkä meňzeş, ýöne dürli reňkdäki şekiller emele gelýär. Intensiwligiň difraksiýa boýunça paýlanyşyna **difraksion spektr** diýilýär.

28.5. Difraksion gözenek

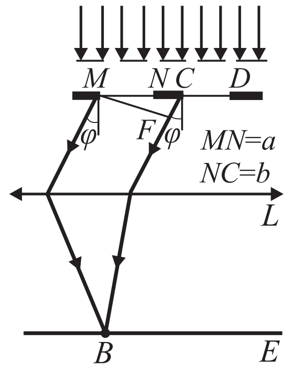
Aralyklary ýagtylyk geçirmeýän zolaklar bilen bölünen, bir tekizlikde ýerleşýän, inleri deň yşlardan durýan sistema **bir ölçegli difraksion gözenek** diýilýär. Difraksion gözenegiň her yşyndan alynýan difraksiýa, öwrenilen bir yşdaky difraksiýa meňzeşdir. Gözenekde alynýan difraksiýa şekili ähli yşlardan gidýän tolkunlaryň özara difraksiýasynyň netijesidir. Oňa köpsanly kogerent ýagtylyk desseleriniň difraksiýasy ýaly seretmek bolar.

MN we *CD* zolaklardan ybarat difraksion gözenege seredeliň (*28.7-nji çyzgy*).

Yşyň inini *a* bilen, dury däl zolagyň inini *b* bilen bellesek, $d = a + b$ ululyga difraksion gözenegiň hemişeligi (periody) diýilýär.

Monohromatik ýagtylyk şöhlesi gözenegiň tekizligine normal düşýän bolsun. Yşlaryň arasy deň bolany üçin goňşy yşlardan şol bir φ burç bilen gidýän şöhleleriň ýollarynyň tapawudy aşakdaka deň bolar:

$$\Delta = CF = (a + b)\sin\varphi = d\sin\varphi. \qquad (28.11)$$



28.7-nji çyzgy

Seredip geçişimiz ýaly, her yşyň ýagtylyk goýbermeýän ugry bar. Bu ugur iki yş üçin hem ugurdaş. Diýmek, şeýle ugurlara iki yşdan hem ýagtylyk ýaýradylmaýar, ýagny intensiwligiň baş minimumy

$$a\sin\varphi = \pm m\lambda, \qquad (m = 1, 2, 3...) \qquad (28.12)$$

şert bilen kesgitlenýär.

Mundan başga-da, iki yşdan goýberilýän ýagtylyk şöhleleri özara interferensiýanyň netijesinde käbir ugurlar boýunça biri-birini öçürer we **goşmaça minimumlar** ýüze çykar. Goşmaça minimumlar tolkunlaryň ýollarynyň tapawudy $\frac{\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}...$ ugurlarda ýüze çykar. Meselem, iki yşyň hem çep gyrasyndaky M we C nokatlar üçin ýüze çykar. Goşmaça minimumlaryň ýüze çykmagynyň şerti:

$$d\sin\varphi = \pm(2m + 1)\frac{\lambda}{2}, \qquad (m = 0, 1, 2...); \qquad (28.13)$$

$$d\sin\varphi = \pm\, 2n\frac{\lambda}{2} = \pm\, n\lambda, \qquad (n = 0, 1, 2...) \qquad (28.14)$$

bolanda bu şerti kanagatlandyrýan ugurlar boýunça **baş maksimumlar** ýüze çykýar.

Şeýlelikde, iki yşda ýüze çykýan doly difraksiýa şekilleri aşakdaky şertler bilen kesgitlenýär:

1) baş minimumlar: $a\sin\varphi = \lambda, 2\lambda, 3\lambda, ...$;

2) goşmaça minimumlar: $d\sin\varphi = \frac{\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \frac{5\lambda}{2}, ...$;

3) baş maksimumlar: $d\sin\varphi = 0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda, ...$.

Görnüşi ýaly, iki baş maksimumyň aralarynda bir goşmaça minimum ýerleşýär. Gözenekde üç yş bolanda her iki baş maksimumyň arasynda iki goşmaça minimumlaryň boljakdygyny görkezmek kyn däldir. Difraksion gözenekde N sany yş bolanda baş minimumlary (28.12) şert bilen, baş maksimumlaryň şerti bolsa (28.14) şert bilen kesgitlenýär. Goşmaça minimumlaryň şerti:

$$d\sin\varphi = \pm\frac{m'\lambda}{N},$$

$$(m' = 1, 2 ... N - 1, N + 1, ... 2N - 1, 2N + 1, ...) \qquad (28.15)$$

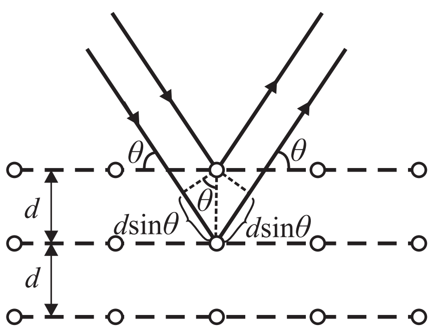
Bu ýerde m' san 0, N, $2N$ ... sanlardan beýleki ähli bütin sanlara deň bolup bilýär. m' san 0, N, $2N$ ... sanlara deň bolanda, (28.15) şert (28.12) şerte öwrülýär. Diýmek, yşlaryň sany N bolanda her iki baş maksimumlaryň arasynda $(N - 1)$ sany goşmaça minimumlar ýerleşýär. Olaryň aralary bolsa gowşajyk fon döredýän ikinji maksimumlar bilen bölünýär.

Difraksion gözenekde yşlaryň sany N köp boldugyça köp ýagtylyk energiýasy geçýär we goňşy baş maksimumlaryň arasyndaky minimumlaryň sany köpelýär. Baş maksimumlaryň ýerleşişi λ tolkun uzynlygyna baglydyr. Şonuň üçin gözenege ak ýagtylyk düşürilse, merkezi maksimumdan beýleki maksimumlar spektre dargaýar. Onuň melewşe bölegi difraksiýa şekiliniň merkezine ymtylýar. Gyzyl bölegi bolsa merkezden daşda ýerleşýär. Difraksion gözenegiň bu häsiýeti ýagtylygyň spektral düzümini öwrenmek üçin ulanylýar.

Spektriň dürli böleklerinde ulanylýan difraksion gözenekler görnüşi boýunça, materialy we yşlarynyň ýygylyklary boýunça tapawutlanýarlar. Iň oňat gözenekleriň 1 millimetrinde 1200-e çenli yşlar bolýar ($d \approx 0{,}8$ *mkm*). Difraksion gözenekleri ýasamak üçin aýna ýa-da kwars plastinkalar ulanylýar. Plastinalaryň üstüne ýörite maşynlary ulanmak bilen almaz ýonujylaryň kömegi bilen parallel çyzyklar çyzylýar. Bu çyzyklaryň aralary yşlar bolup hyzmat edýär.

28.6. Rentgen şöhleleriniň difraksiýasy

Difraksiýa bir tekizlikde ýatmaýan üç ugur boýunça periodik bolan giňişlik gurluşlarynda hem ýüze çykýar. Ähli kristal jisimleriň gurluşy şuňa meňzeşdir. Kristallarda difraksiýa şekili rentgen şöhleleriniň kömegi bilen alynýar. Sebäbi kristalyň gözeneginiň periody kiçidir ($\sim 10^{-10}$ *m*) we $d > \lambda$ şertiň ýerine ýetmegi üçin rentgen şöhlelerini ulanmaly bolýar. Ilkinji gezek rentgen şöhleleriniň kristallardaky difraksiýasy nemes fizigi M. Laue tarapyndan amala aşyryldy (1913).



28.8-nji çyzgy

Kristal gözenekde rentgen şöhlesiniň difraksiýasynyň hasabynyň ýönekeý usuly rus alymy Ý. W. Wulf we iňlis fizikleri U. G. Bregg hem-de U. L. Bregg tarapyndan hödürlendi. Bu usulyň manysyna düşünmek üçin 28.8-nji çyzga seredeliň.

Çyzgyda kristal gözenegiň düwünleriniň üstünden deň daşlykda ýatýan parallel tekizlikler geçirilen. Olara atom gatlaklary diýilýär.

Parallel monohromatik rentgen şöhlesi θ burç bilen kristala düşende kristal gözenekdäki atomlary oýandyrýar. Netijede, olar ikinji kogerent tolkunlaryň çeşmelerine öwrülýär. Olar difraksion gözenegiň ikinji tolkunlaryna kybapdaş interferensiýany ýüze çykaryp bilýärler.

Atom gatlaklaryndan serpigen tolkunlar diňe meňzeş fasalary bolan ugurlarda difraksiýa maksimumlaryny emele getirip bilýär. Difraksiýa maksimumlarynyň boljak ugurlary

$$2d\sin\theta = m\lambda, \qquad (m = 1, 2, 3...) \tag{28.16}$$

gatnaşyk bilen kesgitlenýär. Bu gatnaşyga **Wulf-Breggiň formulasy** diýilýär. Bu ýerde θ – düşýän şöhleler bilen atom gatlaklarynyň arasyndaky burç. Oňa **taýma burçy** hem diýilýär.

Monohromatik rentgen şöhlesi islendik ugur bilen kristala düşende difraksiýa ýüze çykmaýar. Onuň ýüze çykmagy üçin kristaly öwrüp, degişli taýma burçuny tapmaly. Elbetde, rentgen spektriniň dürli tolkun uzynlyklary peýdalanylsa kristalyň islendik ýagdaýynda hem difraksiýa bolar.

Rentgen şöhleleriniň difraksiýasy, esasan, rentgen şöhlesiniň spektriniň düzümini (rentgen spektroskopiýasy) we kristallaryň gurluşyny öwrenmek üçin (rentgenstruktura barlagy) peýdalanylýar. d periody belli bolan kristala näbelli λ tolkun uzynlygyny düşürip we θ bilen m-i ölçäp, rentgen şöhlesiniň tolkun uzynlygyny kesgitläp bolýar.

Gurluşy näbelli bolan kristaly öwrenmek üçin λ tolkun uzynlygy belli bolan rentgen şöhlesi ulanylýar. θ we m ölçenilýär. Wulfuň-Bregiň formulasynyň kömegi bilen kristal üçin d hasaplanýar.

Elektronlaryň we neýtronlaryň akymyndan peýdalanyp hem maddalaryň kristallik gurluşyny öwrenmek bolýar.

28.7. Optiki abzallaryň saýgaryjylyk ukyby

Islendik optiki abzalda: teleskopda, mikroskopda, fotoapparatda we ş.m. obýektiň şekili ýagtylygyň çäklendirilen dessesiniň kömegi bilen alynýar. Ýagtylygy çäklendirijä **apertura diafragmasy** diýilýär. Bu diafragmanyň diametriniň kiçelmegi şekiliň giň ýagtylyk dessesi sebäpli ýüze çykýan ýoýulmalaryny azaldýar. Ýöne, optiki abzallarda ýagtylanýan nokadyň şekili nokat görnüşinde bolman, eýsem interferensiýa halkalary bilen gurşalan, ýagty menek görnüşinde bolýar. Monohromatik şöhlede halkalar garaňky we ýagty görnüşde, ak şöhlede bolsa, älemgoşar görnüşinde bolýar. Bu hadysa **optiki abzalyň saýgaryjylyk ukybyny** çäklendirýär, ýagny optiki abzalda obýektiň biri-birine golaý iki nokadynyň şekillerini aýry-aýry almak ukybyny peseldýär.

Releýiň kriteriýasyna görä, iki meňzeş nokatlanç çeşmesi synlananda bir çeşmäniň difraksiýa şekiliniň merkezi maksimumy beýleki çeşmäniň difraksiýa şekiliniň birinji minimumy bilen gabat gelse, çeşmeleriň şekillerini aýry-aýrylykda görüp bolar. Releýiň kriteriýasyna görä, λ tolkun uzynlykly monohromatik ýagtylykda iki golaý ýerleşen ýyldyzlara teleskopda seredilende φ burç aralygy üçin

$$\varphi \geq \frac{1,22\lambda}{D} \tag{28.17}$$

şert ýerine ýetende ýyldyzlary aýry-aýrylykda görüp (saýgaryp) bolýar. Bu ýerde D – obýektiwiň diametri, λ – ýagtylygyň tolkun uzynlygy.

Golaý ýerleşen iki nokady optiki abzal bilen saýgaryp bolýan iň kiçi $d\psi$ burç aralygyna **obýektiwiň saýgaryjylyk ukyby** diýilýär. $\frac{1}{d\psi}$ ululyga **obýektiwiň saýgaryjylyk** güýji diýilýär. Teleskopyň saýgaryjylyk güýji onuň obýektiwiniň diametrine gönümel baglydyr. Görüş turbasynyň we fotoapparatyň saýgaryjylyk şertleri teleskopyň saýgaryş şerti bilen gabat gelýär. Adamyň gözüniň saýgaryjylyk ukyby $1'$ (minut) töweregidir.

Obýektiwiň saýgaryjylyk güýji

$$R = \frac{1}{\Delta\psi} = \frac{D}{1,22\lambda} \tag{28.18}$$

obýektiwiň diametrine we tolkun uzynlygyna baglydyr.

(28.18) formuladan görnüşi ýaly, optiki abzallaryň saýgaryjylyk ukybyny ulaltmak üçin ýa obýektiwiň diametrini ulaltmaly ýa-da tolkun uzynlygyny gysgaltmaly. Şonuň üçin käbir abzallarda ultramelewşe şöhleleri ulanylýar. Şekil bolsa ýörite fotoplastinkalara düşürilýär. Käbir energiýalarda elektronlaryň akymynyň tolkun uzynlygy rentgen şöhlesiniň tolkun uzynlygyna barabardyr, ýagny örän gysgadyr. Şol sebäbe görä elektron mikroskopyň saýgaryjylyk ukyby ýokarydyr.

Difraksion gözenegiň saýgaryjylyk ukybyna seredeliň. Tolkun uzynlygy λ_2 bolanda m-nji tertipli maksimum φ burç bilen görünýän bolsun. Onda (28.17) formula görä:

$$d\sin\varphi = m\lambda_2.$$

Maksimumdan goňşy minimuma geçilende ýoluň tapawudy $\frac{\lambda}{N}$ ululyga üýtgär. Bu ýerde N – gözenegiň yşlarynyň sany. Diýmek, $\varphi_{\min}$ burç bilen λ_1-iň minimumyny

$$d\sin\varphi_{\min} = m\lambda_1 + \frac{\lambda_1}{N}$$

şert kanagatlandyrar. Releýiň kriteriýasy boýunça $\varphi = \varphi_{\min}$, ýagny $m\lambda_2 = m\lambda_1 + \frac{\lambda_1}{N}$

ýa-da $\frac{\lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)} = mN$. Bu ýerde λ_1 we λ_2 tolkun uzynlyklar golaý bolany üçin $\lambda_2 - \lambda_1 = \delta\lambda$ diýip ýazmak bolar. Spektral abzallar üçin saýgaryjylyk güýji

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} \tag{28.19}$$

formulany hasaba alyp ýazmak bolar:

$$R_{d.g} = mN. \tag{28.20}$$

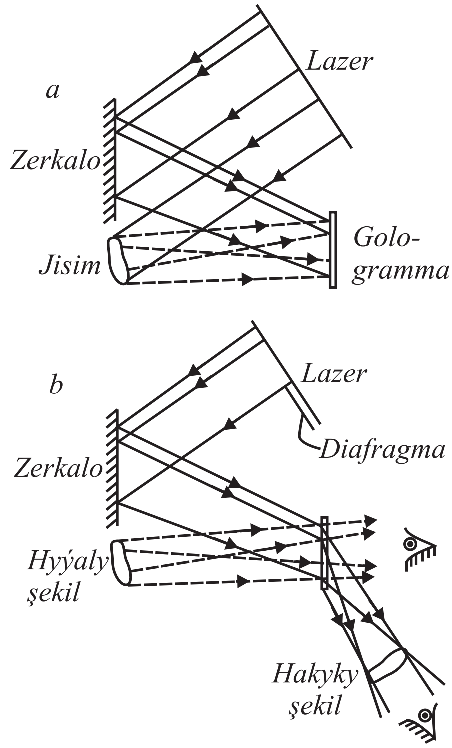
Diýmek, difraksion gözenegiň saýgaryjylyk güýji spektriň m tertibine we yşlaryň sanyna gönümel bagly.

28.8. Golografiýa

Predmetden serpigen şöhle (predmet tolkuny) bilen oňa kogerent bolan ýagtylyk çeşmesinden gelýän ýagtylyk tolkunynyň (daýanç tolkuny) interferensiýa şekilini öwrenmäge esaslanan tolkun meýdanyny ýazmagyň we täzeden döretmegiň usulyna **golografiýa** diýilýär. Ýazylan interferensiýa şekiline **gologramma** diýilýär. Interferensiýa şekilini ýazmak, adatça fotoplastinka düşürmek bilen amala aşyrylýar.

Golografiýanyň esasy iňlis fizigi D. Gabor tarapyndan goýuldy (1948 ý.). Ýöne şol döwürde kuwwatly kogerent ýagtylyk şöhleleriň ýoklugy sebäpli Gabora ýokary hilli gologrammalary almak başartmady. Soňra ýagtylyk çeşmesi hökmünde lazerler ulanylyp başlandy we oňat netijeler alyndy. Lazeri ulanmak bilen, şekil galyň fotoemulsiýa düşürilip, göwrümleýin şekil döredýän gologramma alyndy (1962 ý.).

Gologrammanyň alnyşynyň ýönekeý shemasyna seredeliň (*28.9-njy çyzgy*).



28.9-njy çyzgy

28.9-njy *a* çyzgyda lazeriň şöhlesi iki bölege bölünýär we bir bölegi (daýanç tolkuny) zerkalodan serpigip, fotoplastinka düşýär. Ikinji bölegi bolsa (predmet tolkuny), predmetden serpigip fotoplastinka düşýär. Daýanç we predmet tolkunlary kogerent bolany sebäpli, fotoplastinka düşüp interferensiýa şekilini döredýär. Fotoplastinkada aýdyňlaşdyrylan şekil gologrammadyr. Şekili täzeden döretmek üçin gologramma öňki ýerinde ýerleşdirilýär (*28.9-njy b çyzgy*). Ol öňki lazerden daýanç tolkuny bilen şöhlelendirilýär. Lazeriň ikinji bölegi diafragma bilen ýapylýar. Gologrammanyň düzümindäki interferension gurluşda ýagtylygyň difraksiýasy sebäpli predmet tolkunynyň nusgasy täzeden döreýär. Ol predmetiň göwrümleýin hyýaly şekili bolmak bilen, predmetiň öňki ýerleşen ýerinde görünýär. Predmetiň hakyky şekili hem döreýär. Ýöne ol şekiliň beýikli-pesligi predmet şekiliniň tersine bolýar.

Golografiýa maglumatlary saklamak we täzeden işlemek üçin ulanylýar. Golografiýanyň usullary kiçi meýdanda ummasyz köp maglumatlary ýazmaga mümkinçilik berýär. Optiki usul bilen taýýarlanan gologrammalardan başga-da, kompýuter üçin gologrammalar taýýarlanýar. Kompýuterlere golografik ýatda saklaýjylary, golografik elektron mikroskoplary, golografik interferometrleri döretmek geljekde amala aşyryp bolaýjak zatlardyr.

XXIX BAP. ELEKTROMAGNIT TOLKUNYNYŇ MADDALAR BILEN ÖZARA TÄSIRLENIŞI

29.1. Ýagtylygyň dispersiýasy

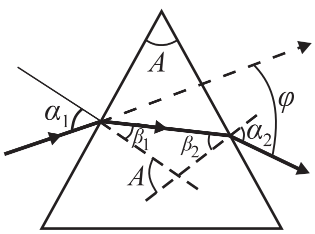
Maddanyň döwülme görkezijisiniň ýagtylygyň tolkun uzynlygyna baglylygyna **ýagtylygyň dispersiýasy** diýilýär.

Bu baglanyşygy

$$n = f(\lambda) \tag{29.1}$$

funksiýa bilen häsiýetlendirmek bolýar.

Ak ýagtylygyň aýna prizmadan geçip, spektre dargamagy dispersiýanyň netijesidir. Döwülme görkezijisi n bolan prizma monohromatik ýagtylyk şöhlesi α_1 burç bilen düşýän bolsun (*29.1-nji çyzgy*). Prizmanyň çep we sag granlaryndan döwülenden soň şöhle başdaky ugrundan φ burça gyşarýar. Çyzgy boýunça ýazyp bileris:



29.1-nji çyzgy

$$\varphi = (\alpha_1 - \beta_1) + (\alpha_2 - \beta_2) = \alpha_1 + \alpha_2 - A. \tag{29.2}$$

A we α_1 burçlary kiçi diýip hasap etsek, onda α_2, β_1 we β_2 burçlar hem kiçi bolar we bu burçlaryň sinuslarynyň deregine öz bahalaryny alyp bolar. Şonuň üçin $\frac{\alpha_1}{\beta_1} = n$, $\frac{\beta_2}{\alpha_2} = \frac{1}{n}$ bolýandygyny göz öňünde tutup we $A = \beta_1 + \beta_2$ bolýandygy üçin

$$\alpha_2 = \beta_2 n = n(A - \beta_1) = n\left(A - \frac{\alpha_1}{n}\right) = nA - \alpha_1,$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 = nA \tag{29.3}$$

deňligi ýazmak bolar. (29.2) we (29.3) deňliklerden

$$\varphi = A(n - 1) \tag{29.4}$$

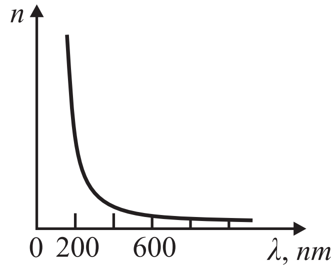
formulany alarys. Görnüşi ýaly, prizmanyň A döwüji burçy uly boldugyça şöhläniň prizmadan geçende gyşarma burçu-da uludyr. Gyşarma burçy $(n - 1)$ ululyga göni baglydyr. Döwülme görkeziji n bolsa tolkun uzynlygynyň funksiýasydyr. Şonuň üçin dürli tolkun uzynlykly şöhleler prizmadan geçende dürli burçlara gyşarýarlar. Ak ýagtylyk şöhlesi bolsa, prizmadan geçip, spektre dargaýar. Bu hadysadan peýdalanyp ak ýagtylygyň spektriniň düzümini kesgitläp bolýar.

Difraksion gözenek ýagtylygy tolkun uzynlygy boýunça dargadýar. Bu bolsa degişli maksimumlaryň burçlaryny ölçäp, tolkun uzynlygyny hasaplamaga mümkinçilik berýär. Prizmada bolsa ýagtylyk prizmanyň döwülme görkezijilerine baglylykda dargaýar. Şeýle bolansoň, ýagtylygyň tolkun uzynlygyny kesgitlemek üçin $n = f(\lambda)$ baglanyşygy bilmeli.

Difraksion gözenegiň we prizmanyň spektrleriniň düzüji reňkler boýunça ýerleşişi meňzeş däldir. Difraksion gözenekde uzyn tolkunly gyzyl şöhleler melewşe şöhlä seredeniňde uly burça gyşarýarlar. Prizmada bolsa degişli döwülme görkezijisi kiçi bolany üçin melewşe şöhle bilen deňeşdirilende gowşak gyşarýarlar. Sebäbi ähli dury maddalarda döwülme görkeziji tolkun uzynlygynyň ýokarlanmagy bilen kiçelýär (*29.2-nji çyzgy*).

$$D = \frac{dn}{d\lambda}$$

ululyk döwülme görkezijisiniň tolkun uzynlygyna bagly üýtgeýiş tizligini görkezýär. Muňa **ýagtylygyň dispersiýasy** diýilýär.



29.2-nji çyzgy

29.2-nji çyzgydan görnüşi ýaly, dury jisimleriň döwülme görkezijileri tolkun uzynlygynyň kiçelmegi bilen hemişe artýar.

Diýmek, $dn/d\lambda$ ululyk hem moduly boýunça tolkun uzynlygynyň peselmegi bilen artýar. Beýle dispersiýa **kadaly dispersiýa** diýilýär. Mundan başga-da ýuwdulyş zolaklarynyň we liniýalarynyň töwereginde tolkun uzynlygynyň kiçelmegi bilen döwülme görkezijiniň kiçelýän ýagdaýlary bar. Beýle $n(\lambda)$ baglanyşyga **anomal dispersiýa** diýilýär.

Kadaly dispersiýa hadysasy **prizmaly spektrograflaryň** işleýşiniň esasy bolup durýar. Olarda ýagtylygyň spektral düzümi öwrenilýär we olar giňden ulanylýar.

29.2. Ýagtylygyň dispersiýasynyň elektron teoriýasy

Makswelliň elektromagnit teoriýasyndan gelip çykýan netijelere laýyklykda sredanyň döwülme görkezijisi:

$$n = \sqrt{\varepsilon\mu},$$

bu ýerde ε – sredanyň dielektrik syzyjylygy, μ – magnit syzyjylygy. Optiki spektrde ähli maddalar üçin $\mu \approx 1$. Onda

$$n = \sqrt{\varepsilon}. \qquad (29.5)$$

Bu deňlik tejribeleriň netijelerine garşy gelýär, ýagny döwülme görkeziji hemişelik baha eýe bolýar. Bu deňlik boýunça alnan san bahalar hem dogry bolmaýar. Makswelliň teoriýasyndan gelip çykýan bu kynçylyklar Lorensiň elektron teoriýasynda düzedilýär. Bu teoriýada ýagtylygyň dispersiýasy elektromagnit tolkunynyň maddanyň düzümine girýän zarýadly bölejikler bilen täsirleşmesiniň netijesinde zarýadly bölejikleriň mejbury yrgyldylary sebäpli ýüze çykýar diýlip düşündirilýär.

Birhilli dielektrik üçin ýagtylygyň dispersiýasynyň elektron teoriýasyna seredeliň. Ýagtylygyň dispersiýasy ε dielektrik syzyjylygynyň ýagtylygyň ω ýygylygyna baglygynyň netijesinde ýüze çykýar diýip kabul edeliň. Maddanyň dielektrik syzyjylygy

$$\varepsilon = 1 + \chi = 1 + \frac{P}{\varepsilon_0 E} \tag{29.6}$$

deňlik bilen kesgitlenýär. Bu ýerde χ – dielektrik kabuledijilik, ε_0 – elektrik hemişeligi, P – polýarlanmagyň pursatlaýyn bahasy. (29.5) deňligi göz öňünde tutup ýazmak bolar:

$$n^2 = 1 + \frac{P}{\varepsilon_0 E}. \tag{29.7}$$

Döwülme görkeziji n polýarlanma bagly bolýar. Bu ýagdaý üçin elektron polýarlanmanyň täsiri uludyr, ýagny meýdanyň elektrik düzüjisiniň elektronlarynyň mejbury yrgyldy etmegine esasy täsiri bardyr. Sebäbi ýagtylyk tolkunyndaky yrgyldylaryň ýygylygynyň bahasynyň ýokarydygy ($v \approx 10^{15} Gs$) sebäpli, molekulalary polýarlaşdyryp bilmeýär.

Diňe ýadro bilen gowşak baglanyşykly daşky elektronlar mejbury yrgyldylar edýärler diýip käbir takyklykda kabul etmek bolar. Ol elektronlara **optiki elektronlar** diýilýär. Ýönekeýlik üçin diňe bir elektronyň yrgyldylaryna seredeliň.

Mejbury yrgyldylar bilen döredilen elektronyň dipol momenti $p = ex$ bolar. Bu ýerde e – elektronyň zarýady, x – ýagtylyk tolkunynyň elektrik meýdanynyň täsiri bilen dörän elektrona degişli orun üýtgeme. Dielektrikde atomlaryň gürlügi n_0 polýarlanmagyň pursatlaýyn bahasy bilen şeýle baglanyşýar:

$$P = n_0 p = n_0 ex. \tag{29.8}$$

(29.7) we (29.8) deňliklerden peýdalanyp alarys:

$$n^2 = 1 + \frac{n_0 ex}{\varepsilon_0 E}. \tag{29.9}$$

x üçin aňlatmany tapalyň. Ýagtylyk tolkunynyň $\vec{E}$ wektory sinusoidal bolsun:

$$E = E_0 \cos\omega t.$$

Elektronyň mejbury yrgyldysynyň deňlemesi bolsa, öňki baplarda görkezişimiz ýaly

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = \frac{F_0}{m}\cos\omega t = \frac{e}{m}E_0 \cos\omega t \tag{29.10}$$

görnüşde bolar. Bu ýerde $F_0 = eE_0$ – tolkunyň meýdany tarapyndan elektrona täsir edýän güýjüň amplituda bahasy, $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ – elektronyň yrgyldysynyň hususy ýygylygy, m – elektronyň massasy. Bu deňleme garşylyk güýçleriň ýok şertleri üçin ýazylýar.

(29.10) deňlemäniň çözüwi

$$x = A\cos\omega t. \tag{29.11}$$

görnüşde bolar. Bu ýerde

$$A = \frac{eE_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)}. \tag{29.12}$$

(29.11), (29.12) deňliklerden (29.9) deňlige goýup alarys:

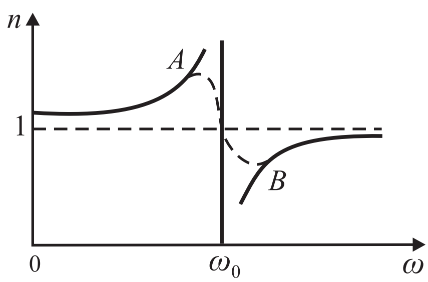
$$n^2 = 1 + \frac{n_0 e^2}{\varepsilon_0 m(\omega_0^2 - \omega^2)}. \tag{29.13}$$

Eger maddada dürli ω_0 hususy ýygylyklar bilen yrgyldaýan dürli e_i zarýadlaryň köplügi bar bolsa, onda

$$n^2 = 1 + \frac{n_0}{\varepsilon_0} \sum \frac{e_i^2 / m_i}{\omega_{o_i}^2 - \omega^2}, \tag{29.14}$$

bu ýerde m_i – zarýadlaryň massasy.

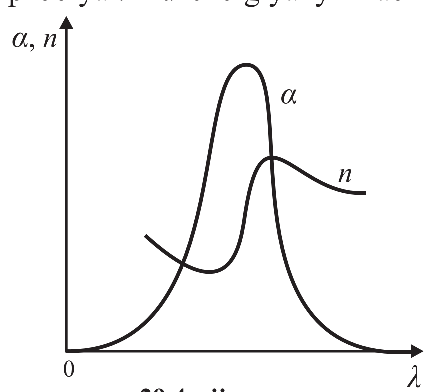
Soňky deňliklerden döwülme görkezijiniň daşky meýdanyň ω ýygylygyna baglylygy görünýär. Diýmek, bu teoriýa dispersiýa boýunça alnan maglumatlar bilen gabat gelýär. (29.13) we (29.14) formulalardan alnan käbir netijelere seredeliň. $\omega = 0$-dan $\omega = \omega_0$ çenli ýygylyklarda n^2 birden uly we ω-nyň ulalmagy bilen artýar (normal dispersiýa). ω bilen n-iň baglanyşygy 29.3-nji çyzgyda görkezilendir. Hususy ω_0 ýygylygyň töwereginde döwülme görkezijisiniň özüni alyp barşy (29.10) deňleme ýazylanda elektronyň yrgyldylaryna garşylyk güýjüniň hasaba alynmandygy üçin ýüze çykýar. Eger bu ýagdaý hasaba alynsa, $n = f(\lambda)$ baglanyşygyň grafigi 29.3-nji çyzgydaky AB üzük egri çyzyk görnüşinde bolýar. AB üzük çyzyk anomal dispersiýa degişlidir. (29.14) formuladan gelip çykýan netijeler tejribeleriň maglumatlary bilen tassyklanyldy.



29.3-nji çyzgy

29.3. Ýagtylygyň siňdirilmesi

Ýagtylyk tolkuny maddadan geçende tolkunyň energiýasynyň bir bölegi elektronlaryň yrgyldylaryny oýandyrmaga sarp bolýar. Bu energiýanyň käbir bölegi elektronlar tarapyndan döredilýän ikinji tolkunlaryň hasabyna öwrülip gelýär. Beýleki bölegi bolsa maddanyň içki energiýasyna öwrülýär. Şonuň üçin ýagtylygyň intensiwligi maddadan geçende peselýär, ýagny ýagtylyk madda tarapyndan siňdirilýär. Elektronlaryň mejbury yrgyldylary we şonuň üçin hem ýagtylygyň siňdirilmegi rezonans ýygylygynyň töwereginde ($\omega \approx \omega_0$) has güýçli bolýar (*29.4-nji çyzgy*).



29.4-nji çyzgy

Tejribäniň görkezişi ýaly, ýagtylyk maddadan geçende onuň intensiwligi

$$I = I_0 e^{-\alpha l} \tag{29.15}$$

kanuna görä gowşaýar. Bu ýerde I_0 – ýagtylygyň madda girýän ýerindäki intensiwligi, l – maddanyň ýagtylyk geçýän böleginiň galyňlygy, α – **siňdirme koeffisiýenti**. Ol koeffisiýent maddanyň häsiýetlerine baglydyr. (29.15) aňlatma **Bugeriň kanuny** diýilýär.

(29.15) deňligi differensirläp alarys:

$$dI = \alpha I_0 e^{-\alpha l} dl = -\alpha I dl. \tag{29.16}$$

Bu aňlatmadan görnüşi ýaly, intensiwligiň dl aralykda peselmesi bu aralygyň uzynlygyna we intensiwligiň bahasyna göni baglydyr. Bu ýerde proporsionallyk koeffisiýenti bolup ýuwudylma koeffisiýenti hyzmat edýär.

(29.15) formula görä $l = \dfrac{1}{\alpha}$ bolanda I intensiwlik I_0-dan e esse kiçi bolýar. Diýmek, siňdirme koeffisiýenti intensiwligi e esse gowşadýan maddanyň galyňlygyna ters ulylykdyr.

Siňdirme koeffisiýenti ýagtylyk tolkunynyň ýygylygyna baglydyr. Atomlary ýa-da molekulalary özara az täsirleşýän maddalar (gazlar, pes basyşly metallyň buglary) üçin tolkun uzynlyklaryň köp bölegi nola golaý. Diňe käbir darajyk spektral zolaklary üçin (giňligi onlarça nanometr) maksimumlar ýüze çykýar. Bu maksimumlar atomyň içindäki molekulalaryň yrgyldylarynyň rezonans ýygylyklaryna degişlidir. Molekulýar maddalaryň rezonans ýygylyklary atomdakydan kiçidir. Şeýle bolansoň maksimumlar spektriň infragyzyl bölegine düşýär.

Suwuklyklarda, gaty jisimlerde we ýokary basyşly gazlarda siňdirme zolagy giňdir. Gazlarda basyş köpeldigiçe siňdirme zolagy giňelýär. Bu bolsa siňdirme zolagynyň giňelmeginiň atomlaryň özara täsirleşmesiniň artmagy sebäpli bolýandygyna şaýatlyk edýär.

Metallardan ýagtylyk geçmeýär. Olar üçin siňdirme koeffisiýenti $10^6\ ^1\!/_m$ tertibindäki sandyr (meselem, aýna üçin $\alpha \approx 1\ ^1\!/_m$). Bu metallarda erkin elektronlaryň bolmagy sebäpli ýüze çykýar. Ýagtylyk tolkunynyň elektrik meýdanynyň täsiri bilen elektronlar herekete gelýärler we metallarda ýylylyk bölüp çykarýan üýtgeýän tok ýüze çykýar. Netijede, ýagtylyk tolkunynyň energiýasy tiz peselýär, ýagny metalyň içki energiýasyna öwrülýär.

29.4. Wawilow-Çerenkowyň şöhlelenmesi

S.I.Wawilowyň ýolbaşçylygynda işleýän P.A.Çerenkow radiniň gamma şöhlesiniň täsiri bilen suwuklyklaryň şöhlelenýändiginiň üstüni açdy. Bu hadysa **Wawilow-Çerenkowyň effekti** diýilýär.

Elektromagnit teoriýasyna laýyklykda deňölçegli hereket edýän zarýad elektromagnit tolkunyny şöhlelendirmeýär. Ýöne I.Tamm we I.Frank (1937) zarýadly bölejigiň tizligi fazalaýyn tizlikden $\left(\frac{c}{n}\right)$ ýokary bolanda elektromagnit şöhleleriniň goýberilýändigini tassykladylar. $\upsilon > \frac{c}{n}$ bolanda deňölçegli hereket edýän zarýadly bölejik elektromagnit şöhlesini goýberýär. Bu ýagdaýda bölejik şöhle goýbermek üçin energiýasyny ýitirýär we otrisatel tizlenme bilen hereket edýär. Bu ýerde otrisatel tizlenmäniň döremegi şöhlelenme hadysasynyň netijesidir. Zarýadly bölejik haýsydyr bir usul bilen energiýasynyň ýitgisini dolduryp, $\upsilon > \frac{c}{n}$ tizlik bilen deňölçegli hereket etse-de şöhle goýberýär. Wawilow-Çerenkowyň şöhlelenmesinde gysga tolkunlar köpdür. Şonuň üçin hem onuň reňki mawy bolýar. Bu şöhlelenmäniň aýratyn tarapy, şöhle hemme tarapa goýberilmän, eýsem konusy emele getiriji çyzyklaryň ugry boýunça goýberilýär. Bölejigiň tizligi konusyň okunyň ugry bilen gabat gelýär. Şöhläniň ýaýraýan ugry bilen tizligiň wektorynyň arasyndaky burç θ bilen bellenilýär we aşakdaky gatnaşyk bilen kesgitlenýär:

$$\cos\theta = \frac{c}{\upsilon n}. \qquad (29.17)$$

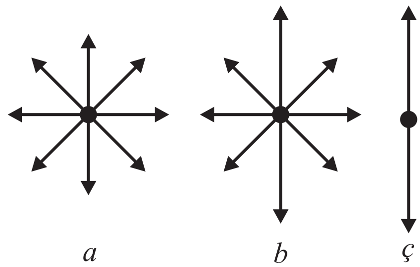
Wawilow-Çerenkowyň şöhlelenmesiniň esasynda ýokary energiýaly bölejikleri hasaba almak we olaryň häsiýetlerini kesgitlemek üçin tejribe usullary işlenip düzüldi. Wawilow-Çerenkowyň şöhlelenmesiniň esasynda işleýän zarýadly bölejikleri hasaba alýan gurluşlara Çerenkowyň hasaplaýjysy diýilýär.

XXX BAP. ÝAGTYLYGYŇ POLÝARLANMAGY

30.1. Tebigy we polýarlanan şöhleler

Ýagtylyk şöhlesi kese elektromagnit yrgyldylarynyň ýaýramagydyr. Oňa $(4{,}0-7{,}6)\cdot 10^{-7}m$ aralygyndaky tolkun uzynlyklary degişlidir. Elektrik meýdanynyň $\vec{E}$ wektory we magnit induksiýasynyň $\vec{B}$ wektory şöhläniň ýaýraýyş ugruna perpendikulýar we özara perpendikulýar tekizliklerde yrgyldaýarlar. Köplenç hadysalar öwrenilende elektrik meýdanynyň $\vec{E}$ güýjenme wektoryna görä öwrenilýär. Oňa **ýagtylyk wektory** diýilýär.

Ýagtylanýan jisim tarapyndan şöhlelendirilýän elektromagnit tolkunlary örän köp atomlaryň goýberýän tolkunlarynyň jemidir. Atomlar ýagtylyk tolkunyny biri-biri bilen baglanyşyksyz şöhlelendirýärler. Şonuň üçin jisimden şöhlelendirilýän ýagtylyk wektory özüniň giňişlikdäki ornuny üznüksiz üýtgedip durýar.



30.1-nji çyzgy

$\vec{E}$ wektory deň ähtimallykly dürli taraplara ugrukdyrylan ýagtylyga **tebigy ýagtylyk** diýilýär. Ýagtylyk wektorynyň ugry tertipleşen tolkunlara **polýarlanan tolkun** diýilýär. 30.1-nji *a* çyzgyda **tebigy şöhläniň** ýagtylyk wektorynyň yrgyldysynyň ugurlary we ululyklary şertli görkezilendir. **Biraz polýarlanan** şöhläniň meňzeş şekili 30.1-nji *b* çyzgyda görkezilen. $\vec{E}$ wektory diňe bir ugurda yrgyldy edýän şöhlelere **tekiz** ýa-da **çyzykly polýarlanan şöhle** diýilýär. Bu şöhle şertli 30.1-nji *ç* çyzgydaky ýaly şekillendirilýär.

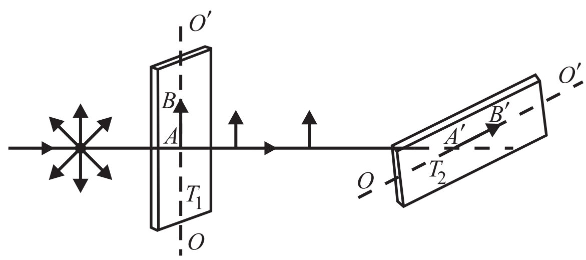
Polýarlanmanyň derejesi

$$P = \frac{I_{max} - I_{max}}{I_{max} + I_{max}} \tag{30.1}$$

ululyk bilen häsiýetlendirilýär. Bu ýerde I_{max} we I_{min} – ýagtylyk wektorynyň özara perpendikulýar düzüjilerine degişli ýagtylygyň maksimal we minimal intensiwligi.

Polýarlaşan şöhläni **polýarizatorlaryň** kömegi bilen almak bolýar. $\vec{E}$ wektoryň yrgyldysy üçin anizotrop bolan sredalar polýarizator bolup hyzmat edip bilýärler. Tebigy kristallardan oňat polýarizator bolup turmalin hyzmat edýär.

Turmalin bilen geçirilen tejribä seredeliň (*30.2-nji çyzgy*).



30.2-nji çyzgy

Tebigy ýagtylyk şöhlesi T_1 turmaliniň plastinkasyna perpendikulýar düşürilýär. Polýarlaşdyryjy *OO′* optiki oka parallel tekizlik boýunça ýagtylyk geçýär we ol ýagtylyk tekizparallel ýagtylyk şöhlesidir. T_1 turmalin ýagtylygyň ýaýraýan ugruna perpendikulýar tekizlikde aýlandyrylanda ýene-de degişli tekizlikde tekiz polýarlaşan şöhle emele gelýär. Eger şöhläniň ýolunda ikinji T_2 turmalin goýulsa we ýagtylyk dessesiniň ugrunyň daşynda aýlandyrylsa, onda T_2 plastinkadan geçen ýagtylygyň intensiwligi

$$I = I_0 \cos^2\alpha \tag{30.2}$$

kanuna görä üýtgeýär. Bu ýerde α – kristallaryň optiki oklarynyň arasyndaky burç, I_0 we I, degişlilikde ikinji kristalla düşýän we ondan çykýan şöhläniň intensiwligi. Bu baglanyşyga **Malýusyň kanuny** diýilýär. T_2 kristaldan geçýän ýagtylyk wektorynyň amplitudasy

$$E = E_0\cos\alpha \tag{30.3}$$

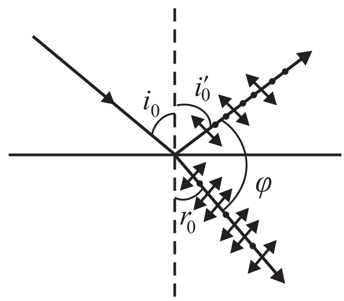
baglanyşyga görä üýtgeýär.

Tebigy ýagtylygy tekiz parallel ýagtylyga öwürýän T_1 plastinka **polýarizator** diýilýär. Ýagtylygyň polýarlanma derejesini anyklamak üçin ulanylýan T_2 plastinka **analizator** diýilýär.

30.2. Serpikmede we döwülmede ýagtylygyň polýarlanmasy. Brýusteriň kanuny

Iki sredanyň araçägine düşüp, ýagtylygyň bir bölegi serpikýän, beýleki bölegi bolsa döwülýän bolsun (*30.3-nji çyzgy*). Bu şöhleleriň ugruna analizator goýup, olaryň ikisiniň-de çäkli polýarlanandygyny anyklamak bolýar. Düşme i burçy 0-dan 90°-a çenli üýtgedilse, bu burçuň käbir i_0 bahasynda serpigen şöhle doly polýarlanan şöhlä öwrülýär. Onda $\vec{E}$ wektoryň yrgyldysy düşme tekizliginde bolup geçýär. i_0 burça doly polýarlanma burçy diýilýär we Brýusteriň kanuny bilen kesgitlenýär:

$$\mathrm{tg}i_0 = n, \tag{30.4}$$



30.3-nji çyzgy

bu ýerde n – ikinji sredanyň birinji sreda görä döwülme görkezijisi. i_0 burça **Brýusteriň burçy** hem diýilýär. Brýusteriň burçy bilen ýagtylyk düşende döwlen şöhlede iň köp polýarlanma bolýar, ýöne doly polýarlanmaýar. Düşme burçy i_0 bolanda serpigen şöhle we döwlen şöhle özara perpendikulýar bolýarlar. Düşme burçy Brýusteriň burçundan uly bolanda, ýene-de serpigen we döwlen şöhleler çäkli polýarlanan bolýarlar. Brýusteriň kanunyny i_0 düşme burçy üçin ýazalyň:

$$\frac{\sin i_0}{\cos i_0} = \frac{\sin i_0}{\sin r_0},$$

bu ýerde r_0 – degişli döwülme burçy.

Soňky deňlikden alarys:

$$\cos i_0 = \sin r_0, \qquad \angle i_0 + \angle r_0 = 90^\circ,$$

$$\angle i_0' + \angle\varphi + \angle r_0 = 180^\circ,$$

bu ýerde φ – serpigen we döwlen şöhleleriň arasyndaky burç, i_0' – serpikme burçy. $i_0 = i_0'$ bolýandygy üçin

$$\angle i_0 + \angle\varphi + \angle r_0 = 180^\circ,$$

$$\angle i_0 + \angle r_0 = 90^\circ; \qquad \angle\varphi = 90^\circ.$$

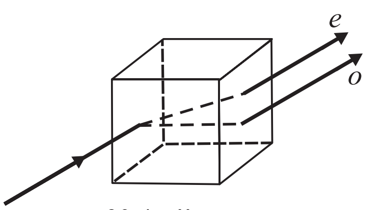
Soňky deňlik düşme burçy i_0 bolanda serpigen we döwlen şöhleleriň özara perpendikulýardygyny görkezýär.

30.3. Ikileýin şöhle döwülmesi

Düşen şöhläni iki şöhlä bölýän kristallar bar. Şeýle kristallar bilen haýsydyr bir predmete seredilende predmetiň şekili iki bolup görünýär. Bu hadysa Bartolin tarapyndan açyldy (1647 ý.) we oňa **ikileýin şöhle döwülmesi** diýilýär.

Ikileýin şöhledöwüji kristallarda bir ýa-da iki ugur boýunça şöhläniň ikilenmesi bolup geçmeýär. Diňe adaty döwülme bolup geçýär. Bu ugurlara optiki oklar diýilýär. Optiki oklaryň sanyna görä kristallara **bir** ýa-da **iki okly kristallar** diýilýär. Bir okly kristallara island şpaty, kwars, turmalin degişlidir. Olar optikada giňden ulanylýar.

Island şpatynyň galyň kristalyna ýagtylygyň inçe dessesi düşürilende kristaldan iki şöhle çykýar. Olar biri-birine we düşýän şöhlä paralleldir (*30.4-nji çyzgy*).



30.4-nji çyzgy

Düşýän şöhle kristala normal düşürilende iki döwlen şöhle emele gelip, olaryň biri düşýän şöhläniň dowamy bolýar, beýlekisi bolsa gyşarýar. Birinji şöhlä **adaty** (*o*), ikinji şöhlä **adaty däl şöhle** (*e*) diýilýär. Island şpatynda bir optiki ok bardyr.

Düşýän ýagtylyk dessesiniň we kristalyň optiki okunyň ýatýan tekizligine **baş tekizlik** diýilýär. Kristaldan çykan şöhleler özara perpendikulýar tekizliklerde polýarlanan bolýar. Adaty şöhlede ýagtylyk wektorynyň yrgyldysy baş tekizlige perpendikulýar ugurda bolýar. Adaty däl şöhlede bolsa – baş tekizlikde bolýar.

Adaty we adaty däl şöhleler üçin döwülme burçlarynyň deň dälligi sebäpli, olar üçin döwülme görkezijileri hem deň däldir. Adaty şöhläniň elektrik wektorynyň yrgyldysynyň hemme ugurlarda-da kristalyň optiki okuna perpendikulýar bolýandygy üçin adaty şöhle hemme tarapa deň tizlik bilen ýaýraýar we oňa degişli döwülme görkeziji n_0 hemişelikdir. Adaty däl şöhle üçin bu şert ýerine ýetmeýär. Ol dürli ugurlar boýunça dürli tizlikler bilen ýaýraýar we oňa degişli döwülme görkeziji n_e hemişelik däldir. Ol ugurlara bagly üýtgeýär. Şeýle bolansoň adaty däl şöhle üçin ýagtylygyň döwülme kanuny ýerine ýetmeýär. Adaty şöhle üçin bu kanun ýerine ýetýär. Kristaldan çykandan soň bu şöhleler biri-birine meňzeşdir. Diňe olaryň polýarlanan tekizlikleri dürlüdir.

30.4. Polýarlaşdyryjy prizmalar we polýaroidler

Polýarlanan şöhleleri almak üçin ulanylýan gurluşlar ikileýin şöhle döwülme hadysasynyň esasynda işleýärler. Polýarlanan şöhleleri almak üçin, köplenç prizmalar we polýaroidler ulanylýar. Prizmalar iki görnüşe bölünýärler:

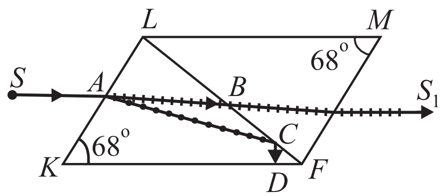
1) diňe polýarlanan şöhle berýän prizmalar **(polýarlaşdyryjy prizmalar)**;

2) özara perpendikulýar iki tekizlikde iki polýarlanan şöhläni berýän prizmalar (ikileýin döwüji prizmalar).

Polýarlaşan iki şöhläniň birini aýyrmak üçin, köplenç **Nikolyň prizmasyndan (nikoldan)** peýdalynylýar.

Nikoly taýýarlamak üçin island şpatynyň kristaly aşakdaky tertipde kesilýär we ýylmanýar. Kristal uzyn gapyrgasy gysga gapyrgasyndan 3,75 esse uzyn, ýiti burçlary bolsa 68° bolar ýaly (*30.5-nji çyzgy*) görnüşe getirilýär.

Soňra kristal *LF* diagonal boýunça iki bölege bölünýär we kanad balzamy bilen biri-birine ýelmeşdirilýär. Kanad balzamynyň döwülme görkezijisi 1,54, ýagny adaty şöhläniň döwülme görkezijisinden (n_0 = 1,66) kiçi, adaty däl şöhläniňkiden bolsa (n_0 = 1,515) uludyr.



30.5-nji çyzgy

Düşýän *SA* şöhle *LK* grana düşýän bolsun. Düşen şöhle *AC* adaty şöhläni we *AB* adaty däl şöhläni emele getirýär. Adaty şöhle kanad balzamynyň *LF* gatlagyna düşýär we düşýän burçunyň doly içki serpikmäniň çäk burçundan uly bolany üçin doly içki serpikmä sezewar bolýar. Netijede ol *CD* ugur boýunça gitmeli bolýar we garalanan *KF* granda ýuwudylýar. Adaty däl *AB* şöhle bolsa kanad balzamynyň gatlagyndan döwlüp geçýär we kristaldan çykýar. Nikolyň prizmasy polýarizatorlar we analizatorlar hökmünde ulanylýar. Käbir kristallar galyň görnüşde alnanda iki söhläniň birini siňdirýär. Bu hadysa dihroizm diýilýär. Beýle kristallara turmalin mysal bolup bilýär. Onuň bir ýetmezçiligi turmalinden çykan şöhle reňkli bolýar. Sebäbi kristalyň özi reňkli bolýar.

Ikileýin döwüji prizmalarda adaty we adaty däl şöhleleriň döwülme görkezijileriniň tapawutlanýandygyndan peýdalanyp, biri-birinden mümkin boldugyça uzakda ýerleşen polýarlanan şöhleler alynýar.

Polýaroidleriň döredilmegi bilen dihroizm hadysasyny ýüze çykarýan kristallaryň ähmiýeti artýar. Polýaroidiň ýasalyşynyň bir mysalyna seredeliň. Selluloidiň ýuka gatlagyna gerapatitiň (kükürt-turşy iod-hininiň) maýda kristallary ornaşdyrylýar. Gerapatit ikileýin döwüji madda bolmak bilen, ýagtylygyň görünýän çäginde güýçli dihroizmi ýüze çykarýar. Şeýle taýýarlanan örän ýuka (~ 0,1 *mm*) gatlak hem adaty şöhleleri siňdirýär we iň gowy polýarizatoryň häsiýetini ýüze çykarýar. Olary uly meýdanly edip ýasamak aňsat bolýar.

Dürli kristallarda alnan polýarlanan şöhleler minerallaryň häsiýetlerini öwrenmek üçin peýdalanylýar. Bu maksat üçin **polýarlanan şöhleli mikroskoplar** ulanylýar.

30.5. Polýarlanma tekizliginiň öwrülmesi

Optiki aktiw diýlip atlandyrylýan käbir maddalar polýarlanma tekizligini öwürmäge ukyplydyr. Bu maddalara kristal maddalardan kwars, kinowar, arassa suwuklyklardan skipidar, nikotin, garyndylardan şekeriň suwdaky garyndysy, çakyr turşulygy we beýlekiler degişlidir.

Ýagtylyk kristalyň optiki oky boýunça ýaýranda polýarlanma tekizligi has güýçli öwrülýär. Öwrülme φ burçy şöhläniň kristalda geçen l ýoluna göni baglydyr:

$$\varphi = \alpha l, \tag{30.5}$$

bu ýerde α – aýlanma hemişeligi. Bu hemişelik tolkun uzynlygyna baglydyr.

Garyndylarda polýarlanma tekizliginiň aýlanma burçy ýagtylygyň garyndyda geçen ýoluna, garyndynyň aktiw böleginiň mukdaryna (c) göni baglydyr:

$$\varphi = [\alpha]cl \tag{30.6}$$

bu ýerde $[\alpha]$ – öwrülmäniň udel hemişeligi.

Optiki aktiw maddalaryň polýarlanma tekizliginiň **saga** we **çepe aýlaýan görnüşleri** bardyr. Öwrülmäniň ugry şöhläniň ýaýraýyş ugruna bagly däldir. Şöhläni garşylykly tarapa gönükdirseň-de polýarlanma tekizligi şol bir tarapa öwrüler.

Her bir optiki aktiw maddalaryň saga we çepe öwürýän görnüşleride bardyr. Olar maddanyň molekulalarynda atomlaryň ýerleşişi bilen tapawutlanýar. Olarda atomlaryň ýerleşişi zerkal tersleýin bolýar.

Polýarlaşdyryjy tekizlikleri perpendikulýar ýerleşdirilen polýarizatorlaryň arasynda optiki aktiw madda (kwarsyň kristaly, suwda erän şeker we ş.m.) ýerleşdirilende ekranyň synlanýan bölegi ýagtylanýar. Garaňky ekrany almak üçin polýarizatorlaryň birini φ burça öwürmeli bolýar. Bu burç (30.5) we (30.6) deňlikler bilen kesgitlenýär. Himiki suwuk garyndylar öwrenilende berlen garyndynyň $[\alpha]$ udel öwrülmesiniň hemişeligi, l uzynlyk belli bolanda φ burçy ölçemek bilen garyndydaky aktiw maddanyň c mukdaryny kesgitläp bolýar. Bu usul garyndylary, aýratynda şeker garyndylaryny öwrenmek üçin ulanylýar.

Käbir optiki aktiw däl maddalar magnit meýdanynyň täsiri bilen optiki aktiw häsiýete eýe bolýarlar. Bu hadysa Faradeýiň effekti diýilýär. Bu hadysa diňe ýagtylygyň ugry magnitlenmäniň ugry bilen gabat gelende ýüze çykýar.

Magnit meýdanynyň täsiri bilen polýarlanma tekizliginiň φ öwrülmesi

$$\varphi = VlH \tag{30.7}$$

aňlatma bilen kesgitlenýär. Bu ýerde H – magnit meýdanynyň güýjenmesi, V – udel magnit öwrülmesi we ol ýagtylygyň tolkun uzynlygyna baglydyr.

Öwrülmäniň ugry magnit meýdanynyň ugry bilen kesgitlenýär. Aýlanmanyň ugry şöhläniň ugruna bagly däldir. Optiki aktiw maddalar magnit meýdanyna-da ýerleşdirilende, olar polýarlanma tekizligini aýlamak üçin goşmaça mümkinçilik alýarlar. Optiki aktiw däl maddalar elektrik meýdanynda, bir taraplaýyn gysylmanyň we süýndürmäniň täsiri bilen hem optiki aktiw häsiýete eýe bolup bilýärler.

V bölüm

ŞÖHLELENMÄNIŇ KWANT TEBIGATY

XXXI BAP. ÝYLYLYK ŞÖHLELENMESI

31.1. Ýagtylygyň şöhlelendirilişi we siňdirilişi. Absolýut gara jisim

Ýokary temperatura çenli gyzdyrylan jisimleriň ýagtylyk goýberýändigi bellidir. Gyzdyrylma netijesinde jisimleriň şöhle goýbermesine **ýylylyk şöhlelenmesi** diýilýär. Ýylylyk şöhlelenmesi absolýut nol temperaturadan ýokarda ähli jisimlerde bolýar. Onuň spektri üznüksizdir. Temperatura bagly şöhlelenmäniň tolkun uzynlygy üýtgeýär. Ýokary temperaturalarda gysga elektromagnit şöhleleri, ýagny görünýän we ultramelewşe şöhleleri goýberilýär. Pes temperaturalarda, esasan, uzyn tolkunlar goýberilýär.

Jisimlerde şöhlelenme atomlarda bolup geçýän hadysalar sebäpli bolýar. Şöhlelenmede atom energiýasyny ýitirýär we onuň dowamly bolmagy üçin energiýanyň üstüni dolduryp durmaly bolýar. Ýylylyk şöhlelenmesinde atom öz energiýasyny ýylylyk energiýasynyň hasabyna dolduryp durýar. Beýleki şöhlelenmelerden tapawutlylykda ýylylyk şöhlelenmesi **deňagramly** bolup bilýär, ýagny wagtyň käbir pursatyndan başlap, şöhläniň energiýasy bilen jisimiň energiýasynyň arasynda deňagramlylyk ýüze çykýar. Wagt birliginde jisimiň şöhlelendirýän energiýasy bilen jisimiň alýan energiýasy deň bolýar. Bu şertiň bozulmagy jisimiň deňagramsyz şöhlelenmesine getirýär. Ýylylyk şöhlelenmesi we ýuwudylmasy bilen baglanyşykly hadysalary öwrenmek üçin birnäçe häsiýetnamalar girizilýär.

Ýylylyk şöhlelenmesini mukdar taýdan häsiýetlendirmek üçin **spektral şöhlelendiriş ukyby** $R_{v,T}$ diýen düşünje girizilýär. Ol jisimiň berlen temperaturada, tolkunyň uzynlygynyň birlik göwrümine degişli bolan şöhlelenmäniň kuwwatydyr (ölçeg birligi – $J/(m^2 \cdot s)$):

$$R_{v,T} = \frac{dW_{v,v+dv}}{dv},$$

bu ýerde $dW_{v,v+dv}$ – bir sekuntda jisimiň birlik meýdanyndan ýygylygyň v – dan $(v + dv)$-ä çenli aralygynda goýberilýän şöhlesiniň energiýasydyr. Şöhlelendiriş ukybyny tolkun uzynlygynyň funksiýasy görnüşinde ($R_{\lambda,T}$) hem ýazmak bolar. Olaryň baglanyşygy

$$R_{v,T} = R_{\lambda,T}\frac{\lambda^2}{c} \quad (31.1)$$

görnüşde bolýar. Bu ýerde c – ýagtylygyň wakuumdaky tizligi.

Şöhlelendiriş ukybyny ähli ýygylyklar boýunça jemläp,

$$R_T = \int_0^\infty R_{v,T}dv \quad (32.2)$$

integral şöhlelendiriş ukyby diýen düşünje alynýar.

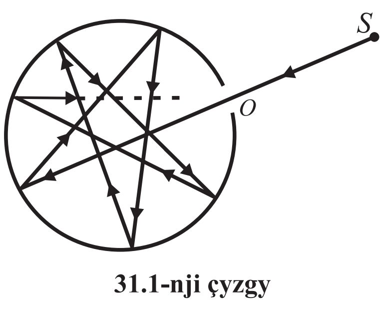
Jisimiň üstüne düşýän şöhläni siňdirmesi

$$A_{v,T} = \frac{dW^{si\check{n}}_{v,v+dv}}{dW_{v,v+dv}} \quad (31.3)$$

aňlatma bilen kesgitlenýän **siňdirme ukyby** bilen häsiýetlendirilýär. Bu ýerde $dW^{si\check{n}}_{v,v+dv}$ – bir sekuntda jisimiň birlik meýdanynyň ýygylygyň v-dan ($v + dv$)-ä çenli aralygynda siňdirýän şöhlesiniň energiýasydyr. $dW_{v,v+dv}$ – ýokarky şertler üçin düşýän şöhläniň doly energiýasy. Siňdirme ukyby ölçeg birliksiz ululykdyr.

$R_{v,T}$ we $A_{v,T}$ – ululyklar temperatura, ýygylyga we jisimiň tebigatyna bagly üýtgeýär. Şonuň üçin bu ululyklaryň kesgitli temperatura we ýygylygyň ujypsyz üýtgeýän aralygyna degişli bahalary degişlilikde **spektral şöhlelendiriş ukyby** we **spektral ýuwdyş ukyby** diýilip atlandyrylýar.

Üstüne düşýän şöhläni energiýasyny doly siňdirýän jisime **absolýut gara jisim** diýilýär. Gara jisimiň siňdirme ukyby bire deňdir ($A_{v,T} = 1$). Siňdirme ukybyny α harpy bilen belläp, oňa **siňdirme koeffisiýenti** diýilýän halatlary hem bolýar. Adatça, dürli jisimler üçin siňdirme koeffisiýenti $0 < \alpha < 1$ çäklerdedir. Üstüne düşýän şöhle energiýasyny doly serpikdirýän zerkal üst üçin $\alpha = 0$ bolýar.



31.1-nji çyzgy

Tebigatda absolýut gara jisim ýokdyr. Gara gurumyň, gara mahmalyň, külüň we emeli gara reňkleriň ýagtylygy siňdirme ukyby absolýut gara jisimiňkä golaýdyr. Gaty jisimden ýapyk üst görnüşinde ýasalan, içki üsti garaldylan, böwri inçe deşikli gurluşda absolýut gara jisimiň häsiýetini alyp bolýar (*31.1-nji çyzgy*). Bu gurluşyň içine O deşikden giren ýagtylyk şöhlesi diwardan köp gezek serpikme netijesinde intensiwligini doly ýitirýär.

31.2. Kirhgofyň kanuny

Hemişelik T temperaturaly ýapyk sistemada dürli temperaturaly birnäçe jisim ýerleşdirilen bolsun we olaryň arasynda energiýa çalşygy diňe şöhlelenme usuly bilen amala aşýan bolsun. Käbir wagt geçenden soň jisimleriň temperaturalary deňleşer. Bu ýerde dürli jisimleriň şol bir temperatura aralyklarynda dürli şöhlelendiriş we siňdirme ukyplary bardygyny bellemek gerek. Aýdylanlardan şeýle netije gelip çykýar: wagt birliginde birlik meýdanda energiýany köp şöhlelendirýän jisim, degişlilikde energiýany köp siňdirýär. Tejribeler hem bu tekrarlamanyň dogrudygyny görkezdi.

Kirhgof bu baglanyşyklary kanun görnüşinde aşakdaky ýaly kesgitleýär. Kirhgofyň kanuny: **spektral şöhlelendiriş ukybynyň spektral siňdirme ukybyna gatnaşygy jisimiň tebigatyna bagly däldir, ol ähli jisimler üçin temperatura we ýygylyga bagly uniwersal funksiýadyr ($r_{\nu,T}$):**

$$\frac{R_{\nu,T}}{A_{\nu,T}} = r_{\nu,T}. \tag{31.4}$$

Absolýut gara jisim üçin $A_{\nu,T} = 1$ diýip $r_{\nu,T} = R_{\nu,T}$ deňligi alarys. Bu ýerden Kirhgofyň $r_{\nu,T}$ uniwersal funksiýasy absolýut gara jisimiň spektral şöhlelendiriş ukybyna deňdir diýen netije gelip çykýar.

Kirhgofyň kanunyndan aşakdaky netijeler gelip çykýar:

1) islendik jisimiň spektriniň islendik ýerindäki spektral şöhlelendiriş ukyby absolýut gara jisimiň spektral şöhlelendiriş ukybyndan hemişe kiçidir (ν we T-niň şol bir bahalarynda);

2) eger jisim elektromagnit tolkunynyň käbir ýygylygyny siňdirmeýän bolsa, onda ony şöhlelendirýän hem däldir;

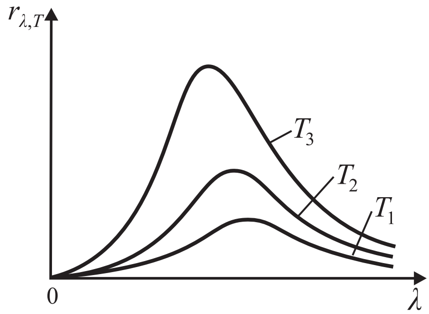
3) Kirhgofyň kanunyna boýun egmeýän şöhlelenmeler ýylylyk şöhlelenmesi däldir.

31.3. Stefan-Bolsmanyň kanuny. Winiň kanuny

Kirhgofyň kanunyndan belli boluşy ýaly, absolýut gara jisimiň şöhlelendiriş ukyby $R_{\nu,T}$ temperatura we ýygylygyna bagly bolan $r_{\nu,T}$ uniwersal funksiýa bilen kesgitlenýär. (31.1) formuladan peýdalanyp, bu funksiýany temperatura we tolkun uzynlygyna bagly görnüşde hem ýazmak bolar:

$$r_{\lambda,T} = \frac{c}{\lambda^2} r_{\nu,T}.$$

Absolýut gara jisim üçin $r_{\lambda,T}$ uniwersal funksiýanyň λ tolkun uzynlygyna we temperatura baglylygy 31.2-nji çyzgyda görkezilendir ($T_3 > T_2 > T_1$).



31.2-nji çyzgy

Çyzgydan görnüşi ýaly, gara jisimiň spektrinde energiýanyň paýlanyşy deňölçegsiz. Bu baglanyşyk üçin uniwersal funksiýanyň anyk görnüşini tapmagyň ýylylyk şöhlelenmesiniň teoriýasy üçin uly ähmiýeti bardyr.

Şöhlelendiriş ukybynyň temperatura baglylygy Stefan-Bolsmanyň kanunynda

$$R_e = \sigma T^4 \qquad (31.5)$$

görnüşde kesgitlendi. Bu ýerde $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8} Wt/(m^2 \cdot K^4)$ – Stefan-Bolsmanyň hemişeligi.

Absolýut gara jisim üçin $R_{\lambda,T} = r_{\lambda,T}$ bolýandygyny göz öňünde tutup, 31.2-nji çyzgydaky maglumatlar bilen (31.5) formulany deňeşdirip bolar. Ol kanagatlanarly netije berýär. Ýöne Stefan-Bolsmanyň kanuny şöhlelendiriş ukybynyň spektral düzümine degişli däldir.

Çyzgydan görnüşi ýaly, tejribede alnan baglanyşyklardaky $r_{\lambda,T}$-niň uly bahasy temperatura artdygyça gysga tolkunlara tarap süýşýär. Elektrodinamikanyň we termodinamikanyň kanunlarynyň esasynda bu baglanyşyk nemes fizigi W.Win tarapyndan kesgitlenildi. Şonuň üçin oňa **Winiň süýşme kanuny** diýilýär we

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} \qquad (31.6)$$

görnüşde ýazylar, ýagny absolýut gara jisimiň spektral şöhlelendiriş ukybynyň iň uly bahasyna degişli $\lambda_{\max}$ tolkun uzynlygy termodinamiki temperatura ters proporsionaldyr. Bu ýerde $b = 2{,}9 \cdot 10^{-3} m \cdot K$ – Winiň hemişeligi.

Bu kanuna görä, pes temperaturalarda gara jisimiň goýberýän spektrinde gysga tolkunlar artykmaçlyk edýär. Demir gyzdyrylanda ilki gyzyl reňkde bolup, has ýokary temperaturalarda ak reňkde şöhlelenmegi hem muňa mysal bolup bilýär.

Stefan-Bolsmanyň we Winiň kanunlary ýylylyk şöhlelenmesiniň teoriýasynyň degişli tapgyrynda wajyp ähmiýetli boldy, ýöne ýylylyk şöhlelenmesiniň tejribe maglumatlaryny dolulygyna düşündirmäge bu kanunlaryň mümkinçiligi bolmady.

31.4. Releý-Jinsiň we Plankyň formulalary

Ýylylyk şöhlelenmesiniň kanunlary iňlis alymlary Releý we Jins tarapyndan statistiki fizikadaky energiýanyň erkinlik derejeleri boýunça paýlanyşyny ulanmak bilen amala aşyryldy.

Absolýut gara jisimiň spektral şöhlelendiriş ukyby üçin Releý-Jinsiň formulasy

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2}kT \tag{31.7}$$

görnüşdedir. Bu ýerde k – Bolsmanyň hemişeligi.

Releý-Jinsiň formulasy kiçi ýygylyklar we ýokary temperaturalar üçin tejribe bilen ylalaşýan netijeleri berdi. Ýokary ýygylyklarda bolsa bu formula tejribäniň maglumatlary bilen we Winiň kanuny bilen ylalaşmaýar. Şeýle-de bu formuladan Stefan-Bolsmanyň kanunyny getirip çykaryp bolmaýar. Jemläp aýdylanda, klassyky fizikanyň kanunlarynyň esasynda ýylylyk şöhlelenmesiniň spektrinde energiýanyň paýlanyşyny düşündirip bolmaýar.

Absolýut gara jisim üçin şöhlelenme ukybyny kesgitleýän we tejribeleriň maglumatlary bilen ylalaşýan formula 1900-nji ýylda nemes fizigi M.Plank tarapyndan alyndy. Bu maksat üçin Plank täze kwant çaklamasyny ulandy. Oňa laýyklykda şöhle energiýany üznüksiz goýbermeýär-de, aýratyn kwantlar görnüşinde goýberýär. Bu teoriýa boýunça her kwantyň energiýasy

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \tag{31.8}$$

formula bilen kesgitlenýär. Bu ýerde $h = 6{,}625 \cdot 10^{-34} J \cdot s$ – Plankyň hemişeligi. Energiýa kwantlar bilen şöhlelendirilýändigi sebäpli çeşmäniň goýberýän islendik energiýasynyň mukdary birnäçe $h\nu$ ululyga deň bolýar.

Şöhlelenmäniň kwant teoriýasyndan peýdalanyp, M. Plank Kirhgofyň uniwersal funksiýasy üçin

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2}\frac{h\nu}{e^{h\nu/(kT)} - 1} \tag{31.9}$$

funksiýany aldy. Bu formula tejribäniň maglumatlary bilen örän oňat ylalaşyp, absolýut gara jisimiň şöhlelendiriş spektriniň paýlanyşyny temperaturanyň islendik bahasy bilen baglanyşdyrýar. Bu teoretiki netijäniň alnan wagty (1900) ylymda kwant fizikasynyň dörän wagty hasaplanýar.

Kiçi ýygylyklarda $h\nu << kT$ bolýandygyny, ýagny ýylylyk energiýasynyň şöhle energiýasyndan has uludygyny nazara alyp, Plankyň bu formulasyndan Releý--Jinsiň formulasyny alyp bolýar.

Şeýle-de (31.5) formula (31.9) formuladan $r_{\nu,T}$-niň bahasyny goýup we käbir özgertmeler geçirip

$$R_e = \sigma T^4 \tag{31.10}$$

görnüşdäki Stefan-Bolsmanyň formulasyny alyp bolýar. Hasaplamalaryň netijesinde alnan Stefan-Bolsmanyň σ hemişeligi k, c we h hemişelikler bilen kesgitlenýär we tejribeleriň netijeleri bilen oňat ylalaşýar.

Winiň süýşme kanunyny hem Plankyň formulasynyň üsti bilen getirip çykaryp bolýar. Şeýle hem bu ýerde şöhlelenme energiýasynyň iň uly bahasyna degişli tolkun uzynlygy üçin aňlatma hem almak bolýar. Bu teoretiki baglanyşyklar hem tejribe bilen oňat ylalaşýar. Şonuň üçin Plankyň formulasy tejribe maglumatlaryny ulanyp, birnäçe hemişelikleri kesgitlemäge mümkinçilik berdi.

Plankyň ýylylyk şöhlelenmesi baradaky bu işleri kwant teoriýasynyň başlangyjy bolmak bilen fizika ylmynyň ösmegine aýgytly täsir etdi.

31.5. Jisimleriň temperaturasyny ölçemek üçin ýylylyk şöhlelenmesiniň kanunlarynyň ulanylyşy

Ýylylyk şöhlelenmesiniň kanunlary gyzgyn jisimleriň temperaturasyny ölçemek üçin mümkinçilik berýär. Spektral şöhlelendiriş ukybynyň ýa-da doly şöhlelendiriş ukybynyň temperatura baglylygyndan peýdalanyp, temperaturany ölçemegiň usullaryna **optiki pirometriýa** diýilýär. Gyzgyn jisimiň goýberýän şöhlesiniň intensiwligi boýunça onuň temperaturasyny ölçeýän abzallara **pirometrler** diýilýär. Ýylylyk şöhlelenmesiniň haýsy kanunyna esaslanyp ölçenilýändigine baglylykda, jisimiň temperaturasy **radiasiýa, reňk** we **ýagtylandyryş** temperaturalary diýen üç görnüşe bölünýär.

Stefan-Bolsmanyň kanunyny peýdalanmak bilen ölçenilýän temperatura radiasiýa temperaturasydyr. Bu kanunyň esasynda

$$T_{rad} = \sqrt[4]{\frac{R_T}{\sigma}}$$

aňlatmany almak bolýar. Bu ýerde R_T – temperaturasy ölçenilýän jisimiň şöhlelendiriş ukyby, ol absolýut gara jisimiň şöhlelendiriş ukybyndan (R_e) kiçidir: $R_T < R_e$. Şonuň üçin T_{rad} radiasiýa temperaturasy hakyky T temperaturadan kiçidir.

Reňk temperaturasy $R_{\lambda,T}$ spektral şöhlelendiriş ukybynyň

$$R_{\lambda,T} = A_T r_{\lambda,T}$$

esasynda ölçenilýär. Bu ýerde $A_T = const < 1$ – spektral siňdiriş ukyby. Bu usulda öwrenilýän jisimiň spektral şöhlelendiriş ukybynyň iň uly bahasyna degişli $\lambda_{\max}$ tolkun uzynlygy kesgitlenýär we Winiň kanunynyň esasynda

$$T_{r\check{n}} = \frac{b}{\lambda_{\max}}$$

reňk temperaturasy kesgitlenýär. Bu usul köp jisimler üçin temperaturanyň dogry bahasyny berýär.

Käbir tolkun uzynlygynda absolýut gara jisimiň spektral şöhlelendiriş ukyby öwrenilýän jisimiň spektral şöhlelendirişiniň dykyzlygyna deň bolan şertde

$$r_{\lambda,T_a} = R_{\lambda,T} \qquad (31.11)$$

ölçenilýän temperatura ýagtylandyryş temperaturasy diýilýär. Bu ýerde T – jisimiň hakyky temperaturasy, T_a – ýagtylandyryş temperaturasy.

Gara däl jisimler üçin siňdirme ukyby $A < 1$ bolany üçin $T_a < T$ bolýar. Ýagny hakyky temperatura hemişe ýagtylandyryş temperaturasyndan ýokarydyr.

Ýagtylandyryş temperaturasyny ölçemek üçin **sapagy ýitýän pirometrler** ulanylýar. Pirometriň gyzýan sapagy (31.10) şert ýerine ýeter ýaly edilip saýlanyp alynýar. Temperaturasy pes nakal bilen ýagtylanýandygy üçin gyzgyn jisime seredilende onuň öňünde nakalyň şekili görnüp durýar. Ölçeg üçin nakalyň toguny köpeldip, gyzgyn jisimiň öňünde nakal görünmez ýaly ýagdaýy, ýagny nakalyň ýitýän ýagdaýyny almaly. Bu şert üçin nakala berilýän togy ölçeýän graduirlenen milliampermetriň görkezeni boýunça ýagtylandyryş temperaturasy kesgitlenýär. Jisimiň şöhlelenmäni siňdirme ukyby belli bolanda Plankyň formulasynyň üsti bilen hakyky temperaturany kesgitläp bolýar.

XXXII BAP. FOTOEFFEKT. FOTON

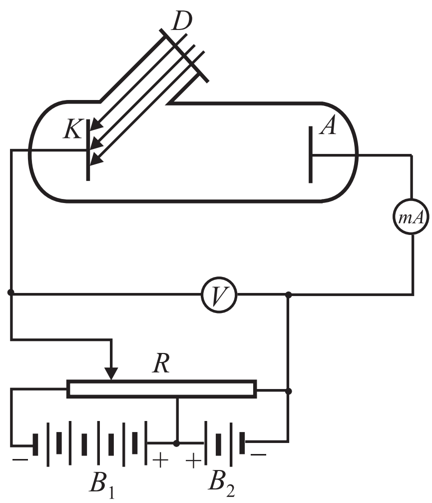
32.1. Daşky fotoelektrik effektiň kanunlary

Elektromagnit şohlesiniň täsiri bilen maddalardan elektronlaryň goparylmagyna fotoelektrik effekti ýa-da fotoeffekt diýilýär. Bu hadysa **daşky, içki** we **wentil** fotoeffektleri diýen üç görnüşde ýüze çykýar.

Daşky fotoeffektde elektromagnit şöhlesiniň täsiri bilen maddadan elektronlar çykarylýar. Daşky fotoeffektiň gaty jisimlerde we gazlarda ýüze çykýandygy anyklandy.

Fotoeffekt hadysasy nemes alymy G. Gers tarapyndan gazlardaky toga ultramelewşe şöhleleriniň täsiri öwrenilende açyldy (1887). Bu hadysa rus alymy A. G. Stoletow tarapyndan yzygiderli öwrenildi we birnäçe kanunalaýyklyklar anyklandy. Fotoeffekti öwrenmek üçin ulanylýan gurluşyň shemasy 32.1-nji çyzgyda görkezilendir.

Bu shemada iki ellektrod (A we K) wakuumly turbada ýerleşdirilendir. Turbada goýlan D penjireden öwrenilýän K elektroda dürli tolkun uzynlykly elektromagnit şöhlesi düşürilýär. Shemadaky R potensiometr elektrodlardaky potensiallaryň alamatyny çalşyrmak we ululygyny sazlamak üçin hyzmat edýär.



32.1-nji çyzgy

Elektrodlara goýlan napryaženiýe woltmetr, tok bolsa milliampermetriň kömegi bilen ölçenilýär. Anoda položitel potensial, katoda otrisatel potensial goýlup, katod käbir tolkun uzynlykly elektromagnit şöhlesi bilen şöhlelendirilende fotoeffekt ýüze çykýar we netijede zynjyrda tok döreýär. Bu toga **fototok** diýilýär. Napryaženiýanyň kiçi bahalarynda elektrodlardaky potensiallaryň alamatlary çalşyrylanda hem örän kiçi fototok ýüze çykyp bilýär.

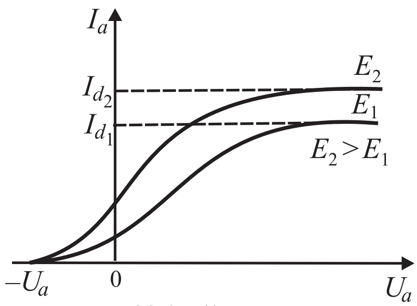
Şeýle gurluşda tejribeler geçirmek bilen Stoletow fotoeffekt üçin aşakdaky umumy kanunlary anyklady:

a) elektromagnit şöhleleriniň täsiri bilen maddalar diňe otrisatel zarýadlary ýitirýärler;

b) ultramelewşe şöhleleri fotoeffekt üçin has täsirlidir;

ç) fototoguň güýji ýagtylygyň intensiwliligine göni baglydyr.

T. Lenard we U. Tomson katoddan çykýan bölejikleriň elektrik we magnit meýdanlarynda gyşarmasyny öwrenip, olaryň udel zarýadyny $\left(\frac{e}{m}\right)$ kesgitlediler (1899). Bu maglumat bölejikleriň elektronlardygyny tassyklady.



32.2-nji çyzgy

32.1-nji çyzgydaky shema *I* fototoguň elektrodlardaky *U* naprýaženiýa baglanyşygyny kesgitlemäge, ýagny fotoeffektiň wolt-amper häsiýetnamasyny gurmaga mümkinçilik berýär. Kesgitli ýygylykda we dürli ýagtylandyryşlarda alnan wolt-amper häsiýetnamalar 32.2-nji çyzgyda görkezilendir.

Çyzgyda fototogy görkezýän egri çyzyklaryň, başda naprýaženiýa bagly artmagy katoddan çykýan elektronlaryň anoda barha köp düşýändigi bilen düşündirilýär. Naprýaženiýanyň käbir bahalaryndan soň fototok artmaýar. Ol **doýgun baha** eýe bolýar. Fototoguň iň uly bahasyna **doýgun fototok** diýilýär. Bu ýagdaýda katoddan çykan elektronlaryň hemmesi anoda ýetýär. Çyzgydaky E_1 we E_2 ýagtylandyryşy görkezýär.

Eger doýgun fototoguň bahasyny

$$I_d = en$$

deňlik bilen aňlatsak, bu ýerden katoddan 1 sekuntda çykýan elektronlaryň *n* sanyny kesgitläp bolýar.

Elektrodlardaky naprýaženiýe $U_a = 0$ bolanda hem käbir fototoguň ýüze çykýandygy çyzgydan görünýär. Katoddan çykýan elektronlaryň käbir kinetik energiýasy bardyr. Şol energiýanyň hasabyna elektronlar anoda baryp, onuň zynjyrynda tok döredip bilýärler. Elektrodlarda käbir garşylyklaýyn U_0 naprýaženiýany goýmak bilen, bu togy nola deňläp bolýar. $U = U_0$ naprýaženiýa **saklaýjy naprýaženiýa** diýilýär.

Aýdylanlardan peýdalanyp, elektronlaryň iň uly energiýasy we saklaýjy naprýaženiýa degişli energiýa üçin deňligi alarys:

$$\frac{m\upsilon_{\max}^2}{2} = eU_0.$$

Ol bolsa U_0 naprýaženiýany ölçäp, elektronyň $\upsilon_{\max}$ iň uly tizligini kesgitlemäge mümkinçilik berýär.

Dürli şertlerde dürli materiallar üçin fotoeffekt hadysasy öwrenilip, daşky fotoeffektiň aşakdaky üç kanuny açyldy:

1. Düşýän ýagtylygyň ýygylygy hemişelik bolanda katoddan wagt birliginde çykýan elektronlaryň sany ýagtylygyň intensiwliligine göni baglydyr.

2. Fotoelektronlaryň iň uly tizligi düşýän şöhläniň intensiwligine bagly däldir we ýagtylygyň v ýygylygynyň bahasyna göni bagly üýtgeýär.

3. Her madda üçin fotoeffektiň ýüze çykmaýan ýygylyklarynyň iň pes kesgitli bahasy v_0, ýagny **gyzyl çägi** bardyr.

Bu kanunlary tolkun teoriýasy esasynda düşündirmäge synanyşylanda kynçylyklar ýüze çykýar. Fotoeffektiň ikinji we üçünji kanunlaryny tolkun teoriýasy bilen düşündirmek mümkin däl. Sebäbi tolkun teoriýasyna görä ýagtylyk tolkunynyň wagt birliginde äkidýän energiýasy (intensiwligi) amplitudanyň kwadratyna göni baglydyr. Eger şeýle bolsa, ýagtylyk tolkunynyň amplitudasynyň uly bahalarynda kiçi ýygylyklarda hem fotoeffekt ýüze çykmaly. Şeýle amplitudanyň ulalmagy fotoelektronlaryň çykyş tizligini ulaltmaly. Ýöne bu aýdylanlar tejribeleriň maglumatlaryna gabat gelmeýär. Diýmek, fotoeffekt hadysasyny ýagtylygyň tolkun teoriýasy bilen düşündirip bolmaýar.

32.2. Daşky fotoeffekt üçin Eýnşteýniň deňlemesi. Ýagtylygyň kwant teoriýasynyň tejribede tassyklanmagy

Fotoeffektiň kanunlary Eýnşteýn tarapyndan teklip edilen fotoeffektiň kwant teoriýasy bilen düşündirilýär. Bu teoriýa görä ýagtylyk aýry-aýry **kwantlar** görnüşinde goýberilýär, şol görnüşde **ýaýraýar** we **siňdirilýär**. Ýagtylygyň her kwantyna $\varepsilon_0 = hv$ energiýa degişlidir. Bu teoriýanyň esasynda ýagtylyk giňişlikdäki kwantlaryň akymy görnüşinde kabul edilýär. Ýagtylygyň kwanty **foton** diýlip atlandyrylýar. Fotonlaryň akymynyň tizligi ýagtylygyň tizligine deňdir. Her foton diňe bir elektron tarapyndan siňdirilýär. Şonuň üçin bölünip çykýan fotoelektronlaryň sany siňdirilen fotonlaryň sanyna göni baglydyr. Fotonlaryň sany bolsa ýagtylygyň intensiwligine göni baglydyr.

Bu aýdylanlar fotoeffektiň birinji kanunyny tassyklaýar. Fotonlaryň elektronlar tarapyndan ýuwudylmagy örän tiz bolup geçýär. Şonuň üçin hem fotoeffekt inersiýasyz hadysa hasaplanýar.

Energiýanyň saklanma we öwrülme kanunynyň esasynda Eýnşteýn daşky fotoeffekt üçin aşakdaky deňlemäni aldy:

$$hv = A + \frac{m\upsilon_{\max}^2}{2}. \tag{32.1}$$

Diýmek, elektron tarapyndan ýuwdulan fotonyň $hv = \varepsilon$ energiýasy elektronyň maddadan A çykyş işine we elektronyň alan $\frac{m\upsilon_{\max}^2}{2}$ kinetik energiýasyna sarp bolýar. Bu deňlemä **daşky fotoeffekt üçin Eýnşteýniň deňlemesi** diýilýär.

Fotoeffektiň ikinji kanunyna görä fotoelektronlaryň başlangyç tizliginiň ýagtylygyň intensiwligine bagly bolman, onuň ν ýygylygyna baglydygy we üçünji kanuna görä her madda üçin fotoeffektiň başlanýan ýygylygynyň, ýagny **gyzyl çäginiň** bardygy Eýnşteýniň deňlemesinden gelip çykýar.

Fotoeffektiň başlanýan şerti üçin (32.1) deňlikden alarys:

$$h\nu_0 = A \qquad \text{ýa-da} \qquad \nu_0 = \frac{A}{h} \tag{32.2}$$

Bu ýerde ν_0 – **fotoeffektiň gyzyl çägi** diýilýän ýygylyk. Ol metalyň himiki düzümine baglydyr.

Ýagtylygyň intensiwligi has ýokary bolanda (meselem, lazer şöhlesinde) elektron birnäçe ($N = 2, 3, 4...$) fotony ýuwudyp bilýär. Bu şertdäki fotoeffekte **köp fotonly fotoeffekt** diýilýär. Onuň deňlemesi

$$Nh\nu = A + \frac{m\upsilon_{\max}^2}{2} \tag{32.3}$$

görnüşde bolýar. Bu ýerde N – elektronyň ýuwdan fotonlarynyň sany.

Köp fotonly fotoeffektiň gyzyl çägi

$$\nu_{0_N} = \frac{A}{Nh} \tag{32.4}$$

deňlik bilen kesgitlenýär.

Daşky fotoeffektden başga-da, fotoeffektiň **içki** we **wentil** fotoeffektleri diýen görnüşleri bardyr.

Elektromagnit şöhlesiniň täsiri bilen dielektriklerde we ýarymgeçirijilerde elektronlaryň maddadan çykman baglanyşyksyz ýagdaýa geçmegine **içki fotoeffekt** diýilýär. Bu hadysa sebäpli maddada erkin elektronlar döreýär we maddanyň geçirijiligi gowulaşýar. Bu görnüşdäki geçirijilige **fotogeçirijilik** diýilýär.

Daşky elektrik meýdany ýok mahalynda ýarymgeçiriji bilen ýarymgeçirijiniň ýa-da ýarymgeçiriji bilen metallyň kontakty (galtaşygy) ýagtylandyrylanda elektrik hereketlendiriji güýjüň (foto – EHG-niň) ýüze çykmagyna **wentil fotoeffekti** diýilýär.

32.3. Fotoeffektiň ulanylyşy

Fotoeffekt hadysasyna esaslanyp işleýän fotoelektron abzallar tehnikanyň we ylmyň dürli pudaklarynda giňden ulanylýar. Olaryň bir görnüşi şöhle energiýasyny elektrik energiýasyna öwürýän fotoelementlerdir. Olaryň giň ýaýran görnüşi wakuumly fotoelementlerdir. Onuň esasy bölegi howasy çykarylan we içki tarapy ýagtylyga duýgur gatlak bilen örtülen aýna gapdyr. Gabyň içki tarapy fotokatod bolup hyzmat edýär. Onda ýagtylygyň düşmegi üçin kiçijik penjire bar. Fotoelementiň anody bolup, gabyň ortasynda ýerleşdirilen halka ýa-da tor hyzmat edýär. Penjireden ýagtylyk düşende anod bilen katodyň arasynda foto – EHG döreýär. Ýagtylandyryşa ýokary duýgurlygy bolany üçin wakuumly fotoelementler fotometrik abzallar hökmünde ulanylýar.

Wakuumly fotoelemente meňzeş, ýöne inert gazy bilen doldurylan aýna gap görnüşli fotoelementler hem bardyr. Olara gazly fotoelementler diýilýär. Bularyň duýgurlygy wakuumly fotoelementleriňkiden ýokary bolýar.

Içki fotoeffektiň esasynda ýasalan abzallaryň birine ýarymgeçirijili fotoelement ýa-da fotogarşylyk (fotorezistor) diýilýär. Bu fotoelementleriň duýgurlygy ýokary bolmak bilen, gyzyl çäginiň ýokarylygy sebäpli, olar infragyzyl şöhlelerde, rentgen we gamma şöhlelerde ölçegler geçirmäge mümkinçilik berýär.

Iýmitlendiriş çeşmesini talap etmeýän, şöhlelenmäniň intensiwligine gönimel bagly fototok döredýän wentil fotoelementleri hem ylymda we tehnikada giňden ulanylýar. Olaryň duýgurlygy ýokary. Esasan germaniden, kremniden, selenden we beýleki ýarymgeçiriji materiallardan ýasalýar. Kremniden ýasalan wentil fotoelementler gün energiýasyny elektrik energiýasyna öwürýän gün batareýalarynda giňden ulanylýar. Häzirki wagtda peýdaly täsir koeffisiýenti 16-18%-e ýetirilen gün batareýalary bardyr.

Tehnikada fotoeffekt hadysasynyň esasynda işleýän fotoköpeldijiler hem giňden ulanylýar. Käbir maddalaryň üstüne katod şöhlesi düşürilende maddadan çykýan elektronlaryň sany düşýän elektronlaryň sanyndan has köp bolýar. Fotoköpeldijiler şu hadysanyň esasynda işleýärler. Olar gowşak signallary güýçlendirmek maksady bilen ölçeg tehnikasynda ulanylýar.

Umuman, fotoabzallaryň ulanylýan örüsi giň. Olar dürli önümleriň hilini barlamakda, önümçiligi awtomatlaşdyrmakda we dolandyrmakda, aragatnaşygyň dürli ulgamlarynda görünmeýän şöhläniň kömegi bilen habarlar iberilende we lokasiýa usuly bilen obýektleri görmekde ulanylýar.

32.4. Foton. Ýagtylygyň basyşy

Eýnşteýniň ýagtylyk baradaky çaklamasyna görä, ýagtylyk aýry-aýry kwantlar görnüşinde, ýagny fotonlar görnüşinde goýberilýär we ýaýraýar. Fotonyň ýaýraýyş tizligi ýagtylygyň tizligine deňdir. Onuň massasy barada düşünje girizmek üçin massanyň we energiýanyň özara baglanyşygynyň kanunyndan peýdalanylýar. Bir fotonyň energiýasy $\varepsilon_0 = h\nu$. Bu energiýany $E = mc^2$ energiýa bilen deňläp alarys:

$$m = \frac{h\nu}{c^2}. \tag{32.5}$$

Fotonyň dynçlyk massasy nola deňdir. Ol elementar bölejik hasaplanýar.

Fotonyň massasyny ýagtylygyň tizligine köpeltsek, fotonyň impulsy üçin aňlatma alarys. Onda (32.5) deňlikden

$$P_f = mc = \frac{h\nu}{c} \tag{32.6}$$

deňligi ýazmak bolar. Foton hem islendik beýleki bölejikler ýaly energiýasy, massasy we impulsy bilen häsiýetlendirilýär. (32.5) we (32.6) deňlikleriň çep tarapynda korpuskulýar, sag tarapynda bolsa tolkun häsiýetnamalary durmak bilen, bu deňlikler elektromagnit şöhlesiniň iki görnüşdäki teoriýasyny baglanyşdyrýar. Bu görnüşli teoriýalaryň bileligine **kwant-tolkun ikileýinligi** diýilýär.

Ýagtylygyň fotonlarynyň impulsynyň barlygy üçin olar düşýän üstlerine basyş etmeli. Ýagtylygyň basyşynyň barlygy Lebedýew tarapyndan (1900 ý.) ýokary duýgurlykly tejribelerde subut edildi. Onuň netijeleri Makswelliň elektromagnit teoriýasynyň netijeleriniň tejribede subut bolýandygyny görkezdi. Lebedewiň tejribeleriniň maglumatlary ýagtylygyň kwant teoriýasynyň esasynda ýagtylygyň basyşy üçin alnan formulalar bilen hem ylalaşýar.

Jisimiň üstüne perpendikulýar düşýän monohromatik ýagtylyk şöhlesiniň döredýän basyşynyň kwant teoriýasy esasynda hasaplanyşyna seredeliň. Goý, jisimiň üstüne düşýän N fotonyň ρ serpikme koeffisiýenti bilen baglanyşykly ρN sanysy serpigýän bolsun. $(1-\rho)N$ foton bolsa ýuwudylýan bolsun. Her ýuwdulan foton üste $P_f = \dfrac{h\nu}{c}$ impulsy berýär.

Her serpigýän foton bolsa, impulsynyň $+P_f$ bahadan $-P_f$ baha çenli üýtgeýänligi üçin, jisime $2P_f = \dfrac{2h\nu}{c}$ impuls berýär. Onda bir sekuntda N foton düşýän üstüň basyşyny

$$P = \frac{2h\nu}{c}\rho N + \frac{h\nu}{c}(1-\rho)N = (1+\rho)\frac{h\nu}{c}N \tag{32.7}$$

aňlatma bilen hasaplamak bolar. Bu ýerde $Nh\nu = E_e$ – wagt birliginde üste düşýän ähli fotonlaryň energiýasy, $\dfrac{E_e}{c} = w$ – gatnaşyga şöhlelenme energiýasynyň göwrümleýin dykyzlygy diýilýär. Bu belgilemelerden peýdalanyp, (32.7) deňligi aşakdaky görnüşde ýazmak bolar:

$$P = \frac{E_e}{c}(1+\rho) = w(1+\rho). \tag{32.8}$$

Kwant teoriýasynyň esasynda alnan (32.8) formula Makswelliň elektromagnit teoriýasynda alnan netije bilen gabat gelýär.

32.5. Komptonyň effekti

1923-nji ýylda amerikan fizigi A. Kompton tarapyndan açylan hadysa şöhlelenmäniň kwant tebigatynyň wajyp subutnamasy boldy. Kompton (1923 ý.) kiçi atom massaly elementlerde (Li, Be, C we ş.m.) we ýeňil atomly maddalarda (B, parafin) rentgen şöhlesiniň pytramasyny öwrendi. Netijede, maddada pytran rentgen şöhlesiniň düzüminde başky şöhleden başga-da, ondan has uzyn tolkunlaryň bardygy ýüze çykaryldy. Tejribeleriň maglumatlaryna görä, düşýän şöhläniň λ tolkun uzynlygy bilen pytrama netijesinde emele gelen şöhläniň λ' tolkun uzynlygynyň $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ tapawudy düşýän şöhläniň tolkun uzynlygyna we pytradyjy maddanyň tebigatyna bagly däldir. Ol diňe θ pytrama burçuna baglydyr. Tejribeleriň netijesinde $\Delta\lambda$ tapawut üçin

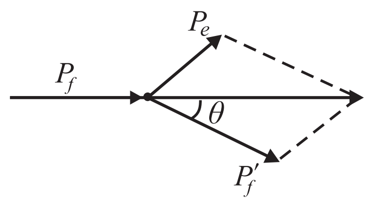
$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2\lambda_c \sin^2\frac{\theta}{2} \tag{32.9}$$

görnüşdäki formula alyndy. Bu ýerde λ_c – **kompton tolkun uzynlygy.** Elektronda fotonyň pytramasynda $\lambda_c = 2{,}426\ pm$ bolýar.

Bu hadysa Komptonyň effekti diýilýär we oňa şeýle kesgitleme berilýär. **Gysga tolkunly elektromagnit şöhlelenmesiniň (rentgen we gamma şöhlelenmesi) maddanyň erkin ýa-da gowşak baglanyşykly elektronlarynda maýyşgak pytramasy netijesinde has uzyn tolkunyň ýüze çykmagyna komptonyň effekti diýilýär.**

Bu effekti ýagtylygyň tolkun teoriýasy esasynda düşündirip bolmaýar. Sebäbi periodik meýdanda ýerleşen elektron meýdanyň üýtgeýşiniň ýygylygyndan pes ýygylykda yrgyldap bilmeýär. Diýmek, ol has uzyn tolkuny goýbermäge ukypsyz bolýar.

Komptonyň effekti ýagtylygyň kwant teoriýasynyň esasynda düşündirilýär. Bu teoriýada ýagtylyga fotonlaryň akymy ýaly seredilýänligi sebäpli, komptonyň effektinde rentgen fotonlary bilen erkin (ýa-da gowşak baglanyşykly) elektronlaryň maýyşgak çaknyşmasy bolup geçýär diýip kabul edilýär. Bu çaknyşma netijesinde saklanma kanunlaryna görä foton impulsynyň we energiýasynyň bir bölegini elektrona berýär.



32.3-nji çyzgy

Impulsy $P_f = \dfrac{h\nu}{c}$ we energiýasy $\varepsilon_f = h\nu$ bolan fotonyň dynçlyk energiýasy $E_0 = m_0c^2$ bolan elektron bilen maýyşgak urgusyna seredeliň (*32.3-nji çyzgy*). Foton impulsynyň we energiýasynyň bir bölegini elektrona berip, hereketiniň ugruny üýtgedýär, ýagny pytraýar. Fotonyň energiýasynyň azalmagy pytran şöhläniň tolkun uzynlygynyň uzalmagyna getirýär. Pytran fotonyň impulsy $P_f' = \dfrac{h\nu'}{c}$, energiýasy $-\varepsilon_f' = h\nu'$ bolar. Dynçlykdaky elektron bolsa, $P_e = m\upsilon$ impulsy we $E = m_0c^2$ energiýany alar. Bu ýerde m_0 we m – elektronyň dynçlykdaky we hereketdäki massalary.

Şeýle çaknyşmalaryň hersinde impulsyň we energiýanyň saklanma kanunlary ýerine ýetýär:

$$E_0 + \varepsilon_f = E + \varepsilon_f', \tag{32.10}$$

$$\vec{P_f} = \vec{P_e} + \vec{P_f}'. \tag{32.11}$$

(32.10) deňlige degişli ululyklary goýup we (32.11) deňligi 32.3-nji çyzga görä özgerdip alarys:

$$m_0c^2 + h\nu = mc^2 = h\nu', \tag{32.12}$$

$$(m\upsilon)^2 = \left(\frac{h\nu}{c}\right)^2 + \left(\frac{h\nu'}{c}\right)^2 - 2\frac{h^2}{c^2}\nu\nu' \cos\theta. \tag{32.13}$$

Hereketdäki elektronyň massasy üçin $m = \dfrac{m_0}{\sqrt{1-\left(\frac{\upsilon}{c}\right)^2}}$ gatnaşygy ulanyp, (32.12) deňligi kwadrata göterip, soňra ony (32.13)-den aýryp alarys:

$$m_0c^2(\nu - \nu') = h\nu\nu'(1 - \cos\theta).$$

Bu ýerde $\nu = \frac{c}{\lambda}$, $\nu' = \frac{c}{\lambda'}$ we $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ deňlikleri ulanyp,

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_0 c}(1 - \cos\theta) = \frac{2h}{m_0 c}\sin^2\frac{\theta}{2} \tag{32.14}$$

deňligi almak bolar. Bu deňlik Kompton tarapyndan tejribeleriň üsti bilen alnan (32.9) deňlik bilen gabat gelýär. (32.14) deňlige h, m_0 we c hemişelikleriň bahalaryny goýsak elektronyň tolkun uzynlygy üçin $\lambda_c = \frac{h}{m_0 c} = 2,426\ pm$ bahany alarys.

Şeýlelikde, Komptonyň effektiniň uzyn tolkunynyň erkin ýa-da gowşak baglanyşykly elektronlar tarapyndan başlangyç fotonlary ýuwutmagy netijesinde goýberilýändigine göz ýetirmek bolýar.

Kwant teoriýasynda düşýän şöhle bilen deň tolkun uzynlykly şöhläniň goýberilmegi atom bilen berk baglanyşykly elektronlaryň üsti bilen düşündirilýär. Bu ýagdaýa fotonyň berk baglanyşykly elektronlar bilen täsirleşmesine tutuş atom bilen fotonyň täsirlenmesi ýaly seretmeli bolýar.

Fotonyň atom bilen impuls we energiýa alyş-çalşygy bolup geçýär. Atomyň massasynyň elektronyň massasyndan has uly bolany üçin, atoma fotonyň energiýasynyň ujypsyzja bölegi geçýär. Şeýle pytramada düşýän ýagtylyk şöhlesiniň uzynlygy ýokary takyklykda saklanýar.

VI bölüm

ATOM FIZIKASYNYŇ WE KWANT MEHANIKASYNYŇ ELEMENTLERI

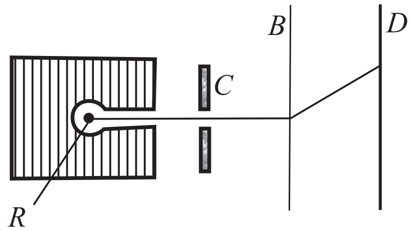
XXXIII BAP. WODORODYŇ ATOMY ÜÇIN BORUŇ TEORIÝASY

33.1. Taryhy maglumatlar. Atomyň gurluşy üçin Rezerfordyň modeli

Özünde himiki elementiň häsiýetlerini saklaýan, elementiň iň kiçi bölejigine **atom** diýilýär. XIX asyryň ahyryna çenli atom dargamaýan bölejik hasaplanypdyr. Elektroliz, gazlaryň ionlaşmasy, maddalaryň şöhlelenmesi, radioaktiw dargama we beýleki hadysalaryň öwrenilmegi atomyň çylşyrymly gurluşynyň bolmagy mümkin diýen pikiri döredipdir. Soňraky geçirilen tejribelerde seýreklendirilen gazlaryň we metallaryň çyzykly spektr goýberýändigi anyklanylýar. Atomyň spektriniň çyzyklarynyň tertipsiz däl-de, käbir tertip boýunça toparlary emele getirip ýerleşýändigi kesgitlenildi. Umuman atomlaryň spektrleri öwrenilip, alnan netijeler atomyň çylşyrymly gurluşyny aňladýan başlangyç bolup hyzmat edýär.

Elektroliziň, fotoeffektiň we katod şöhleleriniň öwrenilmegi atomyň zarýadly bölejiklerden durýan elektrodinamiki sistema bolmagy mümkin diýen netijä getirýär. Bu maglumatlara esaslanyp, J.Tomson atomyň gurluşy üçin öz modelini teklip edýär. Bu modele laýyklykda atom radiusy 10^{-10} m töweregi bolan sfera görnüşindedir. Onuň üçinde položitel elektrik zarýadlary deňölçegli paýlanandyr. Sferanyň içinde otrisatel zarýadly elektronlar hereket edýändir. Atomyň doly zarýady nola deňdir, ýagny atomdaky položitel we otrisatel zarýadlaryň sany deňdir. Atomda elektronlaryň artykmaçlygy ýa-da ýetmezçiligi otrisatel ýa-da položitel ionlaryň emele gelmegine getirýär. Bu model boýunça zarýadlaryň sany belli bolman galýar. Şeýle-de položitel zarýadlaryň roly belli edilmeýär. Soňraky gözlegleriň görkezişi ýaly, XX asyryň başlarynda atomyň gurluşyny öwrenmek we Tomsonyň çaklamalaryny anyklamak maksady bilen iňlis alymy E.Rezerford birnäçe tejribeler geçirdi. Bu maksat üçin ol radioaktiw elementleriň dargamasynda ýüze çykýan alfa-şöhlesini ulandy. Tejribede, birinji nobatda, položitel zarýadlaryň atomda ýerleşişini anyklamak göz öňünde tutuldy.

Rezerfordyň tejribeler üçin ulanan gurnamasynyň shema-şekili 33.1-nji çyzgyda görkezilendir.



33.1-nji çyzgy

Wakuum döredilen kamerada α – şöhleleriň çeşmesi bolup hyzmat edýän R radioaktiw madda – ikileýin ionlaşdyrylan geliýniň ýadrosy ýerleşdirilýär. Ondan çykýan α – şöhläniň inçe akymy C diafragmadan geçip, B ýuka metal folga düşýär. Alfa şöhle metal folgadan geçip, fluoressirlenýän D ekrana düşýär. Düşýän α – bölejikler ekranda uçgynjyklar döredýär. Olar mikroskopyň kömegi bilen synlanýar. α – şöhleler metal plastinadan geçende, olaryň pytramasy bolup geçýär, ýagny α – bölejikler metaldan geçip, öz ugurlaryny üýtgedýärler.

Elektronyň massasynyň kiçi bolany üçin, α – bölejikleriň tizligine täsiriniň az boljakdygy sebäpli, şöhläniň gyşarmasyny kiçi göwrümlerde jemlenen položitel zarýadlary döredýär diýen netijä gelinýär. Hasaplamalaryň netijesinde α – bölejikleriň položitel zarýadlaryň täsiri bilen gyşaryp giperbola şekilli traýektoriýa bilen hereket edýändigi, olaryň göni traýektoriýadan gyşarma burçunyň α – bölejiginiň massasyna, zarýadyna, tizligine, şeýle-de göni traýektoriýanyň dowamy bilen itekleýji položitel zarýada çenli aralyga baglydygy anyklanýar.

Tejribeleriň we barlaglaryň maglumatlary Rezerforda, 1911-nji ýylda aşakdaky netijelere gelmäge mümkinçilik berdi:

1. Atomyň 10^{-14} m töweregi radiusly ýadrosy bardyr, onuň töwereginde elektronlar hereket edýärler.
2. Ýadronyň položitel zarýady Ze deňdir, bu ýerde Z – elementiň Mendeleýewiň tablisasyndaky tertip nomeri; e – elektronyň zarýadynyň absolýut bahasy.
3. Elektronlar ýadronyň daşyndan radiusy atomyň radiusyndan (10^{-10} m) uly bolmadyk orbitalar boýunça aýlanýarlar.

Atomyň gurluşyna bolan öňki garaýyşlardan tapawutlylykda, Rezerfordyň modeli atomy hereketli zarýadlaryň sistemasy ýaly görkezdi. Ýöne bu modeliň hem klassyky fizika gabat gelmeýän taraplary bar.

Dynçlykdaky elektronyň ýadro bilen arasynda elektrostatik dartyşmanyň boljakdygyny göz öňünde tutup, modelde elektronlar ýadronyň daşynda aýlanýan halda alynýar. Ýadronyň daşynda käbir r radiusly orbita boýunça aýlanýan elektron üçin ýadronyň Kulonyň kanuny boýunça dartyş güýji merkeze ymtylýan güýje deň bolýar:

$$\frac{Zee}{4\pi\varepsilon_0 r^2} = \frac{m\upsilon^2}{r}; \qquad m\upsilon^2 r = \frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0}, \tag{33.1}$$

bu ýerde υ – elektronyň orbitadaky çyzyk tizligi; e – elektronyň zarýady; Ze – ýadronyň zarýady.

Klassyky elektrodinamikanyň gazananlary bilen deňeşdirilende Rezerfordyň modeli birnäçe gapma-garşylyklara getirdi.

1. $r \approx 10^{-10} m$ radiusly orbita üçin hasaplananda elektronyň tizligi $\sim 10^6\ m/s$ bolýar. Merkeze ymtylýan tizlenme bolsa,

$$a = \frac{\upsilon^2}{r} = 10^{22} \frac{m}{s^2}.$$

Elektronyň beýle ýokary tizlenmesi güýçli elektromagnit şöhlelenmesini döretmeli. Bu şöhlelenme elektronyň tizliginiň bada-bat peselmegine we elektronyň ýadronyň üstüne gaçmagyna getirmeli. Bu ýerden Rezerfordyň modeli boýunça atomyň durnukly däldigi görünýär.

2. Görnüşi ýaly, (33.1) deňlikde iki ululyk, ýagny orbitanyň radiusy r we elektronyň tizligi υ näbellidir. Diýmek, radiusyň ummasyz köp sanly bahasy tizligi (energiýany) kesgitläp biler. Başgaça aýdylanda, r, υ we E ululyklaryň bahalary üznüksiz üýtgäp biler. Eger şeýle bolsa, onda elektron bir orbitadan ýadro golaý beýleki orbitalara geçende energiýanyň islendik ülşüni goýberip bilmeli, ýagny atomyň spektri bütewi bolmaly. Hakykatda bolsa her maddanyň goýberýän kesgitli çyzykly spektrleri bardyr.

33.2. Atomyň şöhlelenmesiniň spektrleri

Köpsanly tejribeleriň netijesinde atomlaryň islendik tolkun uzynlykly şöhleleri goýberip bilmeýändigi, şöhlelenmäniň diňe kesgitli tolkun uzynlyklarda goýberilýändigi anyklandy. Iň ýönekeý atom bolan wodorodyň atomynyň spektrleri öwrenilip, spektriň çyzykly görnüşdedigi, şeýle-de olaryň birnäçe seriýalary emele getirýändigi anyklandy.

Şweýsar fizigi Balmer wodorodyň atomynyň spektriniň görünýän bölegi üçin

$$v = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right) \tag{33.2}$$

görnüşdäki formulany kesgitledi. Bu ýerde $n = 3, 4, 5, ...,$ bütin sanlar, $R = 3,29 \cdot 10^{15} \frac{1}{s}$ – Ridbergiň hemişeligi.

Bu seriýalarda $n = 3$ bolandaky birinji çyzyk gyzyl reňke degişlidir. Soňky çyzyklar: $n = 4$ – mawy, $n = 5$ – gök, $n = 6$ – melewşe reňklere degişlidir. Hasaplanan ýa-da ölçelen v ýygylygyň bahalaryndan peýdalanyp, $\lambda = \frac{c}{v}$ gatnaşyk bilen degişli λ tolkun uzynlyklary kesgitläp bolýar. Hasaplama bilen alnan tolkun uzynlyklarynyň bahalary tejribede alnan bahalar bilen deň gelýär.

Wodorodyň spektrinde ýene-de birnäçe seriýalar bardyr. Olardan spektriň ultramelewşe bölegine düşýän Laýmanyň we infragyzyl bölegine düşýän birnäçe seriýalar üçin meňzeş formulalar alyndy.

Laýmanyň seriýasynyň formulasy:

$$v = R\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2}\right), \qquad (33.3)$$

bu ýerde $n = 2, 3, 4, ...$.

Spektriň infragyzyl oblastyna degişli seriýalar:

Paşenyň seriýasy

$$v = R\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2}\right), \qquad (n = 4, 5, 6, ...); \qquad (33.4)$$

Breketiň seriýasy

$$v = R\left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2}\right), \qquad (n = 5, 6, 7, ...);$$

Pfundaň seriýasy

$$v = R\left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2}\right), \qquad (n = 6, 7, 8, ...);$$

Hemfriniň seriýasy

$$v = R\left(\frac{1}{6^2} - \frac{1}{n^2}\right), \qquad (n = 7, 8, 9, ...);$$

Bu formulalar tejribeleriň maglumatlarynyň netijeleri boýunça ýazylan formulalardyr. Olaryň teoretiki düşündirilişi has soň amala aşyryldy.

33.3. Boruň postulatlary

Atomyň şöhlelenme spektriniň çyzykly häsiýetde bolmagy atomyň islendik mukdardaky energiýany şöhlelendirip bilmeýändigine we onuň energiýanyň diňe kesgitli ülüşlerini – kwantlaryny şöhlelendirýändigine şaýatlyk etdi. Atomyň energiýany ýuwduşy hem şu tertipde amala aşýar. Bu maglumatlary derňäp, daniýaly fizik N. Bor atom diňe kesgitli energiýaly ýagdaýlarda bolup biler, ol islendik energiýaly ýagdaýda bolup bilmez diýen netijä geldi.

Atom bir energetiki ýagdaýdan beýlekä geçende başlangyç we soňky ýagdaýlaryň energiýalarynyň tapawudyna deň bolan energiýanyň kwantyny şöhlelendirýär ýa-da ýuwudýar. Bu ýerden atomyň energetiki ýagdaýynyň diskretdigi aýdyň bolýar. Bu tekrarlamalaryň esasynda N. Bor (1913 ý.) atomyň gurluşy üçin kwant teoriýasyny döretdi we Rezerfordyň modelini kämilleşdirdi. Onuň esasy bolup üç postulat durýar.

I. Elektron atomda islendik orbita boýunça hereket edip bilmeýär, ol diňe kesgitli radiusly orbitalar boýunça hereket etmäge ukyplydyr. Bu orbitalara stasionar ýa-da "rugsat berlen" orbitalar diýilýär. Ol orbitalarda elektronyň hereket mukdarynyň $m\upsilon r$ momenti $\frac{h}{2\pi}$ ululygyň bütin sanlara köpeltmek hasyllaryna deňdir:

$$m\upsilon r = n\frac{h}{2\pi}, \tag{33.5}$$

bu ýerde m – elektronyň massasy; υ – elektronyň tizligi; r – orbitanyň radiusy; n – kwant sany diýip atlandyrylýan bütin san (n = 1, 2, 3, ...); h – Plankyň hemişeligi.

Stasionar orbitada elektronyň kesgitli energiýasy bardyr. Ol orbitalaryň radiuslaryny kesgitleýän (33.5) formula elektron orbitalarynyň kwantlanyş şerti diýilýär.

II. Elektronyň stasionar orbitalar boýunça hereketinde energiýanyň şöhlelendirmesi we ýuwudylmasy bolmaýar.

III. Elektronyň energiýasy E_{n_1} bolan durnukly orbitadan elektronyň energiýasy E_{n_2} bolan durnukly orbita elektron geçende $h\nu$ energiýaly kwant şöhlelendirilýär ýa-da ýuwdulýar.

Şöhlelendirilýän ýa-da ýuwdulýan elektromagnit şöhlesiniň ýygylygy

$$h\nu = E_{n_1} - E_{n_2} \tag{33.6}$$

şert bilen kesgitlenýär.

Bu postulatdan görnüşi ýaly, atomyň şöhlelendirýän elektromagnit tolkunynyň ýygylygy atomyň durnukly ýagdaýlarynyň energiýalarynyň tapawudyna baglydyr.

Birinji postulatda getirilýän kwantlaşmanyň şertinden (33.5) we Rezerfordyň hödürlän (33.1) formulasyndan peýdalanyp, elektronyň orbitasynyň radiusy we ondaky elektronyň tizligi üçin aňlatmalar almak bolýar.

n-nji orbitanyň radiusy:

$$r_n = \frac{\varepsilon_0 n^2 h^2}{\pi Z e^2 m}. \tag{33.7}$$

n-nji orbitadaky elektronyň tizligi:

$$\upsilon_n = \frac{Ze^2}{2\varepsilon_0 nh}. \tag{33.8}$$

(33.7) formuladan görnüşi ýaly, orbitanyň radiusy ýadrodan daşlaşdygyça, natural sanyň kwadratyna göni baglanyşykda uzalýar. (33.8) formula boýunça, elektronyň tizligi ýadrodan daşlaşdygyça, orbitanyň nomerine ters baglanyşyk bilen kemelýär. (33.7) formula bilen birinji orbitanyň (n = 1) radiusy hasaplananda $r_1 \approx 5{,}29 \cdot 10^{-11} m$. Birinji orbitadaky elektronyň tizligi bolsa, (33.8) formula boýunça $\upsilon_1 \approx 2 \cdot 10^6 m/s$ bolýar.

Atomdaky elektronyň doly energiýasy onuň E_k kinetik energiýasynyň we elektronyň ýadro bilen dartyşmasy sebäpli ýüze çykýan U potensial energiýasynyň jemine deňdir. Elektronyň kinetik energiýasyny (33.8) formuladan peýdalanyp, hasaplap bolar:

$$E_k = \frac{m\upsilon_n^2}{2} = \frac{mZ^2 e^4}{8\varepsilon_0^2 n^2 h^2}. \tag{33.9}$$

(33.7) formuladan peýdalanyp (33.9) deňligi

$$E_k = \frac{1}{8\pi\varepsilon_0}\frac{Ze^2}{r} \tag{33.10}$$

görnüşde ýazmak bolar.

Nokatlanç q zarýatdan r aralykda ýerleşen nokadyň potensialy üçin

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r}$$

formuladan peýdalanyp we $q = Ze$ bolýandygyny hasaba alyp alarys:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Ze}{r}$$

Bu ýerde nokatlanç položitel Ze zarýaddan r aralykda ýerleşen elektronyň potensial energiýasy

$$U = -\varphi e = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Ze^2}{r}. \tag{33.11}$$

Bulardan atomdaky elektronyň doly energiýasy üçin alarys:

$$E = E_k + U = \frac{1}{8\pi\varepsilon_0}\frac{Ze^2}{r} - \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Ze^2}{r} = -\frac{1}{8\pi\varepsilon_0}\frac{Ze^2}{r}. \tag{33.12}$$

Bu deňlikden görnüşi ýaly, atomdaky elektronyň doly energiýasynyň absolýut bahasy elektronyň kinetik energiýasyna deň.

(33.12) formulada radius üçin n-nji orbitanyň radiusyny (33.7) formula boýunça ulansak, n-nji orbitadaky elektronyň doly energiýasy üçin alarys:

$$E_n = -\frac{1}{8\varepsilon_0^2}\frac{Z^2 e^4 m}{h^2}\frac{1}{n^2}. \tag{33.13}$$

Soňky deňlemelerden wodorod üçin $Z = 1$ bahany goýup alarys:

$$E_n = -\frac{1}{8\varepsilon_0^2}\frac{e^4 m}{h^2}\frac{1}{n^2}. \tag{33.14}$$

Bu aňlatma boýunça wodorodyň birinji orbitasy ($n = 1$) üçin hasaplamalar geçirilende $E_1 = –13,76$ eW baha alynýar.

Has takyk geçirilen hasaplamalar bu ululyk üçin $E_1 = –13,55$ eW bahany berýär. Durnukly orbitada ýerleşen elektronyň doly energiýasynyň bahasyna **atomyň energetiki derejesi** diýilýär.

Elektron ýadronyň iň golaý orbitasy ($n = 1$) boýunça hereket edende atom iň kiçi energiýa ($E_1 = –13,55$ eW) eýedir. Elektron atomdan has daşlaşanda ($n = \infty$) atomyň energiýasy iň uly baha ($E_\infty = 0$) eýedir.

Elektron bir durnukly orbitadan beýlekä, ýadro golaý orbita geçende käbir ε energiýany şöhlelendirýär. Ol energiýa geçişden öňki we soňky atomyň energetiki derejeleriniň tapawudyna deňdir.

$$\varepsilon = E_n - E_k,$$

bu ýerde k – elektronyň baran orbitasynyň nomeri; n – elektronyň giden orbitasynyň nomeri.

Energiýa üçin $\varepsilon = h\nu$ formulany hasaba alsak, şöhlelendirilýän elektromagnit tolkunynyň ýygylygy

$$\nu = \frac{E_n - E_k}{h} \qquad (33.15.)$$

aňlatma bilen kesgitlener. Bu tolkunyň uzynlygyny $\lambda = \frac{c}{\nu}$ gatnaşyk bilen hasaplap bolar.

Atomda elektron ýadro golaý durnukly orbitadan daşky orbita geçende energiýanyň ýuwudylmasy bolýar. Ýuwdylýan tolkunyň ýygylygy we uzynlygy ýokarkylara meňzeş formulalar bilen aňladylýar. Bu aýdylanlary jemläp, aşakdaky kesgitlemä gelmek bolar.

Atom diňe käbir kesgitli tolkun uzynlyga degişli bolan energiýany, diňe kesgitli ülüşler görnüşinde şöhlelendirmäge we ýuwutmaga ukyplydyr. Çyzykly spektrleriň tebigaty şunuň bilen düşündirilýär.

Wodorod atomynyň normal halynda elektron ýadro iň golaý orbitada hereket edýär. Oňa energiýanyň $E_1 = -13{,}55$ eW derejesi degişlidir. Beýleki derejelere ($n = 2, 3, 4, ...$) oýandyrylan derejeler diýilýär.

33.4. Spektr seriýalarynyň formulalarynyň getirilip çykarylyşy

Boruň postulatlary ulanylyp ýazylan formulalardan peýdalanyp, wodorod atomynyň spektrleri üçin tejribeleriň netijesinde ýazylan formulalary getirip çykaryp bolýar.

(33.15.) formula E_n we E_k-nyň bahalaryny n we k energetiki derejeler üçin hasaplanan bahalaryny goýup alarys:

$$\nu = \frac{E_n - E_k}{h} = \frac{e^4 m}{8\varepsilon_0^2 h^3}\left[-\frac{1}{n^2} - \left(-\frac{1}{k^2}\right)\right] = \frac{e^4 m}{8\varepsilon_0^2 h^3}\left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2}\right). \qquad (33.16.)$$

Bu ýerde $\frac{e^4 m}{8\varepsilon_0^2 h^3} \approx 3,29\frac{1}{s} = R$ – Ridbergiň hemişeligi, tejribeleriň netijesinde hasaplanan bahasyna deň. Onda (33.16.) formulany

$$\nu = R\left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2}\right) \qquad (33.17.)$$

görnüşde ýazmak bolar. Bu formulany tejribeler arkaly alnan (33.2), (33.3) we (33.4) formulalar bilen deňeşdirip, Laýmanyň seriýasynda: $k = 1$; $n = 2, 3, 4, ...$; Balmeriň formulasynda: $k = 2$; $n = 3, 4, 5, ...$; Paşeniň seriýasynda: $k = 3$; $n = 4, 5, 6, ...$; we ş.m. bolýandygyny görmek bolýar.

Bu netijeleri Boruň teoriýasy esasynda aşakdaky ýaly düşündirmek bolýar:

$k = 1$ bolanda (Laýmanyň seriýasy) wodorodyň atomynda elektron ikinji, üçünji, dördünji we ş.m. durnukly orbitalardan birinji orbita geçýär. Bu seriýa spektriň ultramelewşe bölegine degişlidir.

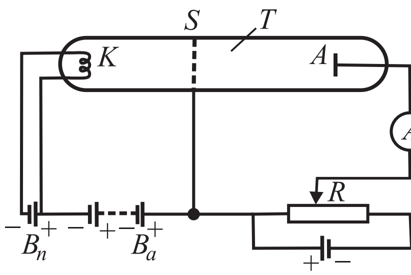
$k = 2$ bolanda (Balmeriň seriýasy) wodorodyň atomynda elektronyň üçünji, dördünji we ş.m. durnukly orbitalardan ikinji orbita geçmesi bolýar. Bu seriýa spektriň görünýän böleginde ýerleşýär.

$k = 3$ bolanda (Paşeniň seriýasy) elektron dördünji, bäşinji we ş.m. orbitalardan üçünji orbita geçýär. Bu seriýa spektriň infragyzyl bölegine degişlidir we ş.m.

33.5. Frankyň we Gersiň tejribeleri

Frankyň we Gersiň tejribeleriniň (1914 ý.) üsti bilen atomyň energiýasynyň diskret bahalara eýe bolýandygy subut edildi.

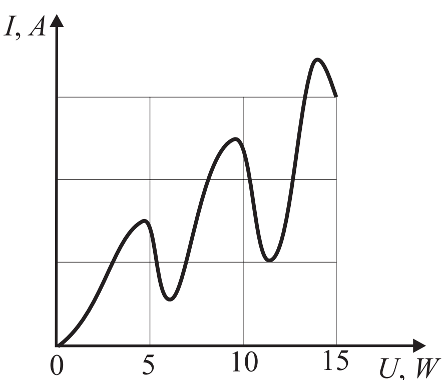
Frankyň we Gersiň tejribeleriniň shemasy 33.2-nji çyzgyda görkezilendir. Çyzgydaky T trubka simabyň bugy bilen doldurylandyr. Onda K katod we A anod ýerleşdirilendir. K-ny gyzdyrmak üçin B_n batareýa hyzmat edýär. B_a batareýa A bilen K-nyň arasynda U_1 naprýaženiýe döredýär. Katoddan çykýan termoelektronlar bu naprýaženiýäniň täsiri bilen anoda tarap hereket edýär.



33.2-nji çyzgy

Zynjyrda ýüze çykýan tok ampermetriň kömegi bilen ölçenilýär. Trubkada S tor ýerleşdirilen. Anod bilen toruň arasynda $U_2 \approx 0{,}5$ W naprýaženiýe goýulýar.

Çyzgydaky tok güýjüniň U_1 naprýaženiýa baglanyşygynyň tejribede alnan baglanyşygy 33.3-nji çyzgyda görkezilendir.



33.3-nji çyzgy

Grafikdäki toguň çylşyrymly özgermesi Boruň teroriýasynyň esasynda atomyň energiýasynyň diskretligi bilen aňsat düşündirilýär. Turbada ýerleşen simap buglarynyň atomyndaky elektrony E_1 energiýaly iň pes derejeden E_2 energiýaly oýandyrylan derejä geçirmek üçin oňa 4,9 eW energiýa bermeli. Grafikden görnüşi ýaly, B_a batareýanyň naprýaženiýesi 4,9 W-dan kiçi mahaly katod akymynyň elektronlary öz ýolunda simabyň atomlary bilen maýyşgak çaknyşyp, energiýasyny kän ýitirmän hereket edip, tok döredýär. U_1 naprýaženiýe 4,9 W baha ýetende elektronyň energiýasy simabyň atomyny oýandyrmak üçin ýeterlik bolýar. Şeýle bolansoň çaknyşyk netijesinde elektronlar energiýasyny simabyň atomlaryna berip başlaýar. Tok depginli azalýar. Bu bolsa simabyň atomyndaky elektronlaryň E_1 energiýaly ýagdaýdan E_2 energiýaly oýandyrylan ýagdaýa geçýändigine şaýatlyk edýär. Naprýaženiýe $U_1 > 5{,}4\ W$ bolanda tok güýji ýene-de artyp başlaýar. Energiýasy 9,8 eW bolan elektronlar simabyň atomy bilen iki gezek maýyşgak çaknyşyp, olary E_3 energiýaly ikinji oýandyrylan ýagdaýa geçirýärler. Energiýasyny beren elektronlar anoda ýetip bilmeýärler we tok peselip başlaýar. Haçanda $U_1 > 10{,}3\ W$ bolanda tok ýene-de artyp başlaýar. Bu artma naprýaženiýäniň $U_1 = 14{,}7\ W$ bahasyna çenli dowam edýär we soňra ýene-de peselme başlanýar.

Simabyň oýandyrylan atomlarynda elektronlar pes energiýaly derejelere geçip başlaýar we simabyň spektriniň biri şöhlelenýär.

Bu şöhlelenmäniň tolkun uzynlygyny

$$\lambda = \frac{ch}{\varepsilon}$$

aňlatmadan peýdalanyp hasaplap bolýar.

$\varepsilon = 4{,}9\ eW = 7{,}84 \cdot 10^{-19} J$ energiýa üçin alarys:

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^3 \cdot 6{,}62 \cdot 10^{-34}}{7{,}84 \cdot 10^{-19}} \approx 2{,}54 \cdot 10^{-7} m.$$

Şeýle tolkun uzynlykly spektr tejribede alnan maglumatlarda hakykatdan-da bar.

33.6. Atom fizikasynda Boruň teoriýasynyň orny

Atom fizikasynyň ösüşinde Boruň teoriýasynyň wajyp ähmiýeti bardyr. Ilkinji nobatda ol atom spektrleriniň ýüze çykyşynyň sebäplerini, ondaky umumy kanunalaýyklyklary düşündirdi. Bu teoriýa atomda elektronyň bir durnukly orbitadan beýlekä geçende goýberýän şöhlesiniň ýygylygyny hasaplamaga mümkinçilik berdi. Klassyky düşünjelere esaslanyp düzülen Boruň teoriýasy atom fizikasynyň köp hadysalaryny düşündirip bilmedi. Onuň kömegi bilen iň ýönekeý elementleriň atomlarynyň modelini düzmek başartmady. Bu teoriýada biri-birine garşy gelýän birnäçe düşünjeler bar. Onda hödürlenýän atomyň modeli, durnukly orbitalar we olaryň arasyndaky elektronlaryň geçişleri emeli girizilen, esassyz kabul edilen düşünjelerdir.

Kwant teoriýasynyň ýüze çykmagy we depginli ösmegi atomyň gurluşyna täzeçe garamaga mümkinçilik berdi. Maddalaryň tolkun häsiýetleri açylandan soň klassyky fizika esaslanýan Boruň teoriýasy kwant teoriýasyna geçiş döwrüniň taglymaty bolup galdy.

XXXIV BAP. KWANT MEHANIKASY BARADA DÜŞÜNJE

34.1. Elektronyň tolkun häsiýetleri

Boruň teoriýasy açylandan soňra atom fizikasyndaky ösüşler fransuz alymy Lui de Broýluň oňe süren pikirleri bilen baglanyşyklydyr. Oňa korpuskulýar – tolkun ikileýinligi diýilýär. Bu taglymata laýyklykda tolkunlar kwantlaryň häsiýetlerini, kwantlar bolsa, şol sanda elektron, tolkun häsiýetlerini ýüze çykarýar. Ýagtylygyň kwanty bolan fotona kesgitli P_f impuls degişli edilýär. Eger ýagtylyga tolkun ýaly seredilse, onda ol, λ_f tolkun uzynlygy bilen häsiýetlendirilýär.

Bu fiziki ululyklaryň arasyndaky baglanyşyga seredeliň. Fotonyň impulsyny $P_f = m_f c = \frac{m_f c^2}{c}$ görnüşde ýazmak bolar. Eýnşteýniň deňlemesine laýyklykda, $m_f c^2 = h\nu$ fotonyň energiýasydyr. Onda

$$P_f = \frac{h\nu}{c}.$$

Bu ýerde

$$\lambda = \frac{c}{\nu}; \qquad \frac{\nu}{c} = \frac{1}{\lambda} \qquad \text{we} \qquad P_f = \frac{h}{\lambda}$$

deňlikleri peýdalanyp

$$\lambda = \frac{h}{P_f} \tag{34.1}$$

gatnaşygy alarys. Bu gatnaşyk elektron üçin hem dogrudyr diýip de Broýl belledi. Bu deňligiň islendik bölejikler üçin hem dogrudygy soňra belli boldy.

Şeýlelikde, υ tizlik bilen hereket edýän m_e massaly elektrona

$$\lambda = \frac{h}{m_e \upsilon} \tag{34.2}$$

tolkun uzynlyk degişlidir.

Elektrik meýdanynda hereket edýän elektronyň tolkun uzynlygyna seredeliň. Elektrik meýdanynda potensiallaryň tapawudy 10^4 W bolsun. Onda energiýalar üçin

$$\frac{m_e \upsilon^2}{2} = eU$$

deňligi ýazmak bolar. Bu ýerden elektronyň tizligi

$$\upsilon = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}}.$$

Beýle tizlikli elektronyň hereketine tolkun hadysasynyň

$$\lambda = \frac{h}{m_e \sqrt{\frac{2eU}{m_e}}} = \frac{h}{\sqrt{2eUm_e}}$$

tolkun uzynlygy degişlidir.

Bu tolkun uzynlygy üçin $\lambda \approx 1,2 \cdot 10^{-11} m$ bahany berýär. Tizlik uly däldigi sebäpli bu hasaplamalara elektronyň dynçlykdaky massasy ulanylýar. Ölçegleri $l >> \lambda$ bolan ölçeýji abzallar bilen elektronyň tolkun häsiýetlerini synlap bolmaýar.

Elektronyň tolkun häsiýetlerini öwrenmek üçin amerikan fizikleri Dewisson we Žermer nikel kristalynyň giňişlik gözenegini difraksiýa gözenegi hökmünde ulanyp, elektronlaryň difraksiýasyny öwrendi. Tejribeleriň netijesinde, elektronlaryň akymynda dogrudan-da difraksiýa hadysasynyň bolýandygy anyklanyldy. Tolkun uzunlygy üçin de Broýluň çaklamasy esasynda hasaplanan bahalara golaý baha alyndy.

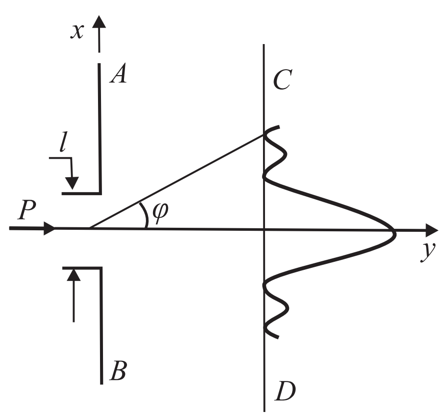
Soňky tejribelerde ýuka alýumin folgada elektronlaryň akymynda difraksiýa hadysasynyň bolýandygy anyklanyldy. Elektron akymynyň döredýän difraksiýa şekiliniň rentgen şöhlesiniň berýän şekiline meňzeşdigi belli edildi. Bu tejribeleriň netijeleri de Broýluň çaklaýşy ýaly, **hereketli elektronlaryň tolkun** häsiýetini ýüze çykarýandygyny subut etdi.

De Broýluň (34.2) formulasy islendik jisimler üçin hem dogrudyr. Ýöne tolkun uzynlygynyň massa ters bagly bolandygy üçin tolkun uzynlygy örän kiçi bolýar. Olaryň tolkun häsiýetlerini duýmak kyn bolýar. Iri bölejikler gözegçi üçin özüniň tebigatynyň diňe bir tarapyny, korpuskylýar häsiýetlerini ýüze çykarýar. Şeýlelikde, täze teoriýa korpuskulýar – tolkun ikileýin teoriýasynyň bardygyny subut etdi we onuň ýüze çykýan çäklerini görkezdi.

34.2. Kesgitsizlikleriň gatnaşygy

Klassyky fizikada material nokadyň hereketiniň deňlemesini ýazyp, şol deňleme bilen makrobölejikleriň wagta baglylykda koordinatalaryny anyk kesgitläp bolýar. Elektronlaryň difraksiýasy boýunça tejribeleriň görkezişi ýaly, elektronyň tolkun häsiýeti hem bardyr. Diýmek, klassyky ugurlar bilen onuň giňişlikdäki ýagdaýyny anyk kesgitlemek mümkin däldir.

l giňligi bolan yşly AB ekrandan elektronlaryň akymy geçende CD ekranda difraksiýanyň şekilleri emele gelýär (*34.1-nji çyzgy*).



34.1-nji çyzgy

Elektron akymynyň intensiwliginiň esasy bölegi merkezi maksimuma düşýär. Şonuň üçin beýleki maksimumlar kiçi bolýar we olary hasaba almasaň-da bolýar. φ burça degişli birinji maksimum

$$l\sin\varphi = \lambda \tag{34.3}$$

şerti kanagatlandyrýar.

Elektronlar yşdan geçende olaryň x okunyň ugrundaky orny yşyň l giňişliginiň takyklygynda kesgitlenýär, ýagny bu ugur boýunça elektronyň orny kesgitlenende ýol bererli baha $\Delta x = l$ bolar.

Şol bir wagtyň özünde elektronlar yşdan geçende difraksiýa sebäpli, olaryň tizliginiň ugry, diýmek, impulsy hem üýtgeýär. Yşdan geçmänkä impulsyň x oka bolan proýeksiýasy nola deň bolar. Yşdan geçenden soň bolsa ol proýeksiýa

$$0 \leq P_x \geq P\sin\varphi \tag{34.4}$$

çäkde bolýar. Bu ýerde (34.3) deňligi göz öňünde tutup alarys:

$$0 \leq P_x \leq P\frac{\lambda}{l}.$$

Diýmek, elektronyň yşdan geçen pursatyndaky impulsyny kesgitlemegiň ýol bererlik bahasy:

$$\Delta P_x \approx P\frac{\lambda}{l}.$$

Elektronyň impulsyny molkun uzynlyk bilen $\lambda = \dfrac{h}{P}$ gatnaşyk kesgitleýär. Onda $P = \dfrac{h}{\lambda}$ baglanyşygy göz öňunde tutup alarys:

$$\Delta P_x \approx \frac{h}{l}.$$

Öňki belleýşimiz ýaly, $l = \Delta x$ şerti ulansak, alarys:

$$\Delta P_x \approx \frac{h}{\Delta x}.$$

Bu ýerden

$$\Delta x \Delta P_x \approx h. \tag{34.5}$$

y we z oklar üçin

$$\Delta y \Delta P_y \approx h \qquad \Delta z \Delta P_z \approx h \tag{34.5a}$$

aňlatmalary ýazmak bolar.

(34.5) we (34.5a) gatnaşyklar **kesgitsizlikleriň gatnaşygydyr** (Geýzenberg, 1927 ý.).

Olaryň manysy: **makrobölejiklere mahsus bolan fiziki ululyklary mikrobölejikler üçin käbir golaýlaşma bilen kesgitlemek mümkin. Koordinatany kesgitlemegiň takyklygy näçe ýokary bolsa (Δx näçe kiçi bolsa), impulsy kesgitlemegiň takyklygy şonça azdyr (ΔP uludyr).**

Bu adamyň mikrobölejikleriň dünýäsini çuňňur öwrenmäge ukyby ýok diýildigi däldir. Ol mikrobölejikleriň korpuskulýar-tolkun ikileýinligi bilen baglanyşykly tebigaty bardyr diýip belleýär we mikrobölejiklere klassyky düşünjeleri ulanmagyň çäklerini görkezýär.

Atomdaky elektronyň hereketine seredeliň. Atomyň radiusynyň 10^{-10} m töweregidigini göz öňünde tutsak, koordinata kesgitlenendäki ýalňyşlygy $x \cong 10^{-10}$ m diýip almaly. Bu şert üçin elektronyň impulsy $\Delta P \cong \frac{h}{\Delta x}$, tizligi $\Delta \upsilon \cong \frac{h}{\Delta x m}$ gatnaşyklar bilen kesgitlener. Hasaplamalar $\Delta \upsilon \cong 7 \cdot 10^6$ m/s bahany berýär. Klassyky usulda hasaplananda elektronyň tizligi üçin hem, takmynan şu baha alynýar. Diýmek, atomdaky elektronlaryň hereketi üçin klassyky düşünjeleri ulanmak bolmaz. Onda elektronyň atomdaky hereketi üçin kesgitli tizlik we kesgitli radiusly orbita düşünjelerini ulanyp bolmaz.

Başga-da käbir şertlerde, meselem, termoelektron emmissiýasynda, fotoeffektde elektronlaryň hereketi öwrenilende tizligiň nätakyklygy 1% töweregi bolýar we traýektoriýa düşünjesini elektrona ulanyp bolar.

34.3. Tolkun funksiýasy. Şredingeriň deňlemesi

Boruň modelinde elektronlara atomda material nokatlar ýaly seredilýär we olar kesgitli orbita boýunça hereket edýär diýip hasaplanýar. Durnukly orbitalaryň bolmagyny, klassyky mehanika düşündirip bilmeýär. Ylmyň soňky ösüşlerinde atomlarda elektronyň kesgitli energetiki derejeleriniň bolmagy elektronyň tolkun häsiýetleriniň esasynda düşündirildi.

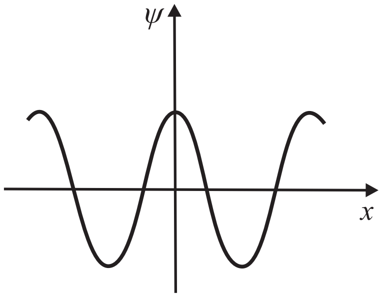
Klassyky fizikada material nokat üçin wagt pursatlaryndaky koordinatalar we impulslar belli bolanda kanunlar boýunça onuň wagta bagly ýagdaýlaryny doly kesgitläp bolar. Kwant mehanikasynda bolsa beýle usuly ulanmak mümkin däl. Sebäbi mikrobölejige şol bir wagtda degişli bolan koordinatalar we olara degişli tizlikler belli bolmaýarlar. Elektronyň berlen wagt pursatyndaky ýagdaýyny bilip onuň gelejekdäki özüni alyp baryşyny takyk bilip bolmaýar. Sebäbi onuň gelejekdäki özüni alyp barşy dürli bolup biler.

Kwant mehanikasynda haýsydyr bir ýagdaýyň bolmagynyň ähtimallygy kesgitlenýär. Käbir şertler üçin ähtimallyk bire deň bolup bilýär. Bu bolsa şeýle ýagdaýyň anyk boljakdygyny aňladýar.

Tolkun we korpuskulýar häsiýetleri bolan mikrobölejikleriň hallarynyň nähili usulda ýazylýandygyna seredeliň. Ses tolkuny bolsun, elektromagnit tolkuny bolsun ýa-da de Broýluň tolkuny ýaly seredelýän elektronlaryň hereketi bolsun, olaryň ýaýraýşy käbir tolkun funksiýasy bilen, ýagny yrgyldaýan fiziki ulularyň bahalary bilen häsiýetlendirilýär.

Ol tolkun funksiýasy ψ bilen bellenýär we bir ölçegli monohromatik tolkun üçin

$$\psi = A \sin\left(\frac{2\pi t}{T} + \varphi\right) = A \sin 2\pi\left(\frac{\upsilon t - x}{\lambda}\right) \qquad (34.6)$$



34.2-nji çyzgy

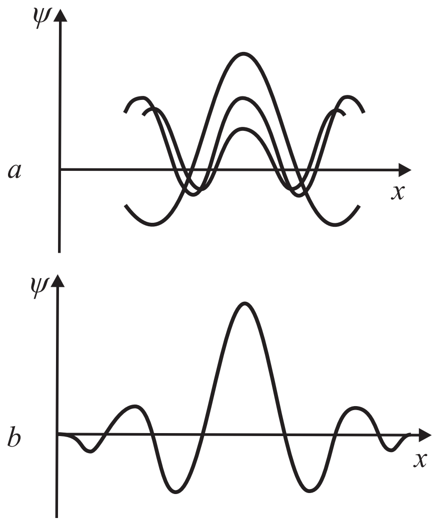
görnüşde ýazylýar. Bu funksiýa koordinatanyň we wagtyň funksiýasydyr. Ol wagtyň şol bir pursatynda giňişligiň dürli nokatlarynda dürli baha eýedir we ýene-de giňişligiň şol bir nokadynda wagtyň dürli pursatlary üçin dürli bahalara eýe bolup bilýär.

Şeýle funksiýanyň grafigi 34.2-nji çyzgyda görkezilendir.

Görnüşi ýaly, tolkun saga we çepe çäksiz ýaýrap bilýär. Diýmek, koordinata kesgitlenendäki ýolbererlik $\Delta x = \infty$. Monohromatik tolkun üçin tolkun uzynlygy λ hemişelikdir. Onda $P = \dfrac{h}{\lambda}$ bolany üçin impuls hem hemişelikdir. Onda ýolbererlik impuls $\Delta P = 0$. Atomdaky elektronlaryň hereketine tolkun ýaly seredinimizde başgaça ýagdaý emele gelýär.

Ol tolkun atomyň çäginden çykmaly däl. Diýmek, koordinata islendik bahany kabul edip bilmeýär. Ol atomyň içinde x-den $x + \Delta x$ aralykdaky bahalary kabul edip bilýär.

Tolkunyň käbir kesgitli aralykda bolmagy üçin ol tolkun **paketi** görnüşinde bolmaly. Tolkun paketi diýilýän bolsa, dürli amplitudaly tolkun uzynlyklary λ-dan $(\lambda + \Delta\lambda)$-e çenli bolan birnäçe monohromatik tolkunlaryň toplumydyr.



34.3-nji çyzgy

34.3-nji çyzgyda tolkun paketi we tolkunlar goşulanda alynýan netije görkezilýär.

Tolkun paketi üçin x koordinatanyň bahasy x bilen $(x + \Delta x)$-yň aralygyndadyr. Tolkun uzynlygynyň bahasyny $\Delta\lambda$ nätakyklyk bilen kesgitläp bilýäris. Onda impuls hem P bilen $(P + \Delta P)$-niň aralygynda ýerleşendir, ΔP nätakyklyk

$$\Delta P = \Delta\left(\frac{h}{\lambda}\right) = \frac{h}{\lambda^2}|\Delta\lambda|$$

deňlik bilen kesgitlener.

Elektromagnit meýdany öwrenilende elektrik energiýasynyň dykyzlygy üçin $w_e = \dfrac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2}$ we magnit meýdanynyň dykyzlygy üçin $w_m = \dfrac{B^2}{2\mu_0\mu}$ formulalaryň ulanylýandygyna seredipdik. Meýdanlar üçin energiýanyň dykyzlyklary, degişlilikde elektrik meýdanynyň güýjenmesiniň kwadratyna we magnit meýdanynyň induksiýasynyň kwadratyna göni baglydyr. Şulara meňzeş ýazylan tolkun funksiýasynyň modulynyň kwadraty $|\psi|^2$ elektronyň birlik göwrümde bolmagynyň ähtimallygyna deň bolýar. Öň belleýşimiz ýaly, kwant mehanikasy mikrobölejigiň boljak orny barada kesgitli bahalary bermeýär. Ol diňe mikrobölejigiň bolmagynyň ähtimallygyny kesgitleýär.

Diýmek, $|\psi|^2 dV$ ululyk mikrobölejigiň dV göwrümde bolmagynyň ähtimallygyny görkezýär. Bu ululygyň käbir giňişlik boýunça jemlenen bahasy bolsa, mikrobölejikleriň şol giňişlikde bolmagynyň ähtimallygyny görkezýär.

$$\int |\psi|^2 dV = 1$$

deňlige kadalaşdyryş şerti diýilýär. Bu V göwrümli giňişlikde mikrobölejik bar diýmekdir.

Klassyky fizikadan tapawutlylykda kwant mehanikasy x, y, z, P_x, P_y, P_z dinamiki görkezijileriň t wagta baglylygynyň funksiýasyny kesgitlemän, bölejigiň ýagdaýyny kesgitleýän tolkun ψ funksiýasyny tapýar.

Tolkun funksiýasynyň deňlemesi 1926-njy ýylda Şredinger tarapyndan

$$\Delta\psi + \frac{8\pi^2 m}{h^2}(E - U)\psi = 0 \tag{34.7}$$

görnuşde teklip edildi. Bu ýerde

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} -$$

– Laplasyň operatorynyň gysgaldylan ýazgysy, m – bölejigiň massasy; E – onuň doly energiýasy; U – potensial energiýa.

Diňe (34.7) deňleme ψ funksiýany kesgitlemek üçin ýeterlik däldir. Bu funksiýanyň fiziki manysyndan gelip çykýan birnäçe şertler hem ýerine ýetmelidir. Tolkun ψ funksiýasynyň göwrümiň berlen elementinde mikrobölejigiň bolmagynyň ähtimallygyny häsiýetlendirýänligi sebäpli, onuň bahalary gutarnykly, anyk we üznüksiz bolmalydyr. Sebäbi ähtimallyk birden uly bolmaýar. Ol anyk we böküşsiz üýtgeýän bolmaly.

Şredingeriň deňlemesinden we oňa goýlan şertlerden energiýanyň kwantlaýyn üýtgejekdigi gelip çykýar. Boruň teoriýasynda energiýanyň kwantlaşmasy emeli usulda postulatlar bilen kesgitlenen bolsa, kwant mehanikasynda bu kwantlaşma teoretiki düşünjeleriň tebigy ösüşi görnüşde alynýar.

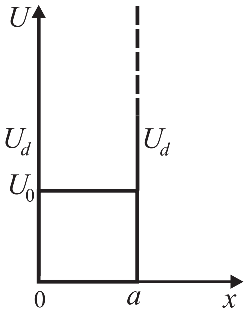
34.4. Potensial çukur. Mikrobölejikleriň potensial çukurda bolmagy

Metallardaky geçiriji elektronlaryň ýagdaýyna seredeliň. Elektrik meýdanynyň ýok mahaly elektrona täsir edýän güýçleriň jemi nola deň. Onuň U_0 potensial energiýasy bolsa hemişelikdir.

Metallyň daşyna çykmak üçin elektron A çykyş işine deň iş etmeli. Metaldan çykýan elektronyň U_d energiýasy U_0 energiýadan uludyr. Bu energiýalaryň tapawudy bolsa çykyş işine deňdir:

$$A = U_d - U_0.$$

Otag temperaturasynda çykyş işi elektronyň kinetik energiýasyndan has köpdür. Şonuň üçin bu şertde elektronlar metalyň daşyna çykyp bilmeýärler. Aýdylanlary 34.4-nji çyzgydaky ýaly görkezmek bolar.



34.4-nji çyzgy

Koordinatanyň $0 < x < a$ aralygynda elektronyň potensial energiýasy U_0 deňdir. $x < 0$ we $x > a$ bahalar üçin elektronyň energiýasy U_d deňdir. $U_d >> U_0$ bolany üçin elektron tükeniksiz, beýik diwarly potensial çukurda ýerleşýär diýip hasap etmek bolar.

Elektronyň x ugurdaky hereketini hasaba alyp, potensial çukurdaky elektron üçin Şredingeriň deňlemesini ýazalyň:

$$\Delta\psi + \frac{8\pi^2 m}{h^2}E\psi = 0. \tag{34.8}$$

Bu deňlemäniň çözüwi

$$\psi = (A + B)\cos kx + i(A - B)\sin kx \tag{34.9}$$

funksiýa görnüşde bolýar. Bu ýerde A we B hemişelikler. k ululyk

$$k = \sqrt{\frac{8\pi^2 mE}{h^2}} \tag{34.10}$$

deňlik bilen kesgitlenýär.

Elektronyň energiýasynyň metaldan daşyna çykmaga ýeterlik däldigi sebäpli, $x = 0$ we $x = a$ şertlerde tolkun funksiýasy nola öwrülmeli. Onda $x = 0$, $\psi = 0$ şert üçin (34.9) funksiýanyň birinji we ikinji agzalary nola deň bolýar:

$$A + B = 0 \qquad \text{ýa-da} \qquad A = -B.$$

Bu şert üçin

$$\psi = 2iA\sin kx.$$

$x = a$, $\psi = 0$ şert üçin bolsa

$$ka = n\pi.$$

Bu ýerde n – islendik bütin san.

Bu ýerden

$$k = n\frac{\pi}{a}.$$

k-nyň bu bahasyny (34.10) deňlige goýup alarys:

$$E = n^2\frac{h^2}{8ma^2}. \tag{34.11}$$

Bu deňlemeden görnüşi ýaly, metaldaky geçiriji elektron energiýanyň islendik bahasyny alyp bilmeýär. Onuň üçin doly energiýanyň bahalaryny kwantlaşan diýip hasaplamaly. Elektron diňe n^2 kratny bahalary alyp bilýär. (34.11) formulada n-iň ýerine bütin sanlary goýup, energiýanyň derejelerini kesgitläp bolýar.

Iki goňşy derejeleriň energiýalarynyň tapawudynyň hasaplanyşyny:

$$\Delta E = E_{n+1} - E_n = (n+1)^2 \frac{h^2}{8ma^2} - n^2 \frac{h^2}{8ma^2} = (2n+1)\frac{h^2}{8ma^2}$$

aňlatma bilen ýazmak bolar.

Görnüşi ýaly, n kwant sanynyň beýgelmegi bilen energetiki derejeleriň arasy hem ulalýar. Bu aralyk potensial çukuryň a giňliginiň kwadratyna ters proporsional. Şu esasda ΔE tapawudy ölçegleri $a = 1$ *sm* metal nusga üçin hasaplap, $\Delta E = (2n+1)6 \cdot 10^{-34} J$ bahany almak bolýar.

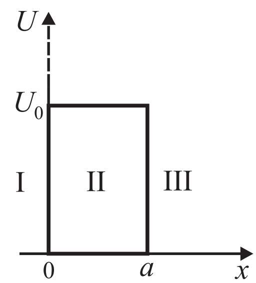
Klassyky elektron teoriýasy boýunça otag temperaturasynda elektronyň orta kinetik energiýasy

$$W = \frac{3}{2}kT \approx 7 \cdot 10^{-21} J.$$

Görnüşi ýaly, elektronyň orta kinetik energiýasy bilen deňeşdirilende energetiki derejeleriň arasyndaky energiýa örän kiçi. Olaryň gatnaşygy, takmynan 10^{13}-e deň. Bu ýerden metallardaky geçiriji elektronlaryň energiýasy üznüksiz üýtgeýär diýen netijä gelmek bolar.

Potensial çukuryň inini atomyň ölçegleri ($10^{-10} m$) ýaly hasaplap, ΔE üçin $\Delta E = (2n+1) \cdot 6 \cdot 10^{-18} J$ baha almak bolýar. Bu ýerde energetiki derejeleriň bahasy geçiriji elektronyň metaldaky energiýasyndan müň esse köp bolýar, ýagny kwantlaşma güýçli bolýar.

Ýolunda potensial päsgelçilik bolanda klassyky we kwant-mehaniki bölejikleriň özlerini alyp baryşlary has-da tapawutly bolar. Ýolunda potensial bökdenç bolan bölejik x ugry boýunça hereket edýän bolsun (*34.5-nji çyzgy*).



34.5-nji çyzgy

$x < 0$ we $x > a$ koordinatalar üçin elektronyň potensial energiýasy nola deňdir. $a > x > 0$ şert üçin potensial energiýa noldan tapawutlydyr. Şeýle hereketde x ugur boýunça hereket edýän bölejigiň öňünde U_0 belentlikli päsgelçilik bar diýip göz öňüne getirmeli. Klassyky teoriýa laýyklykda elektron bu päsgelçilik kinetik energiýasy bökdenjiň U_0 potensial energiýasyndan uly bolanda geçip biler. Başgaça aýdanymyzda bölejik I we III giňişliklerde bolup biler. II giňişlikde bölejik bolup bilmez.

Kwant-mehaniki bölejigiň özüni alyp barşyna seredeliň. Berlen energiýa üçin we $0 < x < a$ koordinata üçin Şredingeriň deňlemesi çözülende ψ funksiýanyň bahasy noldan tapawutly bolýar. Bu ýagdaý bolsa bölejigiň päsgelçiliginiň içinde bolmagynyň mümkindigini görkezýär. Diýmek, kwant-mehaniki bölejigiň potensial päsgelçilikden geçmegi mümkin. Bu hadysa **tunnel geçilmesi** diýilýär.

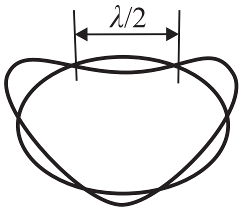
XXXV BAP. ATOMLARYŇ WE MOLEKULALARYŇ HÄZIRKI ZAMAN FIZIKASYNDAN DÜŞÜNJELER

35.1. Elektronlaryň tolkun häsiýetleri we Boruň postulatlary

Durnukly haldaky elektron üçin potensial energiýany

$$U = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Ze^2}{r}$$

görnüşde aňladyp, atomdaky elektron üçin Şredingeriň deňlemesiniň üsti bilen tolkun funksiýasyny we energiýanyň bahalaryny hasaplap bolýar.



35.1-nji çyzgy

Bu aňlatmany Şredingeriň deňlemesine goýup, differensial deňleme alynýar. Çylşyrymlydygy sebäpli, deňlemäniň çözüwine seretmeýäris. Derňewi sadalaşdyrmak üçin elektron tolkuny üç ölçegli giňişlikde däl-de bir ugurda, ýagny ýapyk orbitanyň ugry boýunça bolup geçýär diýeliň (*35.1-nji çyzgy*).

Eger yrgyldaýan kiriş (tar) orbita meňzedilip, halka şekiline getirilse we uçlary bir nokatda birikdirilse, onuň uzynlygy boýunça tolkun uzynlyklarynyň bütin sany ýerleşer. Şuňa meňzeş, orbitada Broýluň tolkunynyň jübüt sany ýerleşýär. Onda

$$2\pi r = n\lambda.$$

$\lambda = \frac{h}{m\upsilon}$ bolany üçin

$$2\pi r = n\frac{h}{m\upsilon}.$$

Bu ýerden

$$m\upsilon r = n\frac{h}{2\pi}. \tag{35.1}$$

Biz orbitanyň kwantlaşandygyny görkezýän aňlatmany aldyk. Bu bolsa Boruň birinji postulaty bilen manydaşdyr. Şol bir wagtda soňky aňlatma kwantlaşmanyň şertini hem görkezýär.

Atomda elektrona täsir edýän merkeze ymtylýan güýji we ýadronyň elektrony dartyş güýjüni deňleşdirýän (33.1) deňleme bilen (35.1) deňlemäni bilelikde çözüp, orbitanyň radiusy, elektronyň orbitadaky tizligi we elektronyň energiýasynyň diskret bahalary üçin deňlikleri almak bolýar. Elektronyň diskret energiýalary üçin

$$E = \frac{1}{8\varepsilon_0}\frac{Ze^4 m}{h^2}\frac{1}{n^2}.$$

Şeýlelikde Boruň postulatlarynda emeli usulda alnan düzgünleriň elektronyň tolkun häsiýetlerinden gelip çykýan netijedigini görmek bolýar.

35.2. Kwant sanlary

Atomyň modeli öwrenilende elektronyň hereketini bir ölçegli tolkun bilen çalşyryp öwrenmek arkaly, elektronyň atomdaky halyny bir kwant sanyň n kesgitleýändigine seretdik. Eger bu ýönekeýleşdirmäni ulanmasak, onda elektronyň atomdaky ýagdaýyny kesgitlemek üçin azyndan üç kwant san gerek bolýar. Häzirki atom fizikasynda elektronyň atomdaky ýagdaýy dört kwant san bilen häsiýetlendirilýär.

Mälim bolşy ýaly, orbitaly modelde elektronyň atomdaky energiýasy n kwant sany bilen kesgitlenýär. Oňa **baş kwant san** diýilýär. Bu san birden başlanýar we bütin san bahalara eýe bolup bilýär ($n = 1, 2, 3, ...$).

Elektron r radiusly orbitada υ tizlik bilen hereket edende

$$\vec{P}_m = m[\vec{\upsilon}\,\vec{r}\,]$$

formula bilen kesgitlenýän impulsyň momenti ýüze çykýar.

Kwant mehanikasynyň görkezişi ýaly, elektronyň impulsynyň momenti hem energiýa ýaly käbir bahalara eýe bolup bilýär, ýagny impulsyň momenti bütin sana kratny bolan diskret bahalara eýe bolup bilýär. Kwant mehanikasynda impulsyň momenti üçin

$$P_m = \frac{h}{2\pi}\sqrt{l(l+1)}. \tag{35.2}$$

Bu ýerde l noldan $(n - 1)$-e çenli bahalary kabul edip bilýän kwant san. Oňa **orbital kwant san** diýilýär. Meselem, $n = 3$ bolanda orbital kwant san 0, 1, 2 sanlaryň birine eýe bolup bilýär. Olara degişli impuls momenti bolsa, degişlilikde 0, $\frac{h}{2\pi}\sqrt{2}$, $\frac{h}{2\pi}\sqrt{6}$ bahalary alýar.

Elektronyň ýagdaýyny häsiýetlendirmek üçin baş kwant sany san bilen, orbital kwant sany bolsa harp bilen ýazmak kabul edilendir. $l = 0, 1, 2, 3, 4$ bolanda bu ýagdaýlar degişlilikde s, p, d, f harplar bilen bellenýär. Diýmek, $n = 2$, $l = 1$ ýagdaý $2p$ görnüşde ýazylar.

Atomda elektronyň energiýasy diňe baş kwant sana bagly bolman, eýsem orbital kwant sana hem baglydyr. Sebäbi şol bir atomdaky elektronlaryň özara täsiri olaryň impulslarynyň momentlerine baglydyr.

Elektronyň atomdaky ýagdaýyny doly ýazmak üçin diňe n we l ýeterlik däldir. Sebäbi elektronyň mehaniki orbital momentinden başga-da, **orbital magnit momenti** bardyr. Şonuň üçin atom magnit meýdanyna ýerleşdirilende onuň orbitasy giňişlikde islendik tekizlikde ýerleşip bilmeýär. Orbital magnit momentiniň impulsynyň daşky magnit meýdanynyň ugruna proýeksiýasy kesgitli kwant bahalary alyp bilýär:

$$L_z = m\frac{h}{2\pi}. \tag{35.3}$$

L_z-iň bahasyny **magnit kwant sany** bolan m kesgitleýär. Bu kwant san $-l$-den $+l$-e çenli bütin san bahalary alýar. Meselem, $l = 1$ bolanda $m = -1, 0, 1$ bahalaryň birine eýe bolýar.

Atomdaky elektrony häsiýetlendirýän dördünji kwant sanyna s **spin kwant sany** diýilýär. Spin atomdaky we erkin elektrona degişli bolan wajyp häsiýetdir. Elektron impulsyň orbital momentinden başga-da **impulsyň hususy momentine** (L_s) hem eýedir. Oňa impulsyň spin momenti hem diýilýär. Onuň bilen baglanyşykly spin kwant sany girizilýär. Spin elektronyň hususy magnit momentine P_{m_s} degişlidir. Hususy magnit momenti hem, impulsyň orbital momenti ýaly, daşky magnit meýdanynda käbir kesgitli ugurlar boýunça gönügip bilýär.

Impulsyň spin momentiniň daşky magnit meýdanynyň ugruna bolan proýeksiýasynyň kwantlaşan bahalary

$$L_{sz} = s\frac{h}{2\pi} \tag{35.4}$$

formula bilen kesgitlenýär. Bu ýerde s – spin kwant sany. Ol diňe $+\frac{1}{2}$ we $-\frac{1}{2}$ bahalara eýe bolup bilýär.

Diýmek, elektronyň atomdaky ýagdaýy dört kwant san bilen kesgitlenýär. Baş kwant san n bolan ýagdaýa ňäçe elektronyň degişlidigini hasaplalyň. l kwant sana degişli m magnit kwant sany $(2l + 1)$ bahalara eýe bolup bilýär. l sanyň 0-dan $(n - 1)$-e çenli bütin san bahalaryny hasaba alsak, atomda elektronyň bolup biljek ýagdaýlarynyň sany (spin kwant sany hasaba alynmanda)

$$\sum_{l=0}^{n-1}(2l+1) = \frac{1+[2(n-1)+1]}{2}n = n^2$$

bolar. Spin kwant san hem hasaba alnanda bu san iki esse artýar.

Atomyň spektrleri, elektrik, magnit we beýleki häsiýetleri öwrenilip, tejribede alnan maglumatlar elektronyň kwant häsiýetleriniň teoretiki öwrenilip alnan maglumatlary bilen ýokary takyklykda gabat gelýär.

35.3. Pauliniň prinsipleri. Köp elektronly atomlaryň gurluşy we periodiki kanun

Köp elektronly atomda her elektronyň ýerleşip bilýän ýagdaýy bardyr. Ol ýagdaý dört kwant san (n, l, m we s) bilen kesgitlenilýär. Elektronlaryň bu sanlara eýe bolşuny we atomda ýerleşişini **Pauliniň iki prinsipi** kesgitleýär.

Birinji prinsip: beýleki şertler deň bolanda, elektron energiýasynyň iň kiçi bolýan ýagdaýyny eýeleýär.

Ikinji prinsip: atomdaky elektronlaryň her biri üçin dört kwant sanlarynyň bahalarynyň aýratyň toplumy bardyr.

Diýmek, atomda şol bir degişli bahalary bolan dört kwant sany bilen häsiýetlendirilýän diňe bir elektron bolup biler.

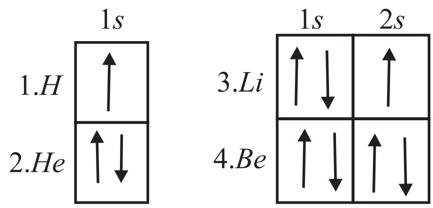
Bu prinsipleriň esasynda, atomda elektronlaryň energiýasy boýunça paýlanyşyna we elementleriň periodiki sistemada ýerleşişine seredeliň.

Periodiki sistemada birinji element-wodorod. Onuň bir elektrony bar. Energiýanyň iň kiçi bolmalydygy baradaky prinsip boýunça $n = 1$ bolar. Orbital kwant sany bolan l-iň 0-dan $(n - 1)$-e çenli baha eýe bolup bilýändigi üçin $l = 0$ bolar. Magnit kwant san bolan m diňe bir baha, ýagny $m = 0$ baha eýe bolup bilýär. Spiň kwant sany s-iň bahasy $+\frac{1}{2}$ ýa-da $-\frac{1}{2}$ bolar. Kabul edilişi boýunça wodorodyň atomyndan bir elektronyň ýagdaýy 1s görnüşde bellenýär.

Indiki element bolan geliýde iki elektron bar. Olar 1s ýagdaýda ýerleşýärler. Ýöne, Pauliniň prinsipine görä, elektronlaryň spin kwant sanlary $+\frac{1}{2}$ we $-\frac{1}{2}$ bolar.

Eger položitel spini ýokaryk ugrukdyrylan we otrisatel spini aşak ugrukdyrylan peýkamlar bilen şekillendirsek, wodorodyň H we geliýniň He atomlaryny 35.2-nji çyzgydaky ýaly görkezmek bolar.

Litiýniň atomynyň üç elektrony bardyr. Olaryň ikisi 1s ýagdaýda (dürli spinli) bolýar. Pauliniň prinsipine görä, üçünji elektron bu ýagdaýda bolup bilmeýär. Ol 2s ýagdaýa düşýär. Berilliýniň atomynda 4 elektron bar. Ikisi garşylykly spinler bilen 1s ýagdaýynda, beýleki ikisi bolsa, garşylykly spinler bilen 2s ýagdaýda bolýar (*35.2-nji çyzgy*).

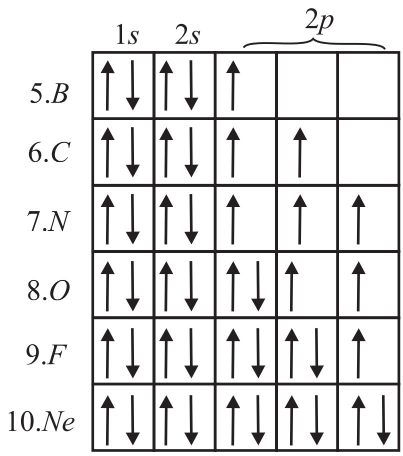


35.2-nji çyzgy

Boruň atomynda 5 elektron bar. Olaryň dördüsi berilliniň atomynyň elektronlary ýaly, 1s we 2s ýagdaýlary eýeleýär. Pauliniň prinsipinä görä, bäşinji elektron bu ýagdaýlara ýerleşip bilmeýär. Ýöne baş kwant san $n = 2$ bolanda l noldan başga-da, $l = 1$ baha eýe bolup bilýär. Oňa bolsa $m = -1, 0, +1$ bahalar degişlidir. Diýmek, $n = 2$, $l = 1$ ýagdaýa, ýagny 2p ýagdaýa üç öýjük degişli bolýar we olaryň hersinde spinleri garşylykly 2 elektron ýerleşip bilýär.

Periodiki sistemanyň ikinji periodyndaky elementleriň atomlarynyň gurluşy 35.3-nji çyzgyda görkezilendir.

Çyzgydan görnüşi ýaly, p – ýagdaýyň elektronlar bilen doluşynyň öz düzgüni bar. Her öýjikde m kwant sanlary dürli bolan, spinleri ugurdaş bolan bir elektrondan ýerleşýär (B, C, N). Periodiki sistemadaky soňky (O, F, Ne) elementleriň atomlarynda öýjükdäki öňki elektronlaryň ýanyna spini garşylykly bolan bir elektrondan goşulyp gidýär.



35.3-nji çyzgy

Baş kwant sanyň dürli bahalary bilen emele gelýän gatlaklar aşakdaky ýaly atlandyrylýar.

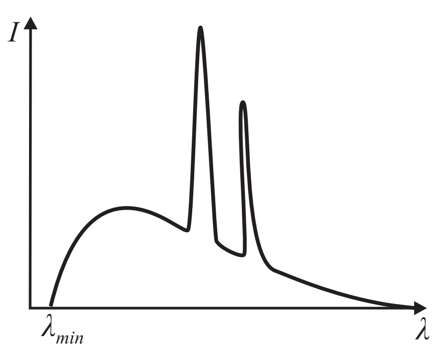
$n = 1$ …… K – gatlak
$n = 2$ …… L – gatlak
$n = 3$ …… M – gatlak
$n = 4$ …… N – gatlak
$n = 5$ …… O – gatlak
$n = 6$ …… P – gatlak
$n = 7$ …… Q – gatlak.

Periodiki sistemanyň soňraky elementleriniň atomlarynyň elektronlar bilen doldurylyşy hem ýokarky tertipde bolýar.

Atomlar özara täsirleşende içki doly gatlaklardaky elektronlaryň täsiri az bolýar. Atomlaryň himiki we fiziki häsiýetlerini, esasan, daşky, ýagny ýadrodan has uzakda ýerleşen elektronlar kesgitleýär. Elektron gatlaklaryndaky ähli ýerler elektronlar bilen doldurylan atomlary bolan elementler (He, Ne, Ar we ş.m.) örän durnukly bolýar we himiki reaksiýalara gatnaşyp bilmeýär. Mendeleýewiň periodiki sistemasynda elementleriň ýerleşişi hem-de dürli atomlarda gatlaklar boýunça elektronlaryň ýerleşişi deňeşdirilende göni baglanyşyk aýdyň görünýär. Daşky gatlaklaryň elektronlar bilen doldurylyşynyň meňzeşligi elementleriň fiziki we himiki häsiýetleriniň meňzeşligine getirýär.

35.4. Rentgen spektrleri

Rentgen şöhlesi 1895-nji ýylda nemes fizigi B.Rentgen tarapyndan açyldy. Bu şöhle ýokary tizlikli elektronlar aýnanyň ýa-da metalyň üstüne gönükdirilende ýüze çykýar. Rentgen şöhlesi tebigaty boýunça tolkun uzynlygy $10^{-12} - 10^{-8} m$ çäklerde bolan elektromagnit şöhlesidir. Rentgen şöhlesiniň giň ýaýran çeşmesi rentgen trubkasydyr. Bu trubkada elektrik meýdany tarapyndan tizlendirilen elektronlar agyr metaldan (meselem, Pt ýa-da W) ýasalan anoda gönükdirilýär. Elektronlaryň anoda urgusy netijesinde rentgen şöhlesi şöhlelendirilýär. Atomyň düzüminde elektronlaryň gatlaklar boýunça paýlanyşyny öwrenmekde rentgen şöhlesiniň örän uly ähmiýeti boldy. Rentgen şöhlesiniň spektriniň çylşyrymly gurluşy bardyr (*35.4-nji çyzgy*) we ol elektronyň energiýasyna, anodyň materialyna baglydyr. I – şöhläniň intensiwligi.



35.4-nji çyzgy

Rentgen spektri bir tarapyndan tolkun uzynlygy arkaly çäklenen bütewi spektr bilen çyzykly spektriň birleşdirilen görnüşidir. λ_{min} tolkun uzynlygyna **bütewi spektriň çägi** diýilýär.

Barlaglara görä, bütewi spektriň häsiýeti anodyň materialyna bagly däldir. Ol diňe anoda gönükdirilen elektronlaryň energiýasyna baglydyr. Bütewi spektr ýokary tizlikli elektronlaryň metallyň atomlary bilen täsirlenip tormozlanmagy (saklanmagy) netijesinde elektronlar tarapyndan goýberilýär. Şonuň üçin bütewi rentgen spektrine **tormozlanma spektri** diýilýär. Bu netije klassyky elektrodinamikanyň şöhlelenme teoriýasynyň netijeleri bilen gabat gelýär.

Şöhlelenmäniň iň kiçi λ_{min} çäginiň bolmagyny klassyky teoriýada düşündirip bolmaýar. Tejribelere görä, elektronlaryň kinetiki energiýasy uly boldugyça λ_{min} kiçelýär. Bu ýagdaý we çägiň bolmagy kwant teoriýasy tarapyndan düşündirilýär.

Mälim bolşy ýaly, kwantyň iň uly E_{max} energiýasynyň bolmagy üçin tormozlanan (saklanan) elektronyň ähli energiýasy kwantyň energiýasyna öwrülmeli, ýagny

$$E_{max} = h\nu_{max} = eU. \tag{35.5}$$

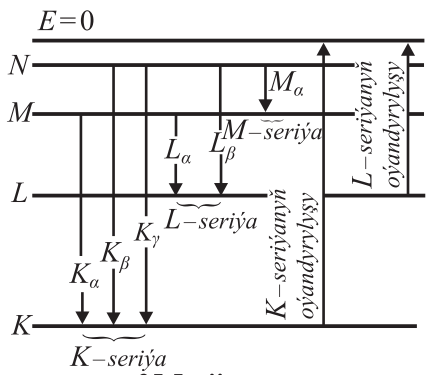
Bu ýerde U – elektrona E_{max} energiýa beren potensiallaryň tapawudy, ν_{max} – bütewi spektriň çägine degişli ýygylyk. Bu ýerden tolkun uzynlygynyň çägi

$$\lambda_{min} = \frac{c}{\nu_{max}} = \frac{ch}{eU} = \frac{ch}{E_{max}}. \tag{35.6}$$

Bu baglanyşygy tejribe doly tassyklaýar. (35.6) formulany ulanyp, Plankyň h hemişeligi kesgitlenende iň takyk bahalaryň biri alynýar.

Elektronlaryň energiýasynyň köpelip başlamagy bilen ol energiýa metal anodyň atomlaryndan elektronlary goparmaga ýeterlik bolanda bütewi spektrden başga çyzykly spektr ýüze çykýar. Oňa **häsiýetlendiriji rentgen spektri** diýilýär. Ol anodyň materialyna bagly üýtgeýär.

Häsiýetlendiriji rentgen spektrleri (gelejekde-rentgen spektrleri) optiki spektrler bilen deňeşdirilende ýönekeýdir. Olar K, L, M, N we O harplar bilen bellenýän birnäçe seriýadan ybarat bolýar. Her seriýada birnäçe çyzyk bolýar we olar ýygylygyň artyş tertibinde α, β, γ… (meselem, K_α, K_β, K_γ, ..., L_α, L_β, L_γ ... we ş.m.) bellenýär. Dürli elementleriň spektrlerinde hem meňzeşlik bardyr. Elementiň atom nomeriniň artmagy bilen rentgen spektri tutuşlugyna gyşga tolkunly bölege tarap süýşýär. Umumy görnüşi bolsa üýtgemän galýar. Beýle netijäniň alynmagynyň sebäbi, rentgen spektrleri atomyň içki bölegindäki elektronlaryň geçişleriniň netijesinde ýüze çykýanlygy bilen düşündirilýär. Atomlaryň içki bölegindäki elektronlaryň gurluşy bolsa dürli elementler üçin meňzeşdir.



35.5-nji çyzgy

Rentgen spektriniň ýüze çykyşy 35.5-nji çyzgyda görkezilendir. Içki elektronlaryň biriniň oýandyrylmagy bilen atom oýandyrylýar. Mysal üçin, içki K gatlagyň elektronlarynyň biri uzaklaşdyrylan bolsa, onda boşan ýere daşky gatlaklaryň (L, M, N we ş.m.) biriniň bir elektrony geçip bilýär. Bu şertde K serýa ýüze çykýar. Beýleki seriýalar hem şuňa meňzeş ýüze çykýar. K seriýa ýüze çykanda hökman beýleki seriýalar hem ýüze çykýar. Sebäbi K gatlaga geçen elektronyň boşadan ýerine ýokarky gatlaklardan elektronlar geçýär.

Iňlis fizigi G.Mozli 1913-nji ýylda rentgen spektrleri üçin

$$\nu = R(Z-\sigma)^2\left(\frac{1}{m^2}-\frac{1}{n^2}\right) \tag{35.7}$$

görnüşdäki gatnaşygy aldy. Oňa **Mozliniň kanuny** diýilýär. Bu ýerde z – elementiň atom nomeri, ν – häsiýetlendiriji rentgen spektrine degişli çyzygyň ýygylygy, R – Ridbergiň hemişeligi, σ – ekranlamanyň hemişeligi, m = 1, 2, 3, ... rentgen seriýasyny kesgitleýän san, $n=m+1$ – şol seriýanyň beýleki liniýasyny kesgitleýän san.

Ekranlamanyň hemişeliginiň manysy-käbir çyzyga degişli elektron ýadronyň ähli Ze zarýadyna täsir etmeýär-de, beýleki elektronlaryň ekranlaýjy täsiri bilen gowşan $(Z-\sigma)\,e$ zarýada täsir edýär. Mozliniň kanuny wodorod atomy üçin umumylaşdyrylan Balmeriň formulasyna meňzeşdir. Meselem, K_α cyzyk üçin, σ = 1 bolanda Mozliniň kanuny

$$\nu = R(Z-1)\left(\frac{1}{1^2}-\frac{1}{2^2}\right) \tag{35.8}$$

görnüşde ýazylýar.

Rentgen spektriniň kanunalaýyklyklarynyň öwrenilmegi atomyň gurluşyny anyklaşdyrmaga uly kömek etdi. Mozliniň kanuny rentgen çyzyklarynyň tolkun uzynlyklarynyň maglumatlarynyň esasynda elementiň atom nomerini kesgitlemäge mümkinçilik berýär. Ol elementleri periodiki sistema ýerleşdirmäge uly kömek etdi.

35.5. Molekulalaryň energetiki derejeleri

Molekula maddanyň esasy fiziki we himiki häsiýetlerini özünde jemleýän iň kiçi bölejikdir. Ol meňzeş ýa-da dürli atomlardan himiki baglanyşyklaryň täsiri bilen emele gelýär. Himiki baglanyşyklar atomyň daşky, walent elektronlarynyň özara täsirleriniň netijesinde ýüze çykýar. Atomlaryň arasynda, esasan, iki görnüşli baglanyşyk esasynda molekula döreýär. Olaryň birine iki atomly molekulanyň mysalynda seredeliň. Molekulanyň atomlarynyň ýadrolarynyň arasynda elektronlar iki topara bölünýär. Birinji görnüşde bir ýadronyň töwereginde bolmalysyndan köp elektronlar, beýlekisiniň töwereginde az elektronlar jemlenýär. Netijede, molekula dürli alamatlary bolan, biri-biri bilen dartyşýan iki iondan ybarat ýaly bolýar. Molekuladaky beýle baglanyşyga **ion baglanyşygy** diýilýär. Oňa NaCl, KBr, HCl we ş.m. molekulalar mysal bolup biler.

Baglanyşygyň ikinji görnüşinde elektronlaryň bir bölegi iki ýadronyň hem töwereginde aýlanýar. Beýle baglanyşyga **kowalent baglanyşyk** diýilýär. Bu baglanyşyk spinleri garşylykly bolan walent elektronlary bilen döredilýär. H_2, C_2, CN, CO molekulalar bu baglanyşygyň mysalydyr.

Molekula kwant sistemasydyr. Şonuň üçin ol elektronlaryň molekuladaky hereketini, molekulanyň atomlarynyň yrgyldysyny, molekulanyň aýlanmasyny hasaba alýan Şredingeriň deňlemesi bilen ýazylýar. Bu meseläniň çözülişi örän çylşyrymlydyr.

Molekulanyň energiýasynyň ululygyny, takmynan

$$E \approx E_{el} + E_{yr} + E_{a\acute{y}l} \tag{35.9}$$

görnüşde ýazmak bolýar. Bu ýerde E_{el} – elektronlaryň ýadro görä hereketiniň energiýasy; E_{yr} – ýadrolaryň yrgyldylaryna degişli energiýa; $E_{a\acute{y}l}$ – ýadrolaryň aýlanmasy bilen baglanyşykly energiýa. Bu energiýalaryň gatnaşyklary

$$E_{el} : E_{yr} : E_{a\acute{y}l} = 1 : \sqrt{\frac{m}{M}} : \frac{m}{M}$$

görnüşde bolýar. Bu ýerde m – elektronyň massasy; M – molekuladaky atomlaryň ýadrolarynyň massasynyň tertibine deň san, $\frac{m}{M} \approx 10^{-5} - 10^{-3}$. Bu ýerden $E_{el} >> E_{yr} >> E_{a\acute{y}l}$ boljakdygy görünýär. Bu energiýalaryň bahalarynyň $E_{el} \approx 1 \div 10$ eW, $E_{yr} \approx 10^{-2} \div 10^{-1}$ eW, $E_{a\acute{y}l} \approx 10^{-5} \div 10^{-3}$ eW çäklerde bolýandygy subut edilendir.

Bu energiýalaryň hemmesi kwantlaşýar, ýagny her birine energiýanyň diskret derejeleriniň toplumy degişlidir. Bu derejeleriň arasyndaky uzaklyk $\Delta E_{a\acute{y}l}$ üçin ΔE_{yr}-dan has kiçidir. ΔE_{yr} üçin bolsa ΔE_{el}-den has kiçidir.

Molekulalaryň gurluşy we energetiki derejeleriniň häsiýetleri molekulýar spektrlerde, ýagny molekulanyň energetiki derejeleriniň arasyndaky geçişleriň netijesinde ýüze çykýan şöhlelenme (siňdirme) spektrlerinde ýüze çykýar.

35.6. Mejbury (indusirlenen) şöhlelenme. Lazerler

Atomyň ýa-da beýleki kwant sistemalaryň bir energetiki haldan beýlekä geçmeginiň elektromagnit energiýasynyň $h\nu$ mukdaryny siňdirmesi ýa-da goýbermesi bilen baglanyşyklydygyna seredip geçdik. Şu wagta çenli seredilen şöhlelenme mehanizmlerinde atom pes energetiki derejä daşky täsirsiz, **öz-özünden** geçýär. Bu geçişe **spontan geçiş** hem diýilýär.

A. Eýnşteýn 1917-nji ýylda daşky elektromagnit meýdanynyň täsiri bilen kwant sistemasynyň pes energiýaly hala geçip, kwant energiýasyny goýberip biljekdigini aýtdy. Bu hadysa **mejbury** ýa-da **indusirlenen şöhlelenme** diýilýär. Mejbury şöhlelenmäniň aýratyn taraplary bardyr. Ol şöhle düşýän şöhlä meňzeşdir, ýagny ýygylygy düşýän şöhläniň ýygylygyna deňdir, ýaýraýşynyň we polýarlanyşynyň ugry gabat gelýär. Mejbury şöhlelenme maddanyň göwrüminde kogerentdir.

Bu hadysanyň ýüze çykyşyna seredeliň. Maddanyň atom sistemasy termodinamiki deňagramlyk halda bolsun. Bu ýagdaýda atomlar pes energetiki derejelerde, ýagny esasy hallarda we olara golaý oýandyrylan derejelerde bolýar. Şeýle sistema elektromagnit şöhlesi düşende atom kwant energiýasyny ýuwudyp, ýokary energetiki derejelere geçer ýa-da mejbury şöhlelenme goýberip pes energetiki derejeleriň birine geçer. Termodinamiki deňagramlyk halda pes energetiki derejeleriň köpüsiniň doldurylanlygy sebäpli, düşýän şöhläniň täsiri bilen wagt birliginde köp sanly atomlar ýokarky energetiki derejelere geçer. Daşky elektromagnit meýdanynyň täsiri bilen kwant sistemasynyň bölejikleriniň aşaky we ýokarky derejelere geçmeginiň ähtimallygynyň deňdigi subut edilendir. Emma, şeýle-de bolsa ýokarky şertde aşaky energetiki derejelere geçýän atomlaryň sany ýokarky derejelere geçýän atomlaryň sanyndan az bolýar. Adaty şertlerde maddalaryň düşýän şöhläni siňdirmegi şu aýdylanlar bilen düşündirilýär.

Indi, atomlarynyň köpüsi oýandyrylan halda bolan madda daşky elektromagnit meýdanynyň täsirine seredeliň. Maddanyň bu haly deňagramly däldir, ýagny ýokarky energetiki derejeleriň doldurylyş derejesi aşaky derejelerdäkiden has ýokarydyr. Bu ýagdaýda düşýän şöhläniň täsiri bilen köp sanly elektronlar (wagt birliginde) ýokarky energetiki derejelerden aşaky energetiki derejelere geçýär we mejbury şöhlelenme ýüze çykýar.

Şeýlelikde, dürli ýygylyklary döredip biljek derejeleri bolan oýandyrylan kwant sistemasynyň kömegi bilen gowşak elektromagnit şöhlesini has güýçlendirip bolýar. Alnan ýokary intensiwlikli şöhle kogerent bolýar.

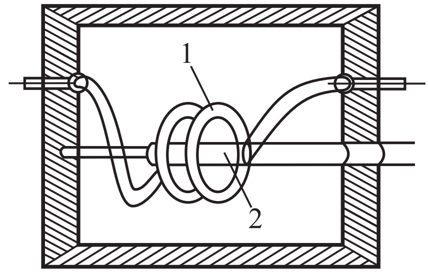
Maddany deňagramsyz ýagdaýa geçirmek üçin optiki, elektrik we beýleki usullar ulanylýar.

1939-njy ýylda B. Fabrikant elektromagnit tolkunynyň energiýasyny bermäge ukyply kwant sistemasyny döretmegiň mümkindigini esaslandyrdy. 1954-nji ýylda N. Basow we A. Prohorow we olar bilen baglanyşyksyz Ç. Tauns mejbury şöhlelenmäniň esasynda işleýän ilkinji kwant enjamlaryny döretdiler.

Mejbury şöhlelenmäni peýdalanmagyň esasynda ýasalan enjamlar güýçlendiriji we öndüriji hökmünde işlemäge ukyplydyr. Degişlilikde, olara **kwant güýçlendirijileri we kwant generatorlary (öndürijileri)** diýilýär. Gysga, görünýän ýagtylygy öndürijilere we güýçlendirijilere **lazerler**, infragyzyl hem-de radiotolkunlary öndürijilere we güýçlendirijilere bolsa **mazerler** diýilýär. Bu atlar enjamlaryň iňlis dilinde ýazylan doly atlarynyň baş harplaryndan emele getirilendir.

Kwant güýçlendirijilerde we generatorlarda iş jisimi hökmünde, esasan gaty we gaz halyndaky maddalar ulanylýar.

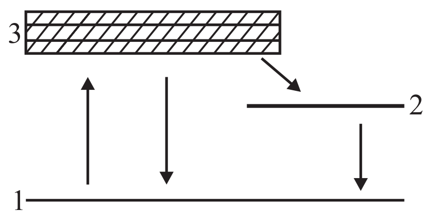
Iş jisimi sintetik rubin bolan kwant generatoryna seredeliň (*35.6-njy çyzgy*). Bu lazeriň iş jisiminiň (2) himiki düzümi 0,05%-li Cr_2O_3 garyndyly Al_2O_3 bägül reňkli rubindir. Iş jisimi diametri 0,1-2 *sm*, uzynlygy 2-23 *sm* bolan silindrdir. Onuň uçlary tekiz, ýokary takyklykda parallel we ýylmanak görnüşde ýasalýar. Uçlardaky tekiz üstler kümüş bilen örtülýär.



35.6-njy çyzgy

Rubiniň bir tarapy (suratda çep tarapy) şöhläni zerkal serpikdirýän görnüşe getirilýär. Beýleki tarapyna bolsa şöhläniň bir bölegini serpikdirip, beýleki bölegini geçirer ýaly derejede kümüş çaýylýar. Onuň goýberiş koeffisiýenti, adatça 10-25% töweregi bolýar. Rubin silindr, esasan, ýaşyl we mawy şöhleleri impuls görnüşinde goýberýän çyra (1) bilen gurşalýar. Bu şöhläniň energiýasynyň täsiri bilen oýandyrma bolýar. Mejbury şöhlelenme döretmäge diňe hromuň ionlary gatnaşýar. Alýuminiý we kislorod inert ýagdaýda galýar.

Rubuniň energetiki derejeleriniň ýönekeýleşdirilen shemasy 35.7-nji çyzgyda görkezilen. Rubiň 560 *nm* tolkun uzynlykly ýaşyl ýagtylyk bilen şöhlelendirilende 1-nji energetiki derejede, esasy halda ýerleşen hromuň iony 3-nji zolakda ýerleşen energetiki derejä geçýär. Gysga, kesgitli wagtyň dowamynda bu ionlaryň bir bölegi şöhle goýbermek bilen öňki, 1-nji derejä geçýär. Beýleki bölegi bolsa, şöhle goýbermän, 2-nji derejä geçýär.



35.7-nji çyzgy

3-nji zolakdan 2-nji derejä geçmegiň ähtimallygy 1-nji derejä geçmegiň ähtimallygyndan has ýokary bolýar. 2-nji derejä geçen hromuň ionlary birnäçe wagtlap öz energiýalaryny saklaýarlar we soňra 1-nji derejä geçýärler. Bu geçişiň ähtimallygy 1-nji derejeden 3-nji derejä geçişiň ähtimallygyndan kiçidir. Başgaça aýdylanda, ionyň 2-nji derejedäki ömri 1-nji derejedäkiden uzakdyr. Şeýlelikde, oýandyrma netijesinde 2-nji derejede 1-nji dereje bilen deňeşdirilende has köp orunlar eýelenýär.

Şu şertde rubine 2-nji derejeden 1-nji derejä geçişe degişli ýygylygy bolan, ýagny

$$v = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

ýygylykly şöhle gönükdirilende rubiniň ionlary $E_2 - E_1$ energiýa goýbermek bilen, 1-nji derejä geçýärler. Bu geçiş v ýygylykly, ilkinji şöhläniň örän köp esse güýçlendirilen görnüşiniň şöhlelendirilmegine getirýär. Bu şöhle lazer şöhlesidir.

Kristalda onuň okuna parallel däl ugurlar boýunça ýaýraýan fotonlar gapdal diwarlardan çykyp gidýärler. Kristalyň okuna ugurdaş hereket edýän fotonlaryň akymlary bolsa, rubin silindriň uçlaryndaky zerkal we ýarym zerkal üstlerden köp gezek serpigip, ýeterlik kuwwata eýe bolandan soň ýarym zerkal tarapdan daşyna çykýar.

Iş jisimi hökmünde gaz ulanylýan kwant generatorlary hem bar. Ilkinji gaz lazeri neonyň we geliýniň garyndysy ulanylan lazerdir. Gazlaryň siňdiriş zolagy dardyr. Şeýle bolansoň ýygylygyň giň interwalynda şöhle goýberýän çyralar bilen gazy oýandyrylan hala geçirmek kyn bolýar. Gaz lazerlerinde bu maksat üçin gaz zarýadsyzlanmasy, ýagny gazdan tok geçirmek usuly ulanylýar.

Lazer şöhlesiniň adaty ýagtylyk şöhlesinden düýpli tapawudy bar. Lazer şöhlesiniň kogerentligi we monohromatikligi örän ýokarydyr. Ol aralyga bagly örän ujypsyz giňelýär. Meselem, inçe lazer şöhlesi goýberilende Aýyň üstünde emele gelýän ýagty menegiň diametri 80 *metrden* köp bolmaýar. Lazer şöhlesinde energiýa akymynyň dykyzlygy örän ýokarydyr. Meselem, rubin lazeriniň goýberýän şöhlesiniň energiýa akymynyň dykyzlygy $2 \cdot 10^{10}$ Wt/m^2-den hem geçýär.

Lazer şöhlesiniň bu aýratynlyklary ony eremesi kyn we örän berk materiallary işläp bejermekde ulanmaga mümkinçilik berýär. Lazeriň kömegi bilen önümlerdäki örän kiçi şikesleri ýüze çykaryp bolýar. Lazer şöhlesi medisinada hirurgiýa pyçagyna derek ulanylýar we gansyz operasiýa geçirmäge mümkinçilik berýär.

Lazer şöhlesi izotoplary dargatmakda (meselem, urany) ulanylýar. Lazer şöhlesi ýokary temperaturaly plazma almaga we ony öwrenmäge mümkinçilik berýär. Lazerli interferometrler örän ýokary takyklykda ölçegler geçirmäge mümkinçilik berýär.

Häzirki döwürde lazer şöhleleri ylymda, tehnikada we önümçilikde örän giňden ulanylýar. Olaryň ulanylýan pudaklaryny doly sanap çykmak hem mümkin däldir.

VII bölüm

KWANT STATISTIKASYNYŇ WE GATY JISIMIŇ FIZIKASYNYŇ ELEMENTLERI

XXXVI BAP. KWANT STATISTIKASY BARADA DÜŞÜNJELER

36.1. Kwant statistikasy. Faza giňişligi. Paýlanyş funksiýasy

Klassyky mehanikada sistemadaky meňzeş bölejikleriň içinde her bölejigi beýlekilerden giňişlikde ýerleşişi we impulsy boýunça tapawutlandyryp bolýar. Bölejikleriň toplumynda bir bölejik bellense, wagtyň geçmegi bilen ony traýektoriýasy boýunça yzarlap bolýar.

Kwant mehanikasynda köp bölejikli ulgamdaky bir mikrobölejigiň hereketi öwrenilende düýpden başgaça netijeler alynýar. Mikrobölejikler bolup elektronlar hyzmat edýär diýeliň. Elektronlaryň massasy, zarýady, spini deň. Goý, olaryň beýleki fiziki häsiýetleri hem, mysal üçin, kwant sanlary hem deň bolsun. Beýle bölejiklere meňzeş (toždestwen, tapawutlandyryp bolmaýan) bölejikler diýilýär.

Kwant statistikasynda bu bölejikleri tapawutlandyryp bolmaýanlygy barada ýörite prinsip girizilýär. Kwant statistikasy öwrenilende kybapdaş bölejikler üçin **faza giňişligi** diýen düşünje girizilýär. Onuň üçin N bölejikden durýan sistema koordinatalaryň we impulslaryň köp ölçegli giňişligi ýaly kabul edilýär. Bu giňişligiň her nokadyna $6N$ san degişlidir. Sebäbi her bölejigiň ýagdaýy x, y, z koordinatalar bilen we p_x, p_y, p_z impulsyň proýeksiýalary bilen kesgitlenýär. Diýmek, bu giňişlikdäki özara perpendikulýar koordinata oklarynyň sany $6N$ bolýar. Şeýle $6N$ ölçegli giňişlige **faza ginişligi** diýilýär. Sistemanyň her mikroýagdaýyna faza giňişliginde bir nokat degişlidir. Sebäbi faza giňişliginde bir nokadyň berilmegi sistemanyň ähli bölejikleri üçin koordinatalaryň we impulslaryň berlendigini aňladýar.

Faza giňişligini göwrümi $dqdp = dq_1dq_2...dq_{3N}dp_1dp_2...dp_{3N}$ bolan elementar öýjüklere böleliň. Bu ýerde q – ähli bölejikleriň koordinatalarynyň köplügi, p – olaryň impulslarynyň proýeksiýalarynyň köplügi. Alnan elementar öýjükler hem $6N$ ölçeglidir. Olara **faza öýjükleri** diýilýär. Maddanyň bölejikleriniň häsiýetleriniň ikileýinligi (dualizm) we kesgitsizlik gatnaşyklaryndan gelip çykýan netije boýunça faza göwrümi h^3-dan kiçi bolup bilmeýär. h – Plankyň hemişeligi.

Sistemanyň berlen ýagdaýynyň dW ähtimallygyny $f(q, p)$ **paýlanyş funksiýasynyň** üsti bilen

$$dW = f(q, p)dqdp. \tag{36.1}$$

görnüşde aňlatmak bolýar. Bu ýerde dW – faza giňişliginiň haýsy-da bolsa bir nokadynyň berlen q, p nokatlaryň golaýynda ýerleşen dq, dp faza göwrümine düşmeginiň ähtimallygy. Başgaça aýdylanda, dW sistemanyň impulslarynyň hem-de koordinatalarynyň p, $p + dp$ we q, $q + dq$ çäklerde bolmagynyň ähtimallygy.

(36.1) deňlikdäki paýlanyş funksiýasy ulgamyň kesgitli ýagdaýynyň ähtimallygynyň dykyzlygydyr. Onda ony birlige normalaşdyrmak bolar

$$\int f(q,p)dqdp = 1.$$

Bu ýerde integrirleme ähli faza göwrümi boýunça amala aşyrylýar.

Paýlanyş funksiýasy belli bolanda öwrenilýän ulgamy häsiýetlendirýän ululyklaryň orta bahalaryny tapyp bolýar. Islendik funksiýanyň orta bahasy

$$\langle L(q,p)\rangle = \int L(q,p)f(q,p)dqdp \tag{36.2}$$

görnüşde tapylýar.

Paýlanyş funksiýasynyň anyk görnüşi D.Gibbs tarapyndan tapyldy. Kwant statistikasynda oňa **Gibbsiň kanoniki paýlanyşy** diýilýär we

$$f(E_n) = Ae^{-\frac{E_n}{kT}} \tag{36.3}$$

görnüşde ýazylýar. Bu ýerde A – birlige normalaşdyrmakdan tapylýan hemişelik; n – berlen ýagdaýy häsiýetlendirýän ähli kwant sanlaryň toplumy, $f(E_n)$ – berlen ýagdaýyň ýüze çykmagynyň ähtimallygy. Ol sistemanyň kesgitli E_n energiýaly bolmagynyň ähtimallygy däldir. Sebäbi E_n energiýaly birnäçe ýagdaýlaryň bolmagy mümkindir.

36.2. Boze-Eýnşteýniň we Fermi-Dirakyň kwant statistikalary barada düşünje

Kwant statistikasynda hem öwrenilýän obýekt hökmünde ideal gazy almak kabul edilendir. Sebäbi ideal gaz üçin alnan baglanyşyklary uly bolmadyk nätakyklyklar bilen real sistemalar üçin ulanmak bolýar. Özara täsirleşmeýän bölejiklerden durýan sistemanyň ýagdaýy **doluş sany** diýilýän N_i san görnüşinde berilýär. N_i san i kwant sanlaryň berlen köplügi bilen häsiýetlendirilýän kwant ýagdaýynyň doluşynyň derejesini görkezýär. Sistemany düzýän bölejikler meňzeş hasaplanýar. Spin sany nola ýa-da bütin sana deň bolan bölejikler-**bozonlar** üçin doluş sany 0, 1, 2 … we şuňa meňzeş bütin sanlara deň bolýar. Ýarym bütin spinli bölejikler-fermionlar üçin doluş sany diňe iki baha (0 we 1) eýe bolup bilýär. Bu sanyň nol bahasy boş ýagdaýlara, bire deň bolan bahasy doly ýagdaýlara degişlidir. Ähli doluş sanlarynyň jemi ulgamdaky bölejikleriň sanyna deň bolýar. Kwant statistikasy berlen kwant ýagdaýyndaky bölejikleriň ortaça sanyny hasaplamaga mümkinçilik berýär. Ol san $\langle N_i \rangle$ görnüşde bellenýär.

Bozonlardan durýan ideal gaz (boze-gaz) Boze-Eýnşteýniň kwant statistikasynda öwrenilýär. Bozonlaryň energiýa boýunça paýlanyşygy Gibbsiň uly kanoniki paýlanyşygyndan getirip çykarylýar we

$$\langle N_i \rangle = \frac{1}{e^{\frac{(E_i - \mu)}{kT}} - 1} \tag{36.4}$$

görnüşde bolýar. Bu paýlanyşyga Boze-Eýnşteýniň paýlanyşygy diýilýär. Ol berlen kwant ýagdaýda islendik mukdardaky kybapdaş bozonlar bolanda hem dogrudyr. Bu ýerde $\langle N_i \rangle$ – energiýasy E_i bolan kwant ýagdaýyndaky bozonlaryň ortaça sanydyr, k – Bolsmanyň hemişeligi, μ – himiki potensial. Ol içki energiýa bagly bolan ähli ululyklar üýtgewsiz bolan şert üçin sistema bir bölejik goşulmagy netijesinde sistemanyň içki energiýasynyň üýtgemesini kesgitleýär.

Fermoinlardan ybarat ideal gaz (fermi-gaz) Fermi-Dirakyň kwant statistikasy bilen öwrenilýär. Fermionlaryň energiýa boýunça paýlanyşygy

$$\langle N_i \rangle = \frac{1}{e^{\frac{(E_i - \mu)}{kT}} + 1} \tag{36.5}$$

görnüşde ýazylýar. Bu ýerde $\langle N_i \rangle$ – energiýasy E_i bolan kwant ýagdaýyndaky fermionlaryň ortaça sany, μ – himiki patensial. Bu paýlanyşyga Fermi-Dirakyň paýlanyşygy diýilýär.

$e^{\frac{(E_i - \mu)}{kT}} >> 1$ şert üçin Boze-Eýnşteýniň (36.4) we Fermi-Dirakyň (36.5) paýlanyşyklary Makswell-Bolsmanyň klassyky paýlanşygyna geçýär:

$$\langle N_i \rangle = Ae^{-\frac{E_i}{(kT)}}. \tag{36.6}$$

Bu ýerde

$$A = e^{\frac{\mu}{(kT)}}. \tag{36.7}$$

Görnüşi ýaly, ýokary temperaturalarda “kwantlaşan” gazlaryň iki görnüşi hem klassyky gaz görnüşine geçýär.

Häsiýetleri klassyky statistika boýun egýän sistemadan düýpli tapawutlanýan bölejikleriň sistemasyna **özgeren** (wyroždennyý) gaz diýilýär. Boze-gaz we fermi-gaz özgeren gazlara degişlidir. Pes temperaturalarda we ýokary dykyzlyklarda özgerenlik has güýçli duýulýar. A ululyga **özgerenligiň görkezijisi** diýilýär. $A << 1$ bolanda, ýagny özgerenligiň derejesi pes bolanda, (36.4) we (36.5) paýlanyşyklar Makswell-Bolsmanyň (36.6) paýlanyşygyna öwrülýär.

Temperatura peselende gazyň özgeren hala geçýän T_0 temperaturasyna **özgerme temperaturasy** diýilýär. Temperaturanyň T_0 bahadan pes bahalarynda gazyň bölejikleriniň meňzeşligi sebäpli, gaz özgeren görnüşde bolýar. $T >> T_0$ bolan şertde gaz klassyky görnüşe geçýär we onuň kanunlary bilen ýazylýar.

36.3. Metallardaky özgeren elektron gazy

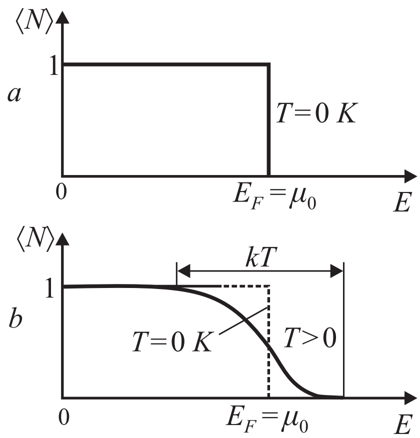
Elektronlaryň dürli kwant ýagdaýlary boýunça paýlanyşy Pauliniň prinsipi boýunça bolup geçýär. Oňa laýyklykda bir halda dört kwant sanlary hem deň bolan iki ýa-da ondan köp elektron bolup bilmeýär. Diýmek, metalda 0 K temperaturada hem elektronlar iň pes energetik ýagdaýda toplanyp bilmeýär. Elektronlar energiýasy boýunça dürli bahalara eýe bolmaly bolýarlar.

Metallardaky geçiriji elektronlary Fermi-Dirakyň paýlanyşygyna boýun egýän ideal gaz ýaly seretmek bolar. Onda (36.5) deňlikden E energetiki derejede ýerleşen elektronlaryň ortaça sany üçin

$$\langle N(E)\rangle = \frac{1}{e^{\frac{(E-\mu_0)}{(kT)}}+1} \tag{36.8}$$

aňlatmany ýazmak bolar. Bu ýerde μ_0-temperaturanyň $T = 0\ K$ bahasy üçin elektron gazynyň himiki potensialy.

$T = 0\ K$ temperaturada $E < \mu_0$ bolanda $\langle N(E)\rangle = 1$ bolýar we $E > \mu_0$ bolanda $\langle N(E)\rangle = 0$ bolýar. (36.8) funksiýanyň grafigi 36.1-nji *a* çyzgyda görkezilendir.



36.1-nji çyzgy

Energiýanyň noldan μ_0-a çenli bahalarynda $\langle N(E)\rangle$ bire deň bolýar. $E = \mu_0$ bolanda funksiýanyň bahasy nola deň bolýar. Bu $T = 0\ K$ bolanda energiýasy $E = \mu_0$ baha çenli bolan kwant ýagdaýlarynyň ählisi elektronlar bilen doldurylan diýildigidir. Görnüşi ýaly, μ_0 metaldaky geçiriji elektronlaryň alyp biljek iň uly energiýasydyr. Bu energiýa **Fermi energiýasy** diýilýär we E_F bilen bellenýär. Onda (36.8) aňlatmany

$$\langle N(E)\rangle = \frac{1}{e^{\frac{(E-E_F)}{(kT)}}+1} \tag{36.9}$$

görnüşde ýazmak bolar.

Iň ýokarky energetiki derejä **Fermi derejesi** diýilýär. Elektron gazynyň dykyzlygy ýokary boldugyça Fermi derejesi hem ýokarydyr. Fermi derejesi şol derejedäki elektronlaryň energiýasyna degişlidir.

Metallar üçin has ýokary bolmadyk temperaturada $kT << E_F$ deňsizlik ýerine ýetýär. Bu ýerden metallardaky elektron gazy köplenç, güýçli özgeren haldadyr diýen netijä gelmek bolýar. Özgerme temperaturasy $kT_0 = E_F$ deňlikden kesgitlenýär. Hasaplamalaryň maglumatlaryna görä, metallar üçin $T_0 \approx 10^4\ K$, ýagny gaty haldaky metallaryň elektron gazy özgeren ýagdaýyndadyr.

Absolýut pes temperaturadan ýokarda Fermi-Dirakyň paýlanyş funksiýasy (36.5) E_F energiýanyň töwereginde energiýanyň az interwalynda birden nola çenli ýuwaşlyk bilen üýtgeýär (*36.1-nji b çyzgy*). $T > 0\ K$ temperaturalarda E_F energiýa golaý energiýaly elektronlar ýylylyk energiýasynyň hasabyna oýandyrylýar we olaryň energiýasy E_F energiýadan ýokary bolýar. Şeýlelik bilen, E_F energiýanyň töwereginde, $E < E_F$ şertde elektronlaryň ortaça sany birden kiçi bolýar we $E < E_F$ şert üçin – noldan uly bolýar. Hasaplamalaryň maglumatlaryna görä $T = 300\ K$ temperaturada we $T_0 = 3 \cdot 10^4\ K$ özgerme temperaturasynda ähli elektronlaryň 10^{-5} bölegi ýylylyk hereketine gatnaşýar.

$(E - E_F) << kT$ şert üçin Fermi-Dirakyň kwant statistikasy ulanylmalydyr. $(E - E_F) >> kT$ şert üçin bolsa Fermi-Dirakyň paýlanyşygy Makswell-Bolsmanyň paýlanyşygyna geçýär we metaldaky geçiriji elektronlar üçin klassyky statistika ulanylýar.

36.4. Metallaryň elektrik geçirijiliginiň kwant teoriýasynyň netijeleri

Kwant mehanikasyndan we Fermi-Dirakyň kwant statistikasyndan peýdalanylyp geçirilen hasaplamalar metallaryň elektrik geçirijiligi üçin

$$\gamma = \frac{ne^2 \langle l_F \rangle}{m \langle u_F \rangle} \tag{36.10}$$

aňlatmany berýär. Bu ýerde n – metaldaky geçiriji elektronlaryň konsentrasiýasy, $\langle l_F \rangle$ – Ferminiň energiýasyna deň energiýasy bolan elektronlaryň erkin ýolunyň uzynlygy, $\langle u_F \rangle$ – ýylylyk hereketindäki elektronyň orta tizligi.

Metallaryň elektrik geçirijiligi boýunça alnan tejribe maglumatlaryny (36.10) formuladaky baglanyşyk doly ylalaşdyrýar.

Kwant teoriýasynda geçiriji elektronlaryň hereketi kristallik gözenek bilen baglanyşykda öwrenilýär. Korpuskul – tolkun ikileýinlige görä elektronlaryň hereketine tolkun hereketi ýaly seredilýär. Periodikligi bozulmadyk, düwünlerinde hereketsiz bölejikler ýerleşen nusgalyk kristallik gözenek elektronlaryň tolkun hereketi üçin päsgelçiliksiz dury optiki sreda ýaly göz öňüne getirilýär. Ol elektronlaryň "tolkunyna" pytradyjy täsir etmeýär. Bu tolkun kristallik gözenegiň düwünlerinden sowlup geçmek bilen ep-esli aralygy geçip bilýär.

Real kristallarda bolsa garyndynyň bolmagy, düwnüň ýerinde boşluklaryň emele gelmegi (wakansiýa), şeýle-de ýylylyk yrgyldylarynyň barlygy sebäpli, birhilligiň bozulmalary emele gelýär. Bu bozulmalarda elektron "tolkunynyň" pytramasy metallarda elektrik garşylygynyň ýüze çykmagyna getirýär. Elektron "tolkunynyň" ýylylyk bozulmalary bilen baglanyşykly pytramasyna elektronlaryň **fononlar** bilen çaknyşmasy ýaly hem seredilýär. Kwant-tolkun ikileýinligi teoriýasynda elektromagnit şöhlelerine fotonlaryň akymy ýaly kabul edilişine meňzeş, ýylylyk oýandyrmasynyň maýyşgak tolkunlaryna fonon diýlip at berilýär we olara bölejikleriň akymy ýaly seredilýär. Şonuň üçin umumy elektrik garşylygynyň ýylylyk bozulmasy bilen baglanyşykly bölegine garşylygyň fonon bölegi diýilýär.

Metallarda elektrik geçirijiliginiň klassyky teoriýasyna görä, elektrik garşylygy $\sqrt{T}$ ululyga göni bagly. Emma bu baglanyşyk tejribe maglumatlary bilen ylalaşmaýar. Kwant teoriýasy temperaturanyň üýtgemegi bilen Ferminiň derejesiniň hemişelik galýandygyny, netijede elektronyň orta tizliginiň hem üýtgemeýändigini we temperaturanyň ýokarlanmagy bilen fononda dargama köpelip, elektronlaryň erkin ýolunyň gysgalýandygyny hasaba alyp, elektrik garşylygy T temperatura göni bagly diýen netijä geldi. Şeýlelikde metallaryň elektrik garşylygy bilen baglanyşykly klassyky teoriýadaky kynçylyk kwant teoriýasynda düzedildi.

36.5. Aşageçirijilik

1911-nji ýylda Gollandiýaly fizik Kamerling-Onnes 4,15 K temperaturada simabyň elektrik garşylygynyň doly ýitýändigini kesgitledi. Ol 4,5 K temperaturada simap täze ýagdaýa, ýagny aşageçiriji ýagdaýa geçýär diýen netijä geldi. Soňra bu hadysanyň başga-da birnäçe metallarda we köpsanly garyndylarda bolýandygy anyklandy. Maddanyň aşageçiriji hala geçýän temperaturasyna kritiki temperatura (T_k) diýip at berildi.

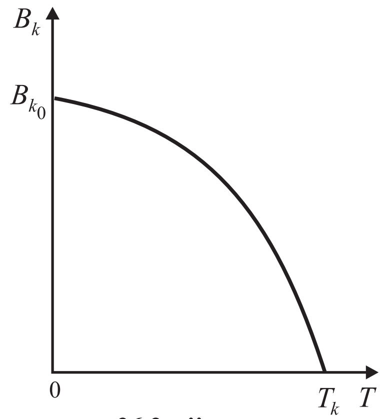
Aşageçirijiligi tejribede synlamak üçin adaty elektrik zynjyrynyň bir bölegine aşageçiriji haldaky geçirijini birikdirmek ýeterlikdir. Bu shemadan tok geçýändigine garamazdan, aşageçirijiniň uçlaryndaky napryýaženiýäniň peselmesi nola deň bolýar.

Aşageçiriji maddadan ýasalan halka magnit meýdanyna perpendikulýar ýerleşdirilip, T_k temperatura çenli sowadylanda, halkada kiçelmeýän elektrik togunyň ýüze çykýandygyny tejribede görmek bolýar. Aşageçirijide elektrik garşylygyň ýokdugy sebäpli, toguň örän uzak wagtlap (birnäçe ýyllap), gowşaman akyp durýandygy anyklanandyr.

Aşageçirijiniň içine magnit meýdany aralaşyp bilmeýär. Bu hadysa Meýsneriň effekti diýilýär. Aşageçiriji nusga magnit meýdanyna ýerleşdirilip, soňra sowadylanda, temperatura T_k bahadan aşak düşende magnit induksiýasy nusgadan çykýar. Başgaça, muňa nusganyň magnit syzyjylygy nola deň bolýar ($\mu = 0$) diýip hem düşünmek bolar. Magnit syzyjylygy birden kiçi bolan ($\mu < 1$) maddalara dielektrik diýilýänligi sebäpli, aşageçirijilere ideal dielektrikler diýmek bolar.

Güýçli magnit meýdany maddany aşageçiriji haldan çykaryp bilýär. Magnit meýdanynyň degişli bahasyna kritiki meýdan diýilýär we B_k bilen bellenýär. Bu meýdan nusganyň temperaturasyna baglydyr. Temperaturanyň kritiki bahadan peselmegi bilen B_k artýar we 0 K temperaturada käbir B_{k_0} baha eýe bolýar. Bu baglanyşyk grafik görnüşinde 36.2-nji çyzgyda görkezilendir.

Aşageçirijiden geçýän tok köpeldilip käbir I_k baha ýetirilende, nusga aşageçiriji haldan çykýar. Bu toga kritiki tok diýilýär. Kritiki toguň temperatura bagly üýtgeýşi 36.2-nji çyzgydaky baglanyşyga meňzeşdir.



36.2-nji çyzgy

Köp ýyllaryň dowamynda metallaryň we birleşmeleriň aşageçirijilik halyny örän pes temperaturada, ýagny suwuk geliýniň temperaturasynda (4,5 K) almak mümkin boldy. 1990-njy ýyldan başlap, kritiki temperaturasy T_k = 100 K töweregi bolan aşageçirijileriň üsti açyldy. Olara esasan metalloksid keramikasy toparyna girýän maddalar (mysal üçin, La – Ba – Cu – O we Y – Ba – Cu – O) degişlidir.

Ýokary temperaturaly aşageçirijileri almak üçin dünýäniň köp ýurtlarynda ymykly ylmy işler alnyp barylýar. 300 K temperaturanyň töwereginde aşageçirijiler tapylsa, tehnikada düýpli özgerişler bolup geçer. Elektrik energiýasyny uzaklara geçirijileriň aşageçirijilerden ýasalmagy simlerdäki kuwwatyň ýitgilerini doly ýok eder. Aşageçirijiligiň çylşyrymly teoriýasy bardyr. Onuň umumy esaslaryna seredeliň.

Metaldaky elektronlaryň arasynda Kulonyň itekleşme güýçleri bardyr. Emma aşageçirijiligi düşündirmek üçin pes temperaturalarda elektronlaryň arasynda özboluşly dartyşma güýçler ýüze çykýar we ol güýçler Kulonyň güýçlerinden uludyr diýlip hasaplanýar. Dartyşma güýçleriniň täsiri bilen elektronlar birleşýärler we **kuper jübütleri** diýilýänleri emele getirýärler. Bu jübüte girýän elektronlaryň spinleri garşylykly taraplara gönükdirilen bolýar. Şonuň üçin jübtüň spini nola deň bolýar hem-de bozon görnüşindäki bölejikere öwrülýär. Bozonlar bolsa esasy energetiki halda toplanmaga ukyplydyr. Olary oýandyrylan hala geçirmek kyn bolýar. Kuper jübütleriniň ylalaşykly hereketi aşageçirijilik toguny emele getirýär.

Aýdylanlara has giňişleýin seredeliň. Metalda elektronlaryň hereketiniň täsiri bilen kristal gözeneginiň položitel ionlarynyň biraz deformirlenmesi (polýarlaşmasy) bolýar. Bu deformasiýanyň netijesinde elektron položitel zarýadyň “buludy” bilen gurşalýar we şol görnüşde kristall gözeneginde hereket edip bilýär. Elektron özüni gurşap alan buludy bilen bilelikde položitel zarýadly sistemany emele getirýär we ol belli bir elektrony özüne çekmäge ukyply bolýar. Kristallik gözenek bolsa, agzalan hallaryň döremegine ýardam berýän aralyk sreda bolup galýar.

Kwant mehanikasynda elektronlaryň biri-birini dartyşy düşündirilende olaryň arasynda gözenek tarapyndan döredilýän kwantlaryň (fononlaryň) alyş-çalşygy bolýar diýilip hasaplanýar. Metalda hereket edýän elektron gözenegiň yrgyldy düzgünini bozýar we fononlaryň döredilmegine getirýär. Fononlar beýleki bir elektron tarapyndan ýuwudylýar we käbir energiýany alýar. Fononlaryň şeýle tertipdäki alyş-çalşygy elektronlaryň arasynda dartyşma görnüşindäki özara täsiriň ýüze çykmagyna getirýär. Pes temperaturalarda bu dartyşma täsiri itekleşme güýçlerinden uly bolýar.

Fononlaryň alyş-çalşygy netijesinde ýüze çykýan özara täsir impulslary spinleri garşylykly bolan elektronlarda has güýçli ýüze çykýar. Netijede, iki elektron kuper jübütini emele getirýär. Bu jübüti biri-birine ýelmeşen elektronlar ýaly göz öňüne getirmek dogry däldir. Jübüt emele gelende elektronlaryň aralygy, takmynan 10^{-7} *m* bolýar. Kuper jübütleriniň million sanysy bozonlaryň köplügini emele getirip, umumy göwrümi emele getirip bilýärler.

Metaldaky geçiriji elektronlar kuper jübütlerini emele getirip bilmeýärler. Absolýut noldan tapawutly T temperaturada jübütleriň bozulmagynyň ähtimallygy bardyr. Şonuň üçin hemişe kuper jübütleri bilen bir hatarda adaty elektronlar hem bardyr we olar adaty şertde gözenekde hereket edýärler. Temperatura ýokarlanyp, kritiki T_k temperatura golaýlaşdygyça adaty elektronlaryň sany köpelýär. Temperatura $T \geq T_k$ bolanda ähli elektronlar adaty görnüşe geçýär we aşageçirijilik ýitýär.

Kuper jübütleriniň emele gelmegi metalyň energetiki spektriniň özgermegine getirýär. Aşageçiriji halda elektron sistemasyny oýandyrmak üçin diňe bir jübüti bozmak ýeterlik bolýar. Onuň üçin bolsa jübütdäki elektronlaryň baglanyşyk energiýasyna deň bolan E_{ag} energiýa ýeterlikdir.

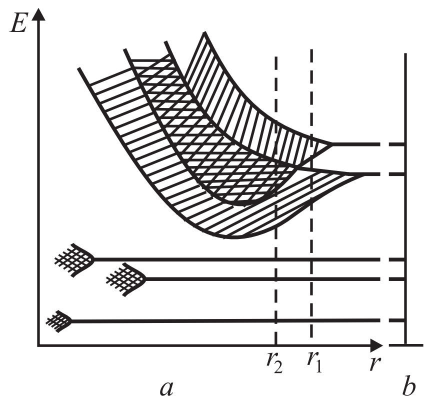
Bu energiýa aşageçirijiniň elektronlar sistemasynyň alyp bilýän iň kiçi energiýasydyr. Diýmek, aşageçiriji halyndaky elektronlaryň energetiki spektrinde giňligi E_{ag} deň bolan yş bardyr. Ol Ferminiň derejesiniň töweregindedir. Bu yşa gadagan zolak diýmek bolar. Sebäbi oňa degişli energiýalarda elektron sistemasy bolup bilmeýär. Beýle zolagyň bardygy tejribede subut edilendir.

Şeýlelikde, aşageçirijilik halynda bolan oýandyrylan elektronlaryň sistemasy esasy halda E_{ag} energetiki yş bilen üzňeleşdirilendir. Şonuň üçin, toguň käbir I_k bahasyndan pes bahalarynda elektron sistemasy goşmaça oýandyrylmaýar we metaldan elektrik togy garşylyksyz geçip bilýär.

XXXVII BAP. GATY JISIMLERIŇ ZOLAKLAR TEORIÝASY

37.1. Kristallardaky energetiki zolaklar

Kristaldaky walent elektronlaryň energiýasy erkin elektronlaryň mysalynda öwrenilende energiýanyň üznüksiz bahalara eýe bolmaýandygy belli edilipdi. Ol energiýanyň spektri köpsanly golaý ýerleşen diskret derejelerden ybarat bolýar. Hakykatda bolsa, walent elektronlar erkin däl-de kristallik gözenegiň periodiki üýtgeýän meýdanynda hereket edýärler. Bu ýagdaý walent elektronlaryň energiýasynyň mümkin bolan bahalarynyň gadagan däl we gadagan zolaklara bölünmegine getirýär. Gadagan däl zolakda biri-birine örän golaý ýerleşen energetiki derejeler emele gelýär. Bu zolaklaryň emele gelşine düşünmek üçin atomlaryň kristala öwrülişine hyýaly seredeliň. Kristaly baglanyşyksyz N atomlar emele getirýän bolsun. Atomlar biri-birinden üzňe mahaly olaryň energetiki derejeleriniň meňzeş shemasy bardyr (*37.1-nji b çyzgy*).



37.1-nji çyzgy

Atomlar golaýlaşyp kristallik gözenek emele getirende, atomyň energetiki derejeleri üýtgeýär, ýagny derejeler süýşýär we giňelýär. Netijede, üzňelikde ýerleşen atomyň her bir energetiki derejesi birigip N sany dereje döredýär. Ol derejeler bolsa, zolaklary emele getirýär. 37.1-nji *a* çyzgyda energetiki derejeleriň giňelisiniň atomlaryň arasyndaky r aralyga baglylygy görkezilendir.

Çyzgydan görnüşi ýaly, walent elektronlaryň energetiki derejeleri has güýçli giňelýär we giň zolaklary emele getirýär. Içki elektronlaryň derejeleri has gowşak giňelýärler ýa-da giňelmeýärler.

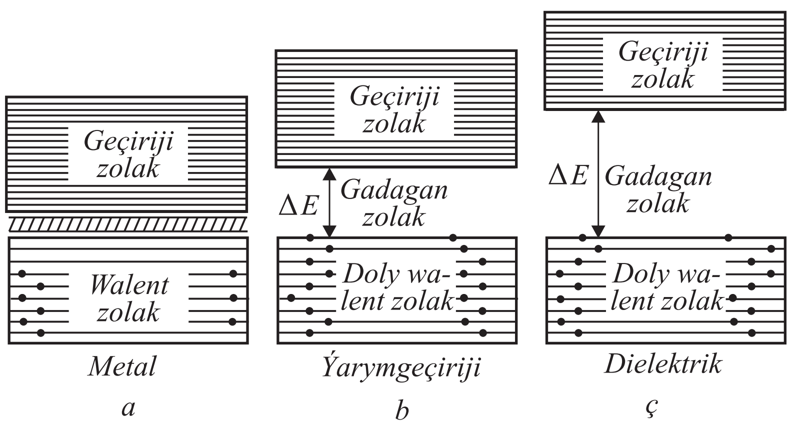
Atomlaryň häsiýetleriniň aýratynlyklaryna baglylykda kristalda goňşy atomlaryň arasy r_1 görnüşli ýa-da r_2 görnüşli bolup bilýär. Aralyk r_1 görnüşli bolanda atomyň goňşy derejeleriniň kesişmegi netijesinde emele gelen gadagan däl zolaklaryň arasynda gadagan zolak emele gelýär. Kristalda bu zolagyň energiýasyna degişli energiýaly elektron bolmaýar. Aralyk r_2 görnüşde bolanda gadagan däl goňşy zolaklar biri-biriniň üstüne düşýär we giň zolak döredýär. Gadagan zolak bolmaýar.

Şeýle-de, kristallyň walent elektronlarynyň energiýasynyň mümkin bolan bahalarynyň spektri gadagan däl we gadagan zolaklara bölünýär. Gadagan däl zolaklardaky derejeleriň sany kristaldaky atomlaryň sanyna deňdir. Diýmek, kristalda atom köp boldygyça zolakdaky energetiki derejeleriň sany şonça-da köpdür. Zolaklaryň giňligi kristallyň ölçeglerine bagly däldir. Zolakdaky energetiki derejeleriň aralygy, takmynan 10^{-23} *eW*. Bu ululygyň örän kiçidigi sebäpli, köp meseleler çözülende zolaklary üznüksiz energiýaly hasaplamak bolar. Energetiki zolaklaryň bolmagy metallaryň, dielektrikleriň we ýarymgeçirijileriň geçirijilik häsiýetlerini bir nukdaý nazardan öwrenmäge mümkinçilik berýär.

37.2. Metallaryň, dielektrikleriň we ýarymgeçirijileriň zolaklarynyň aýratynlyklary

Atomyň esasy halynda walent elektronlarynyň energetiki derejelerinden emele gelen gadagan däl zolaga **walent zolagy** diýilýär. Absolýut nol temperaturada bu zolak spinleri garşylykly elektronlaryň jübütleri bilen doldyrylýar. Has ýokarky gadagan däl zolaklarda elektronlar bolmaýar. Atomlaryň daşky "umumylaşan" elektronlarynyň energetiki derejelerinden emele gelen zolaga **erkin zolak** diýilýär.

Zolaklaryň elektronlar bilen doldurylyşyna we gadagan zolagyň giňligine baglylykda 37.2-nji çyzgyda görkezilen ýagdaýlaryň bolmagy mümkin. 37.2-nji *a* çyzgyda walent we geçiriji zolaklarynyň bir bölegi biri-biriniň üstüne düşýär. Beýle şekildäki zolaklary bolan maddalar elektrik toguny geçirijilerdir. Olara, esasan, aşgar metallary degişlidir. Geçiriji we walent zolaklary biri-biriniň üstüne düşmän, ýöne golaý ýerleşen, ýagny gadagan zolagynyň giňligi, takmynan 10^{-22} eW töweregi bolan maddalar hem bar. Olara metallar degişlidir. Bu ýagdaýda geçiriji zolakda elektronlar bar, ýöne ol doly doldurylan däldir. Walent zolagynyň ýokarky derejelerinde ýerleşen elektronlar örän az mukdarda energiýa alanda hem geçiriji derejelere geçip bilýärler. Beýle geçişiň bolmagy üçin ýylylyk hereketiniň ýa-da elektrik meýdanynyň uly bolmadyk energiýasy ýeterlikdir. Ýokarky geçiriji zolak geçen elektronlar erkin hala geçýär we tok geçirijiligine gatnaşyp bilýär. Geçiriji elektronlaryň emele gelmegi üçin temperaturanyň 1 K-den ýokarlanmagy ýeterlikdir. Sebäbi oňa $kT \approx 10^{-4}$ eW energiýa degişlidir. Zolakdaky goňşy derejeleriň arasyndaky tapawut bolsa, takmynan 10^{-22} eW-a barabardyr. Şeýlelikde, elektronlar bilen gutarnykly doldurylmadyk zolagy bolan gaty jisim elektrik toguny geçirijidir. Bu häsiýet bolsa metallara degişlidir.



37.2-nji çyzgy

37.2-nji çyzgynyň *b* we *ç* çyzgylarynda walent zolagy elektronlar bilen gutarnykly doldurylandyr. Bu ýagdaýda elektronyň energiýasyny köpeltmek üçin gadagan zolagyň ΔE giňliginden uly bolan energiýa gerek. Elektrik meýdany bilen beýle energiýany bermek mümkin däl. Has ýokary meýdanlarda bolsa, kristalyň böwsülmesi mümkin. Bu şertlerde gaty jisimiň elektrik häsiýetleri gadagan zolagyň ΔE ini bilen kesgitlenýär. ΔE energiýanyň bahasy 0,1 *eW* töweregi bolsa, ýylylyk hereketiniň energiýasy elektronlaryň bir bölegini ýokarky erkin zolaga geçirmek üçin ýeterlik bolýar. Ýokarky zolaga geçen elektronlaryň ýagdaýy metalyň walent zolagyndaky elektronlaryňky ýaly bolýar. Olar üçin erkin zolak **geçiriji zolaga** öwrülýär. Şol bir wagtda walent zolagyndaky elektronlar şol zolagyň ýokarky derejelerine geçýär. Şeýle özgerişlikler bolýan madda **hususy ýarymgeçiriji** diýilýär. Ýarymgeçirijiler üçin gadagan zolagyň giňligi, takmynan $\Delta E = 0{,}2 \div 3{,}0$ *eW*.

Gadagan zolagyň ini inli bolsa (birnäçe *eW*), ýylylyk hereketiniň energiýasy erkin zolaga elektronlary geçirip bilmeýär. Beýle şerte degişli maddalar dielektriklerdir. Dielektrikler üçin gadagan zolagyň giňligi 3,0 *eW*-dan ýokarydyr.

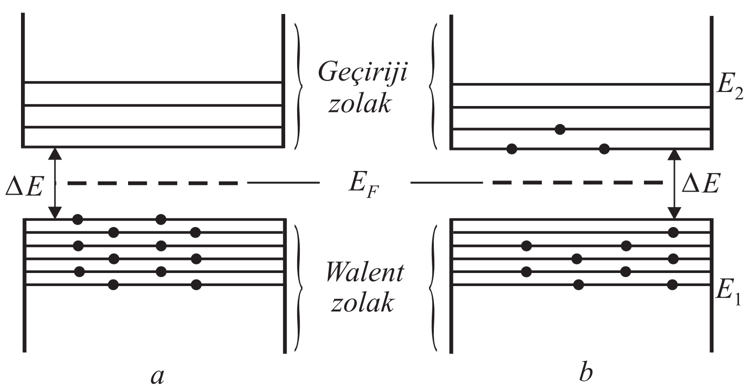
37.3. Ýarymgeçirijiler

Absolýut nol temperaturada walent zolagy elektronlar bilen doly, gadagan zolagynyň giňligi $0{,}2 \div 3{,}0$ *eW* çäklerde bolan kristallik maddalara **ýarymgeçirijiler** diýilýär. Ýarymgeçirijileriň geçirijiligi gyzdygyça ýokarlanýar.

Ýarymgeçirijileriň **hususy** we **garyndyly** görnüşleri bardyr. Hususy ýarymgeçirijilere himiki arassa ýarymgeçirijiler degişlidir. Olaryň geçirijiligine **hususy geçirijilik** diýilýär. Olara arassa germaniý, selen we himiki birleşmeleriň birnäçesi degişlidir. Garyndyly ýarymgeçirijileriň elektrik häsiýetlerini olara goşulan garyndylar kesgitleýär.

Absolýut nol temperaturada hususy ýarymgeçirijileriň walent zolagy elektronlar bilen doldurylan bolýar. Geçiriji zolakda bolsa elektronlar bolmaýar (*37.3-nji a çyzgy*).

Elektrik meýdany elektronlary walent zolakdan geçiriji zolaga geçirip bilmeýär. Şonuň üçin absolýut nol temperaturada hususy ýarymgeçirijiler dielektrik-



37.3-nji çyzgy

ler ýalydyr. Temperatura 0 K-den ýokary bolanda elektronlaryň bir bölegi ýylylyk energiýasynyň hasabyna geçiriji zolagyň aşaky derejelerine geçýär (*37.3-nji b çyzgy*). Bu şertde elektrik meýdanynyň täsiri bilen geçiriji zolakdaky elektronlar herekete gelip bilýär. Ýarymgeçirijileriň elektronlaryň esasyndaky geçirijiligine ***n*-tipli** ýa-da **elektron geçirijilik** diýilýär. Mundan başga-da, walent zolakda boş derejeleriň emele gelmegi sebäpli, elektrik meýdanynyň täsiri bilen bu zolagyň elektronlary tizliklerini üýtgedip bilýär. Netijede, ýarymgeçirijide elektrik geçirijiligi döreýär.

Elektronlaryň walent zolakdan geçiriji zolaga geçmegi zerarly walent zolakda boş orunlar emele gelýär. Olara **deşijekler** diýilýär. Daşky elektrik meýdanynda deşijege goňşy derejeden elektron geçip bilýär. Elektronyň öňki ýerinde bolsa ýene-de deşijek peýda bolýar. Bu hadysanyň yzygiderli gaýtalanyp durmagy deşijegiň hereketine meňzeýär. Deşijekleriň bu hereketi položitel zarýadly kwazibölejikleriň elektronlaryň hereketiniň garşysyna hereketi ýaly göz öňüne getirilýär. Ýarymgeçirijileriň deşijekleriň esasyndaky geçirijiligine **p-tipli geçirijilik** ýa-da **deşijekli geçirijilik** diýilýär.

Şeýlelikde, hususy ýarymgeçirijilerde geçirijiligiň iki mehanizmi, ýagny elektronly we deşijekli geçirijikler bardyr. Hususy ýarymgeçirijide geçiriji zolakdaky elektronlaryň sany walent zolakdaky deşijekleriň sanyna deňdir. Elbetde, bu ýagdaý elektronlaryň geçiriji zolaga geçirilen ýagdaýyna, ýagny oýandyrylan ýagdaýa degişlidir. Eger geçiriji elektronlaryň we deşijekleriň konsentrasiýalaryny n_e we n_p bilen bellesek, onda

$$n_e = n_p. \tag{37.1}$$

Hususy ýarymgeçirijilerde geçirijilik diňe oýandyrylan ýagdaýda ýüze çykýar. Oýandyrma bolsa, daşky täsirleriň (temperaturanyň, şöhlelendirmäniň, güýçli elektrik meýdanynyň we ş.m.) kömegi bilen amala aşyrylýar.

Hususy ýarymgeçirijide Ferminiň E_F derejesi gadagan zolagyň ortasynda ýerleşýär (*37.3-nji çyzgy*). Elektrony walent zolagyň ýokarky derejesinden (E_1) geçiriji zolagyň aşaky derejesine (E_2) geçirmek üçin gerek bolan energiýa aktiwleşdirme energiýasy (ΔE) diýilýär. Ol $\Delta E = E_2 - E_1$ deňlik bilen kesgitlenýär. Bu energiýa iki bölekden durýar. Onuň bir bölegi deşijegiň emele gelmegine sarp bolýar. Beýleki bölegi bolsa, elektrony geçiriji zolaga "zyňmak" üçin sarp bolýar. Aktiwleşdirme energiýasynyň iki bölegi biri-birine deňdir.

Ferminiň derejesiniň gadagan zolagyň ortasynda ýerleşýändigi gaty jisimiň fizikasynda matematiki hasaplamalar bilen subut edilýär. Geçiriji zolakdaky elektronlaryň konsentrasiýasy üçin

$$n_e = C_1 e^{-\frac{E_2 - E_F}{kT}} \tag{37.2}$$

aňlatma ýazylýar. Bu ýerde E_2 – geçiriji zolagyň düýbündäki energiýasy, k – Bolsmanyň hemişeligi, C_1 – temperatura we geçiriji elektronlaryň **effektiw mas-**

sasyna bagly hemişelik. **Effektiw massa** – kwazibölejikler ýaly seredilýän geçiriji elektronlaryň we deşijekleriň dinamiki taraplaryny häsiýetlendirýän, massanyň ölçegi ýaly ölçeg birlikli ululykdyr. Zolak teoriýasyna geçiriji elektronlar üçin effektiw massa düşünjesiniň girizilmegi elektronlara daşky meýdanyň hem-de kristalyň periodik meýdanynyň täsirlerini hasaba almaga mümkinçilik berýär. Şeýlelikde, elektronlara giňişlik gözeneginiň täsirini hasaba alman, olary daşky meýdanda hereket edýän erkin bölejikler ýaly kabul etmäge mümkinçilik berýär.

Walent zolagyndaky deşijekleriň konsentrasiýasy

$$n_p = C_2 e^{-\frac{E_1 - E_F}{kT}} \qquad (37.3)$$

deňlik bilen kesgitlenýär. Bu ýerde C_2 – temperatura we deşijegiň effektiw massasyna bagly hemişelik. Bu ýerde oýandyryjy energiýanyň Ferminiň energiýasyndan aşak tarapa hasaplanýandygy üçin (*37.3-nji çyzgy*), derejäniň alamaty (37.2) deňlikdäkiniň tersine alynýar. Hususy ýarymgeçirijilerde $n_e = n_p$ bolany üçin

$$C_1 e^{-\frac{E_2 - E_F}{kT}} = C_2 e^{-\frac{E_1 - E_F}{kT}}.$$

Eger elektronyň we deşijegiň effektiw massalary deň $(m_e^* = m_p^*)$ bolsa, $C_1 = C_2$ we netijede

$$-(E_2 - E_F) = E_1 - E_F.$$

Bu ýerden

$$E_F = \frac{(E_1 + E_2)}{2} = \frac{\Delta E}{2}.$$

Diýmek, hususy ýarymgeçirijilerde, hakykatdan-da, Ferminiň derejesi gadagan zolagyň ortasynda ýerleşýär.

Hususy ýarymgeçirijilerde $\Delta E >> kT$ bolany üçin Fermi-Dirakyň (36.5) paýlanyşygy Makswell-Bolsmanyň (36.6) paýlanyşygyna öwrülýär. (36.6) paýlanyşyk üçin $E - E_F \approx \frac{\Delta E}{2}$ deňligi ulanyp alarys:

$$\langle N(E)\rangle \approx e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}. \qquad (37.4)$$

Geçiriji zolaga geçen elektronlaryň mukdary we emele gelen deşijekleriň sany $\langle N(E)\rangle$ göni bagly bolýar. Şeýlelikde, hususy ýarymgeçirijilerde udel geçirijilik

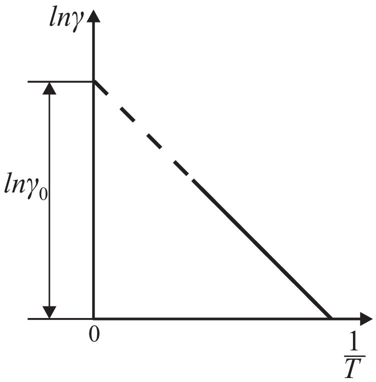
$$\gamma = \gamma_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT}} \qquad (37.5)$$

deňlik bilen kesgitlenýär. Bu ýerde γ_0 – öwrenilýän ýarymgeçirijini häsiýetlendirýän hemişelikdir.

Temperaturanyň ýokarlanmagy bilen ýarymgeçirijiniň geçirijiliginiň artmagy häsiýetli aýratynlykdyr. Metallarda temperaturanyň ýokarlanmagy bilen geçirijiligiň peselýändigi bellidir. Zolaklar teoriýasynyň nukdaý nazaryndan bu aýratynlyk aňsat düşündirilýär, ýagny temperaturanyň ýokarlanmagy bilen geçiriji zolaga geçýän elektronlaryň we geçirijilige gatnaşýan deşijekleriň sany köpelýär.

Şonuň üçin hem, temperaturanyň ýokarlanmagy bilen hususy ýarymgeçirijileriň udel geçirijiligi artýar.

(37.5) deňlik bilen kesgitlenýän hususy ýarymgeçirijileriň geçerijiligi logarifma koordinatasynda 37.4-nji çyzgydaky ýaly gurulsa, göni çyzyk emele gelýär we ol göni çyzygyň eňňitligi boýunça gadagan zolagyň ΔE giňligini kesgitläp bolar. Göni çyzygy dowam etdirip bolsa, γ_0 hemişeligi kesgitläp bolýar.



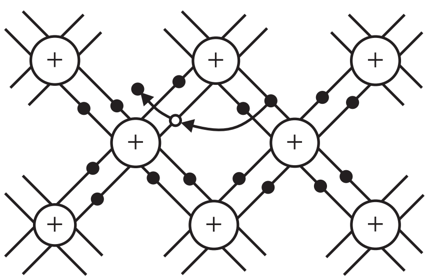
37.4-nji çyzgy

Giň ýaýran ýarymgeçiriji elementler germaniý we kremniýdir. Olaryň giňişlik gözenegi almazyň giňişlik gözeneginiň görnüşindedir. Almaz görnüşli gözenekde her atom golaýyndaky dört atom bilen kowalent baglanyşykdadyr. Germaniniň kristalynda atomlaryň ýerleşişiniň tekizlikdäki ýönekeý shemasy 37.5-nji çyzgyda görkezilendir.

Onda goşmak bellikli tegelejikler položitel zarýadly atom galyndylaryny, nokatlar elektronlary, goşa çyzyk bolsa kowalent baglanyşygy aňladýar.

Ideal kristal üçin $0K$ temperaturada beýle gurluş dielektrikdir. Sebäbi ähli elektronlar baglanyşyklar bilen üpjün edilýärler we erkin elektron ýok.

Temperatura ýokarlananda (ýa-da başga täsirleriň netijesinde) gözenegiň ýylylyk yrgyldylarynyň täsiri bilen käbir elektronlar baglanyşykdan çykyp, erkin hala geçýär.


37.5-nji çyzgy

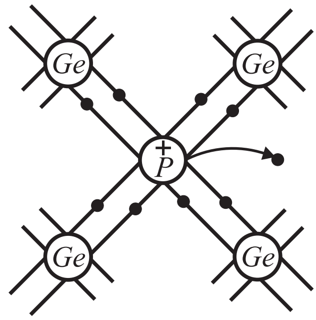
Elektronyň aýrylan ýerinde deşijek emele gelýär. Çyzgyda ol kiçijik boş tegelek bilen aňladylandyr. Boşan ýere, ýagny deşijege golaýdaky baglanyşykdan elektron geçip bilýär. Indiki emele gelen deşijege-de golaýdaky baglanyşykdaky elektron geçip bilýär. Eger kristalda elektrik meýdany döredilse, onda bu hadysalar tertipleşýär. Elektronlar meýdanyň ugrunyň tersine, deşijekler bolsa meýdanyň ugruna baglanyşykdan baglanyşyga geçip, hereket edip başlaýarlar. Netijede, elektronlar we deşijikler bilen döredilen hususy geçirijilik ýüze çykýar.

Ýarymgeçirijide elektronlaryň baglanyşykdan boşamagy bilen bir wagtda (generasiýa) elektronlaryň deşijekleri doldurmak prosesi (rekombinasiýa) hem bolup geçýär. Her temperatura üçin generasiýanyň we rekombinasiýanyň kesgitli gatnaşygy bolýar. Bu gatnaşygy (37.4) formuladan peýdalanyp anyklap bolýar.

37.4. Garyndyly ýarymgeçirijiler

Ýarymgeçirijilerde garyndyly geçirijiligi almak üçin, onuň käbir atomlary walentligi esasy atomlaryňkydan bir birlik tapawutlanýan atomlar bilen çalşyrylýar.

37.6-njy çyzgyda bäş walentli fosforyň atomy garylan dört walentli germaniniň giňişlik gözenegi şekillendirilen.

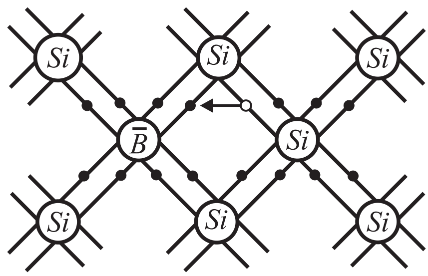


37.6-njy çyzgy

Golaýdaky atomlar bilen kowalent baglanyşygy emele getirmek üçin fosforyň atomyna dört elektron ýeterlik. Bäşinji walent elektrony baglanyşyklara girmeýär. Ýylylyk hereketiniň energiýasynyň hasabyna aňsatlyk bilen atomdan aýrylýar we erkin elektrona öwrülýär.

Şeýlelikde, esasy atomlaryň walentliginden walentligi bir birlige ýokary bolan garyndyly ýarymgeçirijide togy geçirijileriň diňe bir görnüşi bardyr. Ol hem elektronlardyr. Beýle ýarymgeçirijä elektron geçirijilikli ýarymgeçiriji ýa-da *n*-görnüşli ýarymgeçiriji diýilýär. Geçiriji elektronlary berýän garyndy atomlara **donorlar** diýilýär. Indi walentligi esasy atomlaryňkydan bir birlik pes bolan garyndyly ýarymgeçirijä seredeliň (*37.7-nji çyzgy*).

Çyzgyda üç walentli boruň atomyndan garyndysy bolan kremniniň giňişlik gözenegi şertli şekillendirilen. Boruň üç walent elektrony dört sany goňşy atomlar bilen kowalent baglanyşyk etmäge ýeterlik bolmaýar. Şonuň üçin baglanyşyklaryň birine ýene bir elektron ýetmeýär, ýagny deşijek emele gelýär.



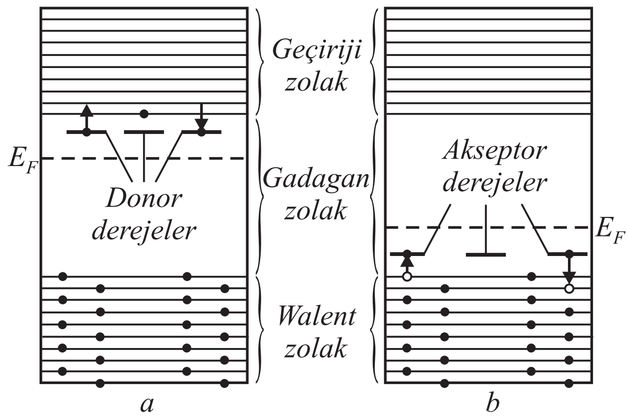
37.7-nji çyzgy

Bu deşijege goňşy baglanyşyklardan elektron geçip bilýär. Şeýle geçişler yzygiderli bolýar we deşijek kristalda erkin hereket edip ýören ýaly ýagdaý döreýär.

Şeýlelikde, walentligi esasy atomlaryňkydan bir birlik pes bolan garyndyly ýarymgeçirijide diňe bir görnüşli tok geçirijiler bolýar. Olar hem deşijeklerdir. Bu ýagdaýda geçirijilige deşijekli geçirijilik diýilýär. Ýarymgeçirijä bolsa, *p*-görnüşli ýarymgeçiriji diýilýär. Deşijekleri emele getirýän garyndylara **akseptor** garyndylar diýilýär.

Garyndylar gözenegiň meýdanyny özgerdýärler we netijede energetiki shemada gadagan zolakda ýerleşen garyndy derejeleri ýüze çykýar. *n* – görnüşli ýarymgeçirijilerde garyndy derejelerine **donor derejeler** diýilýär (*37.8-nji a çyzgy*). *p* – görnüşli ýarymgeçirijilerdäkä bolsa **akseptor derejeler** diýilýär (*37.8-nji b çyzgy*).

Ferminiň derejesi *n* – görnüşli ýarymgeçirijide gadagan zolagyň ýokarky böleginde, *p* – görnüşli ýarymgeçirijide bolsa aşaky böleginde ýerleşýär. Temperatura-



37.8-nji çyzgy

nyň ýokarlanmagy bilen iki görnüşli ýarymgeçirijide-de Ferminiň derejesi gadagan zolagyň ortasyna tarap süýşýär.

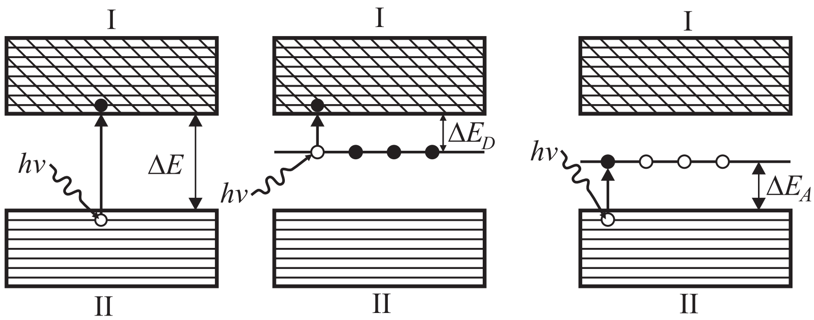
Donor derejeleri walent zolagyň ýokarysyna golaý ýerleşse, ol kristalyň elektrik häsiýetlerine uly täsir edip bilmeýär. Muňa bäşinji walent elektron öz atomy bilen berk baglanyşykda diýip düşünmeli. Haçanda donor derejeleri geçiriji zolaga golaý ýerleşse, onuň kristalyň elektrik häsiýetine täsiri uly bolýar. Sebäbi adaty temperaturalarda hem bäşinji walent elektrony erkin ýagdaýa geçip bilýär, ýagny öz atomyndan aýrylýar. Erkin bolan elektronyň ýene-de atomyň täsirine düşüp, gadagan zolaga gaýdyp gelmegi hem bolup bilýär. Bu ýagdaý 37.8-nji *a* çyzgyda görkezilendir.

Akseptor derejeleri walent zolagyň ýokarsyna golaý ýerleşende kristalyň elektrik häsiýetlerine täsiri güýçlüdir. Elektronyň walent zolakdan akseptor derejä geçmegi deşijegiň emele gelmegine getirýär. Muňa tersleýin geçiş bolsa, garyndy atomyň kowalent baglanyşyklarynyň biriniň bozulandygyna, elektron bilen deşijegiň rekombinasiýasyna degişlidir.

Temperaturanyň ýokarlanmagy bilen garyndynyň döredýän tok geçirijileriniň sany doýgun baha ýetýär. Diýmek, donor derejeleri doly boşaýar we akseptor derejeleriniň ählisi elektronlar bilen doldurylýar. Şol bir wagtda temperaturanyň ýokarlanmagy bilen ýarymgeçirijide hususy geçirijilik ýüze çykyp başlaýar. Şeýlelikde, ýokary temperaturalarda ýarymgeçirijiniň geçirijiligi garyndyly we hususy geçirijileriň jemine deň bolýar. Pes temperaturalarda garyndyly geçirijilik artykmaçlyk edýär. Ýokary temperaturalarda bolsa, hususy geçirijilik artykmaçlyk edýär.

37.5. Ýarymgeçirijilerde fotogeçirijilik

Elektromagnit şöhlesiniň täsiri bilen ýarymgeçirijilerde elektrik geçirijiliginiň ýüze çykmagyna **fotogeçirijilik** diýilýär. Gadagan ΔE zolak deň $h\nu$ energiýaly ýa-da ondan köp energiýaly foton ýarymgeçirijide elektrony walent zolakdan geçiriji



37.9-njy çyzgy

zolaga geçirip bilýär. Netijede, emele gelen elektron we deşijek erkin bolýar we ýarymgeçirijide geçirijilige gatnaşyp bilýär. 37.9-njy çyzgyda $h\nu \geq \Delta E$ fotonyň energiýasynyň hususy ýarymgeçirijide ýuwdulyp hususy fotogeçirijiligiň ýüze çykyşy görkezilen.

Çyzgyda *I* bellikliler geçiriji zolaklary, II bellikliler walent zolaklary aňladýarlar. Garyndyly ýarymgeçirijide fotogeçirijiligiň ýüze çykmagy üçin $h\nu \geq \Delta E_g$ şertiň ýerine ýetmegi ýeterlikdir. Bu ýerde ΔE_g – garyndyly ýarymgeçirijini aktiwleşdirmek üçin gerekli energiýa. Donor ýarymgeçirijilerde foton elektrony donor derejesinden geçiriji zolaga geçirýär (*37.8-nji a çyzgy*). Netijede, ýarymgeçirijide erkin elektronlaryň sany köpelýär. Akseptor ýarymgeçirijilerde foton elektrony walent zolakdan aksentor zolaga geçirýär we netijede deşijekler döreýär. Şeýlelikde, ýarymgeçirijide goşmaça tok geçirijileriň döremeginiň şertini aşakdaky ýaly ýazmak bolar:

$$h\nu \geq \Delta E \text{ – hususy ýarymgeçiriji üçin;}$$
$$h\nu \geq \Delta E_g \text{ – garyndyly ýarymgeçiriji üçin.} \qquad (37.6)$$

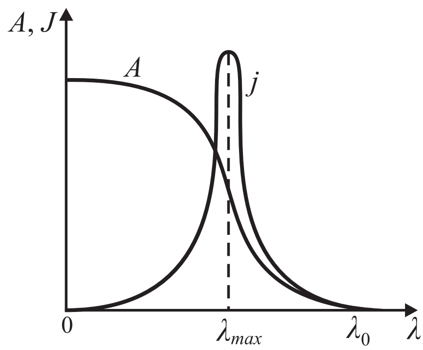
Ýagtylygyň täsiri bilen ýarymgeçirijiniň içinde elektronlaryň erkin ýagdaýa geçmegine **içki fotoeffekt** diýilýär. Fotogeçirijilik ýok mahalyndaky geçirijilige **“garaňkydaky geçirijilik”** diýmek kabul edilendir.

(37.6) şertlerden **fotogeçirijiligiň gyzyl çägini** kesgitläp bolýar. Ol çäk fotogeçirijiligiň ýüze çykyp başlajak iň kiçi ν_0 ýygylygyna ýa-da iň uly λ_0 tolkun uzynlygyna deňdir:

$$\lambda_0 = \frac{ch}{\Delta E} \text{ – hususy ýarymgeçirijiler üçin;}$$

$$\lambda_0 = \frac{ch}{\Delta E_g} \text{ – garyndyly ýarymgeçirijiler üçin.} \qquad (37.7)$$

Arassa ýarymgeçirijiler üçin ΔE aktiwleşdiriji energiýa 3 *eW* töweregi bolýar. Olar üçin fotogeçirijiligiň gyzyl çägi ýagtylyk spektriniň görünýän bölegine gabat gelýär. Garyndyly ýarymgeçirijiler üçin ΔE_g elektronwoltyň ondan bir bölegine golaý bolýar. Olar üçin fotogeçirijiligiň gyzyl çägi spektriň infragyzyl bölegine gabat gelýär.



37.10-njy çyzgy

Fotogeçirijilik, adatça, spektriň giň bolmadyk aralygynda ýüze çykýar. 37.10-njy çyzgyda A ýuwdulma koeffisiýentiniň we j fotogeçirijiligiň ýarymgeçirijä düşýän ýagtylygyň λ tolkun uzynlygyna baglanyşygy görkezilendir.

λ_0-dan (gyzyl çäk) uly tolkun uzynlykly ýagtylyk şöhlesi fotogeçirijiligi döretmeýär. Tolkun uzynlygynyň λ_{max} bahasynda iň uly fotogeçirijilik döreýär. Tolkun uzynlygynyň bahasy λ_{max}-den kiçeldigiçe, fotogeçirijilik hem kiçelýär we käbir bahada nola deň bolýar. Diýmek, (37.6) şert zerur şert bolsa-da, ýeterlik şert bolup bilmeýär. Bu ýerde ýuwdulan ýagtylyk energiýasy tok geçirijileri döretmäge sarp bolman, başga oýandyryjy mehanizme sarp bolýar. Ol mehanizm eksitonyň ýüze çykmagydyr.

Atom gadagan zolagyň giňliginden kiçi energiýa bilen oýandyrylanda **eksiton** diýlip atlandyrylýan kwazibölejikler ýüze çykýar. Ol kristalda tolkun görnüşinde ýaýraýar. Eksitonyň ýaýramasy elektrik zarýadynyň we massanyň hereketi bilen baglanyşykly däldir. Elektrik taýdan neýtral bolany üçin ýarymgeçirijilerde goşmaça elektrik geçirijiligini döretmeýär. Fotogeçirijilik ýüze çykmaýar.

Kristalda eksitonyň konsentrasiýasy has ýokary bolanda ýarymgeçirijiniň häsiýetlerine täsir etjek hadysalaryň ýüze çykmagy mümkin. Ýöne bu mesele entek doly öwrenilen däldir.

Ilkinji gezek tejribede eksiton türkmen alymy N.A. Garryýew tarapyndan 1951-nji ýylda açyldy.

37.6. Gaty jisimleriň lýuminessensiýasy

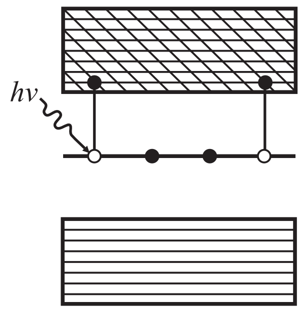
Birnäçe maddalar görünýän ýagtylyk, ultramelewşe, rentgen we gamma şöhleleri bilen şöhlelendirilende, elektronlaryň ýa-da beýleki bölejikleriň akymy düşende, mehaniki täsirleriň, himiki prosesleriň täsiri netijesinde şöhlelenýär. Bu hadysa **lýuminessensiýa** diýilýär.

Lýuminessensiýanyň has aýratyn tarapy onuň dowamlylygynyň ýagtylyk yrgyldylaryň periodyndan has ýokarylygydyr. Lýuminessensiýany ýagtylygyň pytramasyndan we serpikmesinden, tormozlamadaky şöhlelenmeden, Wawilow-Çerenkowyň şöhlelenmesinden tapawutlandyrmak üçin S. I. Wawilow tarapyndan dowamlylygyň şerti girizildi.

Jisimler islendik temperaturada lýuminessensiýany ýüze çykaryp bilýärler. Şonuň üçin oňa **sowuk şöhlelenme** hem diýilýär. Lýuminessensiýa ukyply maddalara **lýuminoforlar** diýilýär. Kristal lýuminoforlara seredeliň.

Keseki atomlaryň ýa-da düwünlerde boşluklaryň bolmagy sebäpli bozulmadyk, dogry kristallik gözenekli kristallarda, adatça, lýuminessensiýa ýüze çykmaýar. Lýuminensiýa häsiýetini bermek üçin madda aktiwleşdiriji keseki atomlar garylýar. Onuň mukdary göterimiň ýüzden birinden köp bolmaýar. Şeýle usul bilen taýýarlanan ýokary lýuminessent häsiýetli maddalara **kristallofosforlar** diýilýär. Olar ýagtylygyň, elektronlaryň akymynyň, elektrik togunyň täsiri bilen lýumenessensiýany ýüze çykaryp bilýärler.

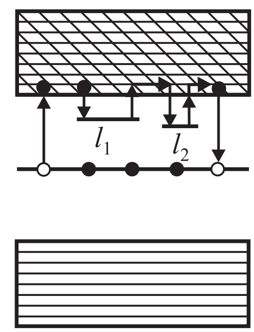
Kristallofosforyň mysalynda gaty jisimleriň zolaklar teoriýasynyň nukdaý nazaryndan lýuminessensiýanyň ýüze çykyşynyň mehanizmine seredeliň. Kristallofosforyň walent zolagy bilen geçiriji zolagynyň arasynda aktiwleşdiriji taryndynyň energetiki derejeleri ýerleşýär (*37.11-nji çyzgy*).



37.11-nji çyzgy

Aktiwleşdirijiniň atomy $h\nu$ energiýaly bir fotony ýuwdanda elektron taryndynyň derejesinden geçiriji zolaga geçýär we tä aktiwleşdirijiniň ionyna düşýänça kristalda erkin hereket edýär. Iona gabat gelende bolsa rekombinirlenýär we taryndynyň derejesine geçýär. Bu geçiş sebäpli lýuminessent şöhlelenmesi bolýar. Lýuminoforyň ýagtylanyşynyň dowamlylygy aktiwleşdirijiniň täsiri bilen atomyň oýandyrylan halynyň dowamlylygy bilen kesgitlenýär. Ol bolsa sekundyň milliarddan bir böleginden uly bolmaýar. Şonuň üçin ýagtylanma gysga wagtlaýyn bolýar we daşky şöhlelenme kesilenden soň örän tiz kesilýär.

Uzak wagtlap şöhlelenmäniň ýüze çykmagy üçin (fosforessensiýa) kristallofosforda **tutujy merkezler** ýa-da **saklaýjylar** bolýar. Olar doldurylmadyk çäklendirilen derejelerde (meselem, l_1 we l_2) geçiriji zolagyň aşak ýanynda ýerleşýärler (*37.12-nji çyzgy*).



37.12-nji çyzgy

Saklaýjylar taryndy atomlar, düwünleriň arasyndaky atomlar we beýlekiler tarapyndan döredilýär. Ýagtylygyň täsiri bilen aktiwleşdirijiniň atomy oýandyrylýar we elektronlar taryndynyň derejesinden geçiriji zolaga geçip – erkin hala geçýärler. Ýöne olar saklaýjylar tarapyndan eýelenýärler we hereketini ýitirýärler. Şol sebäpli aktiwleşdirijiniň ionlary bilen rekombinasiýa girip bilmeýärler. Elektronyň saklaýjydan çykmagy üçin energiýa gerek bolýar. Ol energiýany bolsa elektronlar gözenegiň ýylylyk sebäpli yrgyldysyndan alyp bilýärler.

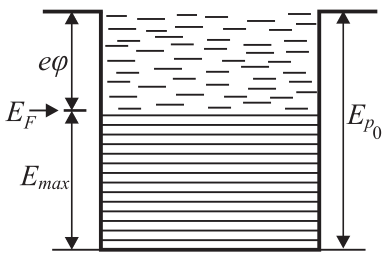
Saklaýjydan sypan elektron tä ýene-de saklaýja düşýänçä ýa-da aktiwleşdirijiniň iony bilen rekombinasiýa bolýança kristalda hereketini dowam etdirýär. Bu rekombinasiýanyň netijesinde lýuminessent şöhlelenmesi bolýar. Bu prosesiň dowamlylygy elektronyň saklaýjyda bolan wagty bilen kesgitlenýär. Diýmek, saklaýjylar ýagtylandyryşyň dowamlylygyny uzaldýar. Saklaýjylar bolanda lýumenissent ýagtylandyryşyň dowamlylygy 1 *mks*-den birnäçe sagada çenli bolup bilýär.

Lýumenissent hadysasy şöhlelenmäniň häsiýetleri boýunça maddanyň düzümini kesgitlemek, detallardaky örän kiçi şikesleri tapmak üçin ulanylýar.

Mundan başga-da, kristallofosforlar elektron-şöhle turbalarynda (meselem, telewizorlarda), gündiz ýagtylygynyň çyralarynda, rentgen gurluşlarynyň ýagtylanýan ekranlarynda, zarýadly bölejikleri hasaplaýan gurluşlarda we başga-da birnäçe maksatlar üçin ulanylýar.

37.7. Kontakt hadysalary

Metaldan walent elektronlaryň goparylyp aýrylmagy üçin oňa çykyş işine deň bolan energiýa bermeli. Onda metal walent elektronlary üçin potensial çukurdyr diýen netijä gelmek bolýar. Şonuň üçin hem walent elektronlaryň metalyň içindäki energiýasy olaryň metalyň daşyndaky energiýasyndan kiçidir. Bu tapawudy potensial çukuryň çuňlugy hökmünde almak bolar. Energiýanyň özgermesi birnäçe atom gatlaklarynyň dowamynda, ýagny gysga aralykda bolup geçýär. Şonuň üçin potensial çukuryň diwarlaryny wertikal hasaplap bolar (*37.13-nji çyzgy*).



37.13-nji çyzgy

Çyzgyda potensial çukuryň içine geçiriji zolagyň energetiki derejeleri ýerleşdirilendir. Elektronyň metalyň çäginden çykyp gitmegi üçin dürli elektronlara dürli energiýalary bermeli bolýar. Meselem, geçiriji zolagyň iň aşaky gatlagynda ýerleşen elektrona E_{p_0} energiýa bermeli. Ferminiň derejesinde ýerleşen elektrona bolsa $E_{p_0} - E_{\max} = E_{p_0} - E_F$ energiýany bermek ýeterlik bolýar.

Çykyş işi $e\varphi$ görnüşde hem bellenýär. Bu ýerde φ – çykyş potensialy. Bularyň esasynda metaldan elektronyň çykyş işini

$$e\varphi = E_{p_0} - E_F \qquad (37.8)$$

aňlatma bilen kesgitlemek bolar. Bu aňlatma 0 K temperatura degişlidir, ýöne beýleki temperaturalar üçin hem (37.8) formulany ulanmak bolar.

Ferminiň derejesi temperatura baglydyr. Mundan başga-da, atomlaryň arasyndaky uzaklyk ýylylykdan giňelmäniň hasabyna ulalýar. Şu sebäplere görä çykyş işi temperatura bagly biraz üýtgeýär.

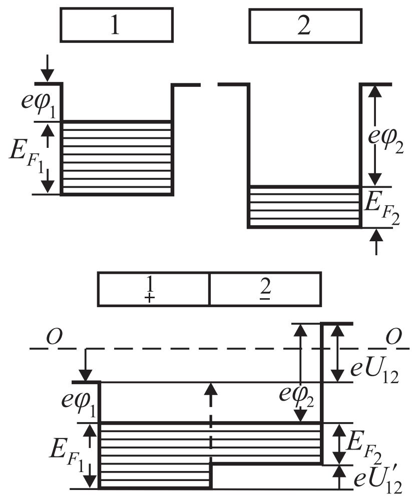
Kontakt potensiallarynyň tapawudy. Iki dürli metal kontakta getirilende olaryň arasynda potensiallaryň tapawudy döreýär. Oňa kontakt **potensiallarynyň tapawudy** diýilýär. Onuň döremeginiň sebäbi metallaryň kontaktynda bir metaldan beýleki metala elektronlaryň belli bir mukdary geçýär. 37.14-nji çyzgyda iki metalyň kontaktyndan öňki we soňky energetiki derejeleri görkezilýär.

Çyzgynyň aşaky böleginde elektronyň potensial energiýasynyň grafigi görkezilendir. Birinji metal üçin Ferminiň derejesi ikinji metaldakydan ýokarda hasaplanýar.

Bu metallaryň arasynda kontakt bolanda birinji metalyň ýokarky derejesindäki elektronlar ikinji metaldaky pes derejelere geçip başlaýar. Netijede, birinji metalyň potensialy artýar, ikinjiniňki bolsa peselýär. Degişlilikde, elektronyň potensial energiýasy bolsa birinji metalda azalýar, ikinjide köpelýär. Sebäbi metalyň potensial energiýasy bilen elektronyň potensial energiýalarynyň alamatlary garşylyklydyr. Kontakta getirilen metallar üçin deňagramlylygyň şerti Ferminiň derejesine degişli doly energiýalaryň deňligidir. Bu tekrarlama ýarymgeçirijileriň kontakty üçin hem, metalyň we ýarymgeçirijiniň kontakty üçin hem dogrudyr. Bu şertde iki metal üçin hem Ferminiň derejeleri deň belentlikde ýerleşýär. 37.14-nji çyzgydan görnüşli ýaly, bu şertde Ferminiň derejesi birinji metalyň üstüne golaý ýerlerde elektronyň potensial energiýasy ikinji metalyňky bilen deňeşdirilende $e\varphi_2 - e\varphi_1$ ululykça kiçidir. Onda birinji metalyň üstündäki potensial ikinji metalyňky bilen deňeşdirilende

$$U_{12} = \frac{e\varphi_2 - e\varphi_1}{e} = \varphi_2 - \varphi_1 \qquad (37.9)$$

ululykça ýokarydyr. U_{12} ululyk birinji metal bilen ikinji metalyň arasyndaky **kontakt potensiallarynyň tapawudydyr**. 37.9-njy deňlikdäki potensiallaryň tapawudy metallaryň üst gatlagynyň daşynda, metallara golaý ýerleşen nokatlaryň potensiallarynyň tapawudydyr. Şonuň üçin hem oňa **kontaktyň daşky potensiallarynyň tapawudy** diýilýär.



37.14-nji çyzgy

Metallaryň içki nokatlarynyň arasynda hem potensiallaryň tapawudy bardyr. Oňa **kontaktyň içki potensiallarynyň tapawudy** diýilýär. 37.14-nji çyzgydan görnüşi ýaly, birinji metalda elektronyň potensial energiýasy ikinji metaldaky elektronyň potensial energiýasyndan $E_{F_1} - E_{F_2}$ ululykça kiçidir. Onda birinji metalyň içki potensialy ikinji metalyňkydan

$$U'_{12} = \frac{E_{F_1} - E_{F_2}}{e} \qquad (37.10)$$

ululykça ýokarydyr. Bu aňlatma kontaktyň içki potensiallarynyň tapawudyny aňladýar. Birinji metaldan ikinjä geçilende potensial şunça ululyga peselýär.

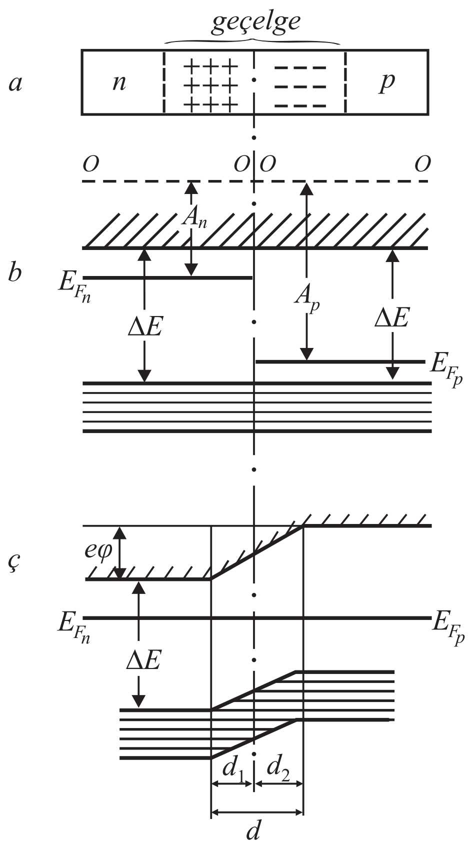
Umuman, kontaktyň potensiallarynyň tapawudy diýlende daşky potensiallaryň tapawudy göz öňünde tutulýar.

37.8. Elektron we deşijekli ýarymgeçirijileriň kontakty

n-tipli we *p*-tipli ýarymgeçirijileriň kontaktynda emele gelýän gurluşa *p-n*-geçiş ýa-da ýarymgeçirijili diod diýilýär. Şeýle geçişi bir ýarymgeçiriji kristalyň göwrüminde iki tipli geçirijiligi ýüze çykarmak arkaly döretmek bolýar. Meselem, elektron geçirijili örän arassa germaniniň monokristalynyň bir tarapyna indiniň atomlary ornaşdyrylýar. Bu proses 500°C töweregi temperaturada wakuumda ýa-da inert gazynyň atmosferasynda amala aşyrylýar. Şeýle edilende indiniň atomlary germaniniň kristalynyň bir tarapyna ornaşyp şol tarapda deşijekli geçirijiligi döredýär. Bu oblastlaryň araçäginde *p-n*-geçiş emele gelýär.

p-oblastda, garyndy atomlaryň elektronlary baglanyşyklara alynmagy sebäpli, esasy tok geçirijiler deşijekler bolýar. Otrisatel zarýadly ionlar akseptorlar bolup hyzmat edýär. Mundan başga-da, *p*-oblastda ýylylygyň täsiri bilen walent zolaga geçen az sanly elektronlar bolýar. Olaryň emele gelmegi öz gezeginde deşijekleriň sanyny artdyrýar.

n-oblastda esasy tok geçirijiler elektronlardyr. Bu ýerde hem ýylylyk hereketleriniň hasabyna walent zolakdan geçiriji zolaga elektronlaryň geçýänligi üçin az sanly deşijekler emele gelýär.



37.15-nji çyzgy

Ýarymgeçirijiniň *n*-böleginde elektronlaryň gürlügi ýokary bolany üçin olaryň bir bölegi *p*-bölege geçýär. Deşijekleriň bir bölegi *n*-bölege geçýär. Netijede, *p-n*-geçişiň bir tarapynda elektronly, beýleki tarapynda deşijekli göwrümleýin zarýadlar emele gelýär (*37.15-nji a çyzgy*).

Bu göwrümleýin zarýadlaryň gatlaklary *n*-bölekden *p*-bölege tarap gönükdirilen elektrik meýdanyny emele getirýär. Bu meýdan belli bir çäkde elektronlaryň we deşijekleriň geçmegini togtadýar. Eger *n* we *p*-tipli ýarymgeçirijilerde donorlaryň we akseptorlaryň sany deň bolsa, onda garşylykly tarapa geçen zarýadlaryň gatlaklarynyň d_1 we d_2 galyňlyklary deň bolýar (*37.15-nji ç çyzgy*).

p-n-geçişi emele getirýän ýarymgeçirijileriň aýratynlykda energetik derejeleri 37.15--nji *b* çyzgyda görkezilen.

Çyzgyda A_n – donor ýarymgeçirijiniň çykyş işi, E_{F_n} – donor ýarymgeçirijide Ferminiň derejesi, A_p we E_{F_p}, degişlilikde akseptor ýarymgeçiriji üçin çykyş işi we Ferminiň derejesi.

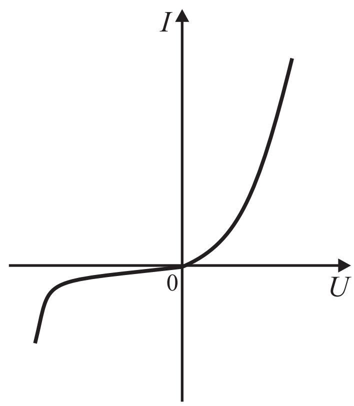
p-n-geçişiň käbir galyňlygynda deňagramly ýagdaý emele gelýär. Bu ýagdaý bolsa Ferminiň derejeleriniň deňleşmegi bilen häsiýetlendirilýär (*37.15-nji ç çyzgy*). *p-n*-geçişiň araçäginde energetiki zolaklar egrelýär we netijede, elektronlar we deşijekler üçin potensial bökdenç emele gelýär. Potensial bökdenjiň beýikligi $e\varphi$ iki ýarymgeçirijiniň başlangyç Fermi derejeleri bilen kesgitlenýär.

Akseptor ýarymgeçirijiniň ähli energetiki derejeleri donor ýarymgeçirijiniňkä görä $e\varphi$ ululykça ýokarda durýar. Bu ýokarlanma ikileýin gatlagyň d ininiň dowamynda bolup geçýär.

Ýarymgeçirijileriň *p-n*-geçişiniň d galyňlygy $10^{-6} - 10^{-7}$ *m* töweregi bolýar. Gatlakdaky potensiallaryň tapawudy bolsa, takmynan woltuň ondan bir bölegine deň bolýar. Togy geçirijiler adaty temperaturalarda bu potensiallaryň tapawudyny ýeňip geçip bilmeýär. Diýmek, adaty temperaturalarda *p-n*-geçişe örän uly elektrik garşylykly **ýapyjy gatlak** diýip bolar.

Ýapyjy gatlagyň garşylygyny daşky elektrik meýdanyny goýmak bilen üýtgedip bolýar. Goýlan naprýaženiýe *n*-ýarymgeçirijiden *p*-ýarymgeçirijä gönükdirilen bolsa, ýagny kontaktyň meýdany bilen gabat gelýän bolsa, onda ol *n*-ýarymgeçirijiniň elektronlaryny we *p*-ýarymgeçirijiniň deşijeklerini garşylykly taraplara hereket etmäge mejbur edýär. Netijede, ýapyjy gatlak giňelýär we onuň garşylygy köpelýär. Ýapyjy gatlagy giňeldýän naprýaženiýe **ýapyjy** ýa-da **tersleýin naprýaženiýe** diýilýär. *p-n*-geçişde bu ugur boýunça tok geçmeýär diýip hasaplamak bolýar.

p-n-geçişe kontaktyň meýdanynyň ugruna garşylykly ugrukdyrylan daşky meýdan goýulsa, ol *n*-ýarymgeçirijidäki elektronlary we *p*-ýarymgeçirijidäki deşijekleri biri-biriniň garşysyna herekete getirýär. *p-n*-geçişiň göwrüminde olar rekombinasiýa geçýärler. Netijede, kontakt gatlagy ýukalyp başlaýar we onuň garşylygy azalýar. Bu ugur boýunça elektrik togy oňat geçýär. Bu ugra goýberiji ýa-da göni ugur diýilýär.



37.16-njy çyzgy

Diýmek, *p-n*-geçişiň **birtaraplaýyn (wentil) geçirijiligi** bardyr. 37.16-njy çyzgyda *p-n*-geçişdäki göni we tersleýin toklaryň daşky naprýaženiýe bilen baglanyşygy görkezilen.

Bu baglanyşyga *p-n*-geçişiň wolt-amper häsiýetnamasy diýilýär. *p-n*-geçişiň garşylygynyň göni we tersleýin ugurlar boýunça dürli bolmagy ony üýtgeýän togy göneltmek üçin ulanmaga mümkinçilik berýär.

VIII bölüm

ATOM ÝADROSYNYŇ FIZIKASYNYŇ ESASY DÜŞÜNJELERI

XXXVIII BAP. ÝADRO FIZIKASYNYŇ ELEMENTLERI

38.1. Atom ýadrosynyň düzümi, zarýady we ölçegleri. Massa we zarýad sanlary

Tejribeleriň netijesinde atomyň položitel zarýadly ýadrodan we ony gurşap alan elektronlardan durýandygy anyklandy. Ýadronyň ölçegleri, takmynan $10^{-14} - 10^{-15}$ *m*. Atomyň ölçegleri bolsa 10^{-10} *m* töweregi.

Atomyň ýadrosy **protonlardan** we **neýtronlardan** durýar. Bular elementar bölejiklere degişlidir. Protonyň elektronyň zarýadyna san taýdan deň, ýöne položitel zarýady bardyr. Protonyň dynçlykdaky massasy $m_p = 1{,}6726 \cdot 10^{-27}$ *kg*. Neýtron zarýadsyz bölejikdir. Onuň dynçlyk massasy $m_n = 1{,}6749 \cdot 10^{-27}$ *kg*. Protonlara we neýtronlara **nuklonlar** diýilýär. Nuklonlaryň sanyna **massa sany** diýilýär.

Ýadro Ze deň bolan zarýad bilen häsiýetlendirilýär. Bu ýerde e-protonyň zarýady, Z – ýadronyň **zarýad sany**. Bu san ýadrodaky zarýadlaryň sanyna deňdir. Ol himiki elementleriň Mendeleýewiň periodiki sistemasyndaky tertip nomeri bilen gabat gelýär. Häzirki wagtda 118 himiki element bellidir. Diýmek, zarýad sany 1-den 118-e çenli bahalary kabul edýär.

Ýadro berlen himiki elementiň esasy aýratynlyklaryny kesgitleýär, ýagny atomdaky elektronlaryň sanyny, olaryň gatlaklar boýunça ýerleşişini we atomdaky elektrik meýdanynyň häsiýetlerini kesgitleýär.

Ýadro ${}_Z^AX$ belgi bilen bellenýär. Bu ýerde X – himiki elementiň belgisi, Z – ýadrodaky protonlaryň sany, A – massa sany (ýadrodaky protonlaryň we neýtronlaryň sany). Z belgisi boýunça deň, A belgisi boýunça tapawutly bolan ýadrolara izotoplar diýilýär. A belgisi boýunça deň, Z belgisi boýunça tapawutly ýadrolara izobarlar diýilýär. Izobarlarda neýtronlaryň $N = A - Z$ sany deň däldir. Meselem, wodorodyň üç izotopy bardyr: ${}_1^1H$ – protiý ($Z = 1, N = 0$); ${}_1^2H$ – deýteriý ($Z = 1, N = 1$); ${}_1^3H$ – tritiý ($Z = 1$, $N = 2$). Şol bir himiki elementiň izotoplarynyň himiki we fiziki häsiýetleri, köplenç, ýagdaýlarda, meňzeşdir. Izobarlara ${}_4^{10}Be$, ${}_5^{10}B$, ${}_6^{10}C$ ýadrolar mysal bolup bilýär. Izotoplaryň we izobarlaryň belli bolanlarynyň sany 1500-den geçýär.

Ýadronyň radiusyny

$$R = R_0 A^{\frac{1}{3}} \tag{38.1}$$

formula bilen hasaplap bolýar. Bu ýerde $R_0 = (1{,}3 \div 1{,}7) \cdot 10^{-15}\, m$. Formuladan görnüşi ýaly, ýadronyň radiusy boýunça hasaplanan göwrümi nuklonlaryň sanyna göni bagly. Şonuň üçin hem ýadrolaryň dykyzlygy $\sim 10^{17} \dfrac{kg}{m^3}$.

38.2. Baglanyşyk energiýasy we ýadronyň massasy

Häzirki döwürde ýadronyň massasyny ýokary takyklykda ölçemäge tehniki mümkinçilikler bardyr. Ýokary takyklykda netije berýän mass-spektrometriň kömegi bilen geçirilen ölçegleriň netijeleri ýadronyň massasynyň ony düzýän nuklonlaryň massalarynyň jeminden kiçidigini görkezdi. Massanyň islendik Δm üýtgemesine bolsa

$$\Delta E = \Delta mc^2 \tag{38.2}$$

formula bilen kesgitlenýän energiýanyň ΔE üýtgemesi degişlidir. Diýmek, ýadro emele gelende energiýa bölünip çykmalydyr. Bu ýerden, energiýanyň saklanma kanuny boýunça ýadrony dargatmak üçin ol emele gelende bölüp çykarýan energiýasyna deň bolan energiýany sarp etmelidigi gelip çykýar. Ýadrony aýra-aýra nuklonlara bölmek üçin gerek bolan energiýa **baglanyşyk energiýasy** diýilýär. Ol ýadronyň berkligini häsiýetlendirýän wajyp görkezijidir.

Ýadrodaky nuklonlaryň baglanyşyk energiýasyny (38.2) aňlatmanyň esasynda

$$E_{bag.} = [Zm_p + (A - Z)m_n - m_{ý}]c^2 \tag{38.3}$$

görnüşde ýazmak bolar. Bu ýerde m_p, m_n, $m_{ý}$, degişlilikde protonyň, neýtronyň we ýadronyň massalary.

Ýadronyň baglanyşyk energiýasynyň m_a atomyň massasynyň birliginiň üsti bilen aňladylyşy

$$E_{bag.} = [Zm_{\mathrm{H}} + (A - Z)m_n - m_a]c^2 \tag{38.4}$$

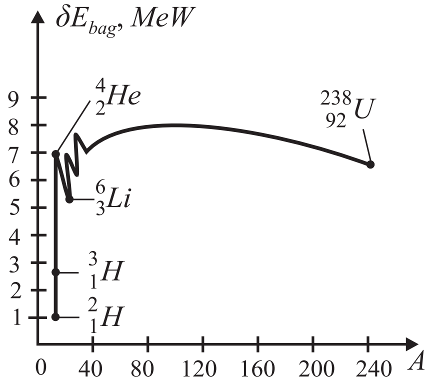
görnüşde bolýar. Bu ýerde m_{H} – wodorodyň atomynyň massasy. (38.3) we (38.4) formulalar bilen geçirilen hasaplar deň netije berýär.

Massalaryň tapawudyny kesgitleýän

$$\Delta m = \lfloor Zm_p + (A - Z)m_n \rfloor - m_{ý} \tag{38.5}$$

ululyga ýadronyň **massa şikesi (deffekti)** diýilýär. Bu görkeziji nuklonlardan ýadro emele gelende ýadronyň massasynyň nuklonlaryň massalarynyň jeminden näçe ululyga üýtgeýändigini (kiçelýändigini) görkezýär.

Köplenç ýagdaýlarda bir nuklona düşýän **baglanyşyk energiýasyndan**, ýagny $\delta E_{bag.}$ udel baglanyşyk energiýasyndan peýdalanylýar. Bu ululygyň elementiň A massa sanyna baglanyşygy 38.1-nji çyzgyda görkezilendir.



38.1-nji çyzgy

Massa sany A = 12-ä çenli bolan ýeňil ýadrolar üçin udel baglanyşyk energiýasy dürli böküşler bilen güýçli artýar we onuň bahasy 6 – 7 *MeW*-e çenli ýetýär. Soňra onuň depgini gowşaýar we A = 50 bahanyň töwereginde iň uly baha (8,7 *MeW*) ýetýär. Massa sany A = 60-dan ýokary bolan ýadrolar üçin udel baglanyşyk energiýasy azalyp başlaýar.

Mysal üçin, $^{238}_{92}$U ýadro üçin onuň bahasy 7,6 *MeW* bolýar. 38.1-nji çyzgydan görnüşi ýaly, onuň durnuklylygy elementleriň periodik sistemasynyň ortasynda ýerleşen elementleriň ýadrolarynyň durnuklylygyndan pesdir. Diýmek, agyr ýadrolary dargatmak ýa-da ýeňil ýadrolary birleşdirmek hadysalary energetiki nukdaý nazardan amatlydyr. Sebäbi bu iki hadysanyň ikisinde hem ummasyz uly energiýa bölünip çykýar. Häzirki döwürde bu usullar bilen ýadro energiýasyny almak amala aşyrylýar.

38.3. Ýadro güýçleri. Ýadronyň modelleri. Ýadronyň spini we magnit momenti

Ýadrony düzýän nuklonlaryň arasynda özboluşly dartyşma güýçleri bardyr. Olara **ýadro güýçleri** diýilýär. Ýadro güýçleri Kulonyň itekleşme güýçlerinden has uludyr we şonuň üçin nuklonlaryň köplügini ýadro görnüşinde saklap bilýär.

Ýadro güýçleri grawitasiýa, elektrik hem-de magnit güýçlerine degişli däldir we olardan artykmaçdyr. Bu güýçler **güýçli özara täsirleşmä** degişli bolmak bilen aýratyn tebigata eýedir.

Ýadro güýçleriniň esasy häsiýetleri:

1. Ýadro güýçleri dartyşma güýçleridir. Olar diňe gysga aralyklarda (~10^{-15} *m*) ýüze çykýarlar.

2. Ýadro güýçleri täsirleşýän nuklonlaryň zarýadyna bagly däldir. Iki protonyň, iki neýtronyň ýa-da proton bilen neýtronyň arasynda ýüze çykýan güýçler deňdir. Bu güýçleriň tebigaty elektrik häsiýetli däldir.

3. Ýadrodaky her nuklon diňe özüne golaý ýerleşen birnäçe nuklonlar bilen täsirleşmäge ukyplydyr. Şu sebäbe görä nuklonlaryň udel baglanyşyk energiýasy nuklonlaryň sanyna görä köpelmeýär. Ol, takmynan hemişelik galýar.

4. Ýadro güýçleri täsirleşýän nuklonlaryň spinleriniň giňişlikdäki ugurlaryna bagly bolýar. Meselem, proton bilen neýtron diňe spinleri parallel ýerleşende deýtron (wodorodyň ýadrosynyň izotopy) emele getirip bilýär.

5. Ýadro güýçleri merkezi güýç däldir, ýagny olar täsirleşýän nuklonlaryň merkezlerini birikdirýän göni çyzyk boýunça täsirleşmeýärler.

Ýadro güýçleriniň tebigaty örän çylşyrymly bolany üçin atom ýadrosynyň kesgitli teoriýasy şu wagta çenli doly işlenip düzülmedik.

Şu sebäbe görä ýadronyň käbir häsiýetleri öwrenilende bir görnüşdäki model, beýleki bir häsiýetleri öwrenilende bolsa, başga görnüşdäki model ulanylýar. Model saýlanyp alnanda onuň öwrenilýän häsiýetleri düşündirip bilşi we matematiki baglanyşyklary ulanmaga mümkinçilik berşi hasaba alynýar. Olardan erkana parametrleri ulanýan we tejribeleriň maglumatlary bilen ylalaşýany **damja** we **gatlakly** modellerdir.

Ýadronyň damja modeli N. Bor we Ý. I. Frenkel tarapyndan (1936) girizildi. Ol ýadronyň ilkinji modelidir. Bu modelde ýadrodaky nuklonlar suwuklygyň damjasyndaky molekulalara meňzeşdir. Ýadro güýçleri we suwuklygyň molekulalarynyň arasyndaky güýçler gysga aralykdaky täsirlenişe degişlidir. Suwuklygyň damjasyna hemişelik dykyzlyk mahsusdyr. Atom ýadrosyna bolsa, hemişelik udel baglanyşyk energiýasy we nuklonlaryň sanyna garamazdan hemişelik dykyzlyk mahsusdyr. Dykyzlyk bolsa damjanyň göwrümindäki, ýadronyň göwrümindäki bölejikleriň sanyna göni baglydyr. Ýadronyň bu modeliniň damjadan has aýratyn tarapy ýadro kwant mehanikasynyň kanunlaryna boýun egýän zarýadly bölejikleriň toplumy ýaly seredilýär. Ýadronyň damja modeli ýadrodaky nuklonlaryň baglanyşyk energiýasy üçin formulany almaga mümkinçilik berdi. Şeýle-de, ol ýadro reaksiýalarynyň mehanizmini düşündirdi.

Ýadronyň gatlakly modeli amerikan fizigi M. Geppert we nemes fizigi H.Iýensen tarapyndan işlenip taýýarlanyldy. Bu modele görä nuklonlar ýadroda dürli diskret energetiki derejeleri bolan gatlaklar boýunça, Pauliniň prinsipi boýunça paýlanan görnüşde ýerleşýär. Bu derejeleriň doldurylyşy bilen ýadronyň durnuklylygy kesgitlenýär. Ähli gatlaklary doly doldurylan ýadrolar has durnukly hasaplanýar. Şeýle ýadrolar hakykatdan-da tebigatda bardyr. Olara **magiýaly („jadyly“)** ýadrolar diýilýär. Protonlarynyň ýa-da neýtronlarynyň sany 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 bolan ýadrolaryň has durnuklydygy, ýagny magiýalydygy tejribede anyklanandyr. Protonlarynyň we neýtronlarynyň sany hem magiýaly ýadrolara ikileýin magiýaly ýadrolar diýilýär. Olara diňe bäş ýadro degişlidir: $^{4}_{2}He$, $^{16}_{8}O$, $^{40}_{20}Ca$, $^{48}_{20}Ca$, $^{208}_{82}Pb$.

Gatlakly model ýadronyň spinini we magnit momentini, ýadrolaryň dürli durnuklylygy ýüze çykarşyny, şeýle-de onuň häsiýetleriniň periodik üýtgeýşini düşündirdi.

Ýadronyň spini nuklonlaryň spinleriniň üsti bilen kesgitlenýär. Her nuklonyň spini $\frac{1}{2}$-e deň. Şonuň üçin nuklonlaryň sany jübüt bolanda ýadronyň spini bitin sana deň bolýar. Nuklonlaryň sany täk bolanda ýarymly sana deň bolýar (mesele, 1,5; 2,5 we ş.m.). Ýadronyň spini birnäçe birlikden ýokary bolmaýar. Sebäbi ýadrodaky nuklonlaryň köpüsi biri-biriniň spinlerini kompensirleýär. Jübüt-jübüt spinli, ýagny protonlarynyň hem neýtronlarynyň hem sany jübüt ýadrolaryň spini nola deň bolýar.

Atom ýadrosynyň spinden başga-da, magnit momenti bardyr. Elektronyň magnit momentiniň ölçeg birligi **Boruň magnetonydyr:**

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} = 9,2741 \cdot 10^{-24}\,\frac{J}{Tl}.$$

Bu gatnaşykdaky m_e elektronyň massasynyň ornuna protonyň m_p massasy goýlup, ýadro magnetony hasaplanýar:

$$\mu_{\acute{y}} = \frac{e\hbar}{2m_p} = 5,0508 \cdot 10^{-27}\,\frac{J}{Tl}.$$

Ýadro fizikasynda bu ululyk ýadronyň magnit momentini ölçemek üçin ulanylýar. Ýadro magnetonynyň Boruň magnetonyna gatnaşygy $\frac{m_B}{m_{\acute{y}}} = 1836$ bolýar. Şonuň üçin atomyň magnit momenti, esasan, elektronlaryň magnit häsiýetleri bilen kesgitlenýär.

38.4. Radioaktiwlilik. Radioaktiw dargamanyň kanuny

Elementar bölejikleri goýbermek bilen bir atom ýadrosynyň beýleki ýadro öz-özünden öwrülmegine radioaktiwlik diýilýär. Beýle öwrülme diňe durnukly däl ýadrolarda bolup geçýär. Radioaktiwlik hadysanyň: 1) α – dargama; 2) β – dargama; 3) ýadronyň γ – şöhlelenmesi; 4) agyr ýadrolaryň öz-özünden dargamasy; 5) proton radioaktiwligi diýen görnüşleri bar.

Tebigy şertde bar bolan ýadrolardaky ýüze çykýan radioaktiwlige **tebigy radioaktiwlik** diýilýär. Ýadro reaksiýasynyň netijesinde alnan ýadronyň radioaktiwligine **emeli radioaktiwlik** diýilýär. Tebigy we emeli radioaktiwlikleriň arasynda düýpli tapawut ýokdur. Olaryň ikisi hem şol bir kanunlara boýun bolýarlar.

Tebigy radioaktiwlik fransuz fizigi Bekkerel tarapyndan (1896 ý.) uranyň duzlarynyň lýumenissensiýasy öwrenilende açyldy. Radioaktiwligi öwrenmäge P.Kýuri we M.Skladowskaýa-Kýuri uly goşant goşdular. Bularyň işleriniň netijesinde radioaktiw şöhlelenmäniň üç görnüşiniň bardygy äşgär edildi. Olaryň birine α – şöhle diýilip at berildi we onuň magnit meýdanynda gyşarmasy öwrenilip položitel zarýadly bölejiklerdigi belli edildi. β – şöhle diýip atlandyrylan ikinji şöhläniň magnit meýdanyndaky gyşarmasy otrisatel zarýadlydygyny görkezdi. Soňra olaryň elektronlaryň akymydygy belli boldy. γ – şöhle diýilýän üçünji şöhläniň magnit meýdanynda gyşarmaýandygy belli edildi. Soňraky derňewler γ – şöhläniň gysga tolkun uzynlykly ($10^{-4} \div 0,1$ *nm*) elektromagnit şöhlelenmesidigini belli etdi.

Radioaktiw dargamada her bir aýratyn alnan ýadronyň dargamagynyň beýleki ýadrolar bilen baglanyşyksyz bolup geçýändigi nazara alnyp, statistiki usullardan peýdalanylyp, radioaktiw dargamanyň teoriýasy düzülendir. Şonuň üçin ujypsyz *dt* wagtda dargaýan ýadrolaryň *dN* sany ähli ýadrolaryň *N* sanyna we *dt* wagta göni baglydyr diýlip hasaplanylýar:

$$dN = -\lambda N dt. \tag{38.6}$$

Bu ýerde λ – dargamanyň hemişeligi diýlip at berilýän, radioaktiw maddany häsiýetlendirýän hemişelik. Dargama netijesinde radioaktiw ýadrolaryň umumy sanynyň azalýandygy sebäpli, deňlikde minus alamaty goýulýar. (38.6) deňligi integrirläp alarys:

$$\int_{N_0}^{N} \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt \qquad \text{ýa-da} \qquad \ln\frac{N}{N_0} = -\lambda t.$$

Bu ýerden

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \tag{38.7}$$

baglanyşygy alarys. Bu ýerde N_0 – dargamadyk ýadrolaryň başlangyç sany ($t = 0$ wagt pursaty üçin), N – wagtyň t pursaty üçin dargamadyk ýadrolaryň sany. (38.7) formula **radioaktiw dargamanyň** kanunydyr.

Wagtyň t dowamynda dargan ýadrolaryň sany

$$N_0 - N = N_0(1 - e^{-\lambda t}) \tag{38.8}$$

deňlik bilen kesgitlenýär.

Ýadrolaryň başlangyç sanynyň ýarysyna deň bolan ýadrolaryň dargaýan wagtyna **ýarymdargamanyň periody (*T*)** diýilýär.

Bu wagt

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t}$$

şertden kesgitlenýär:

$$T = \ln\frac{2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}. \tag{38.9}$$

Häzirki döwürde belli bolan radioaktiw ýadrolaryň ýarymdargama periody $3 \cdot 10^{-7}$ sekuntdan $5 \cdot 10^{15}$ ýyla çenli aralykdadyr.

Radioaktiw ýadronyň ömrüniň ortaça dowamlylygyny tapalyň. Wagtyň t-den $(t + dt)$ aralygynda dargaýan ýadrolaryň $dN(t)$ sany (38.6) aňlatmanyň moduly bilen kesgitlenýär:

$$dN(t) = \lambda N(t) dt.$$

Bu ýadrolaryň hersiniň ömrüniň dowamlylygy t deňdir. Diýmek, başda bar bolan N_0 ýadrolaryň ömrüniň dowamlylygynyň jemini $tdN(t)$ aňlatmany integrirlemek bilen tapmak bolar. Bu jemi ýadrolaryň N_0 sanyna bölüp, radioaktiw **ýadronyň ömrüniň orta dowamlylygyny** tapyp bolýar:

$$\tau = \frac{1}{N_0}\int_0^{\infty} t dN(t) = \frac{1}{N_0}\int_0^{\infty} t\lambda N(t) dt.$$

Bu ýere (38.7) formuladan $N(t)$-niň bahasyny goýup alarys:

$$\tau = \frac{1}{N_0}\int_0^{\infty} t\lambda N_0 e^{-\lambda t}dt = \int_0^{\infty} t\lambda e^{-\lambda t}dt = \frac{1}{\lambda}.$$

Şeýlelikde, radioaktiw ýadronyň ömrüniň dowamlylygy dargamanyň hemişeliginiň ters ululygyna deň bolýar:

$$\tau = \frac{1}{\lambda}. \tag{38.10}$$

Radioaktiw dargama sebäpli emele gelen ýadrolar hem, köplenç radioaktiw bolýar we başgaça λ' hemişelik bilen dargaýarlar. Indiki emele gelen ýadro hem radioaktiw bolup bilýär. Netijede, birnäçe hatar radioaktiw öwrülişikleri bolup bilýär. Tebigatda üç sany **radioaktiw hatar** (ýa-da maşgala) bardyr. Olaryň birinjisine uranyň hatary diýilýär. Ol öz başlangyjyny ^{238}U-den alyp gaýdýar we ^{206}Pb bilen gutarýar. Ikinjisine toriniň hatary diýilýär. Onuň başlangyjy ^{232}Th bolup, iň soňky önümi ^{208}Pb. Üçünji hatara aktanouranyň hatary diýilýär. Ol ^{235}U-dan başlanýar we ^{207}Pb bilen gutarýar.

Dargaýan radioaktiw çeşmäniň aktiwligini häsiýetlendirmek üçin nuklidiň A aktiwligi diýen düşünje girizilýär. Protonlarynyň Z sany we neýtronlaryň N sany bilen tapawutlanýan atom ýadrolaryna **nuklidler** diýilýär.

Dargan ΔN ýadrolaryň sanynyň dargama Δt wagtyna bolan gatnaşygyna **nuklidiň *A* aktiwligi** diýilýär:

$$A = \frac{\Delta N}{\Delta t}. \tag{38.11}$$

(38.6) we (38.11) deňlemelerden alarys:

$$A = -\lambda N. \tag{38.12}$$

Ölçegleriň halkara sistemasynda aktiwligiň birligi **bekkerel** (*Bk*). Bir sekuntda bir dargama bolýan nuklidiň aktiwligi 1*Bk* bolýar. Radioaktiw çeşmeler üçin sistemadan daşary **kýuri** (*Ki*) birlik hem ulanylýar: $1Ki = 3{,}7 \cdot 10^{10}Bk$.

38.5. Alfa – dargama

Alfa – şöhle geliýniň $^4_2$He ýadrolarynyň akymydyr. Alfa-dargama

$$^A_ZX \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^4_2He \tag{38.13}$$

shema boýunça geçýär. Bu ýerde dargaýan (asyl) ýadro X, emele gelen (dörän) ýadro Y bilen bellenendir. Adatça α – dargamada dörän ýadro hem γ – şöhle goýberýär. (38.13)-den görnüşi ýaly, dargamada asyl ýadro bilen deňeşdirilende dörän ýadronyň zarýad sany 2, nuklon sany bolsa 4 birlik kiçelýär. Mysal hökmünde uranyň ^{238}U izotopynyň torini emele getirip dargaýşyna seretmek bolar:

$$^{238}_{92}U \rightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^4_2He.$$

Dargamada uçup çykýan α – bölejikleriň tizligi örän ýokarydyr (10^7 *m/s* töweregi). Bu tizlige birnäçe *MeW* kinetik energiýa degişlidir. α – bölejigiň döremegi ýadronyň düzümindäki 2 protonyň we 2 neýtronyň duşuşmagynyň netijesinde bolýar diýlip düşündirilýär.

α – bölejikler maddadan geçende tizligi peselýär we iň soňunda nola deň bolup bilýär. Tizligiň peselmesi sebäpli ýitýän kinetik energiýa maddanyň molekulalaryny ionlaşdyrmaga sarp bolýar. Howada bir jübüt iony emele getirmek üçin ortaça 35 *eW* energiýa gerek. Diýmek, α – bölejik öz ýolunyň dowamynda, takmynan 10^5 jübüt ion emele getirýär. Maddanyň dykyzlygy ýokary boldugyça α – bölejigiň durýança geçýän ýoly gysga bolýar. Meselem, normal basyşly howada bu ýol birnäçe santimetre deňdir. Gaty jisimde ýoluň uzynlygy, takmynan 0,01 *mm*-e deň.

Dörän ýadronyň dynçlykdaky energiýasy bilen α – bölejigiň energiýasynyň jemi asyl ýadronyň dynçlykdaky energiýasyndan köpdügi sebäpli, α – bölejik kinetik energiýa eýe bolýar. Bu artykmaç energiýa dörän ýadro we alfa-bölejigiň massalaryna ters gatnaşykda paýlanýar. Radioaktiw maddanyň goýberýän energiýasy dürli, ýöne golaý bahalara eýe bolup bilýär. Onuň sebäbi bolsa, dörän ýadrolaryň käbiriniň oýandyrylan halda bolmagydyr. Oýandyrylan ýadrolaryň köpüsiniň ortaça ömri $\tau = 10^{-8} \div 10^{-15}$ sekunt aralygyndadyr. Bu wagtyň dowamynda oýandyrylan ýadro γ – şöhle goýbermek bilen kadaly ýa-da pesräk oýandyrylan hala geçýär.

Alfa-bölejikler diňe radioaktiw dargama bolan wagty emele gelýärler. Ýadrodan çykmak üçin olar potensial bökdençlikden geçmeli bolýar. Bu potensial bökdençligiň beýikligi α – bölejigiň energiýasyndan uly bolýar. Şeýle bolansoň α – bölejikleriň ýadrodan çykmagyny klassyky mehanika düşündirip bilmeýär. Kwant mehanikasynyň esaslaryna görä α – bölejikleri şu şertdäki potensial bökdençlikden geçmeginiň ähtimallygy bardyr. Bu hadysa **tunnel** effekti diýilýär.

Alfa dargamanyň tunnel effektine esaslanan teoriýasy tejribeleriň maglumatlary bilen ylalaşýar.

38.6. Beta – dargama

Beta – dargamanyň üç görnüşi bardyr. Birinde ýadrodan elektron goýberilýär. Ikinjisinde bolsa pozitron goýberilýär. Üçünji görnüşine elektronyň eýelenmegi diýilýär we onda ýadro *K* gatlagyň, käwagt bolsa *L* ýa-da *M* gatlaklaryň bir elektronyny eýeleýär.

Birinji görnüşli dargama β^- – dargama ýa-da elektronly dargama diýilýär. Onuň geçiş shemasy:

$$ {}^{A}_{Z}\mathrm{X} \to {}^{\;\;A}_{Z+1}\mathrm{Y} + {}^{\;\;0}_{-1}e + \tilde{\nu}. \tag{38.14}$$

Bu prosesde zarýadyň saklanýandygyny görkezmek üçin β^- elektrona $Z = -1$ zarýad sany berilýär. Nuklonlaryň saklanýandygyny görkezmek üçin bolsa β^- – elektronyň massa sany $A = 0$ diýip kabul edilýär. (38.14) shemadan görnüşi ýaly, dörän ýadronyň atom nomeri asyl ýadronyňkydan bir san ýokary alynýar. Iki ýadronyň hem massa sanlary deň hasaplanýar. Bu dargama netijesinde $\tilde{\nu}$ neýtrino hem goýberilýär. Neýtrino zarýady nola deň bolan elementar bölejikdir. Onuň massasy barada anyk maglumatlar ýok. Ol nola deň ýa-da elektronyň massasy bilen deňeşdirilende örän kiçidir.

Beta – dargamada γ – şöhläniň goýberilýän halatlary bar. Onuň sebäbi bolsa, dörän ýadronyň oýandyrylan halda bolmagy we onuň kadaly hala ýa-da pesiräk oýandyrylan hala geçmegidir.

^{234}Th toriniň ^{234}Pa protaktina öwrülmesi, β^- – dargamanyň bir mysalydyr. Onuň shemasy

$$ {}^{234}_{90}\mathrm{Th} \rightarrow {}^{234}_{91}\mathrm{Pa} + {}^{0}_{-1}e + \tilde{\nu} \qquad (38.15.) $$

görnüşde bolýar.

Beta – elektronlaryň kinetik energiýasy hemişelik däldir. Ol noldan $E_{\max}$ baha çenli üýtgäp bilýär. Kinetik energiýanyň $E_{\max}$ energiýa deň bolmazlygy energiýanyň saklanma kanunyna gabat gelmeýär. Energiýanyň bir bölegi ýitýän ýaly bolýar. Bu ýagdaýy düşündirmek üçin W. Pauli, β^- – dargamada elektrondan başga-da bir bölejik goýberilýär diýen çaklamany öňe sürdi. Ol bölejik zarýadsyz, massasy bolsa nola deň ýa-da golaý bolmaly diýlip ykrar edildi. Bu bölejige E. Fermi tarapyndan neýtrino diýip at bermek teklip edildi. Neýtrinonyň hakykatdan-da bardygy 1956-njy ýylda tejribede subut edildi.

Beta – dargamanyň ikinji görnüşi (β^+ – dargama ýa-da pozitronly dargama) aşakdaky shema boýunça geçýär:

$$ {}^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow {}_{Z-1}^{\;\;A}\mathrm{Y} + {}^{0}_{+}e + \nu. \qquad (38.16.) $$

Mysal üçin, ^{13}N azodyň ^{13}C ugleroda öwrülişine seredeliň:

$$ {}^{13}_{7}\mathrm{N} \rightarrow {}^{13}_{6}\mathrm{C} + {}^{0}_{+1}e + \nu. $$

Shemadan görnüşi ýaly, dörän ýadronyň atom nomeri asyl ýadronyňkydan bir san kiçi. Öwrülişikde ${}^{0}_{+1}e$ pozitron we ν antineýtrino goýberilýär. γ – şöhläniň goýberilýän ýagdaýlary hem bar. Pozitron elektronyň antibölejigidir. Şonuň üçin (38.16.) shemada goýberilýän bölijikler (12.15.) shemada goýberilýänlere anti-bölejiklerdir.

Beta – dargamanyň üçünji görnüşinde ýadro atomyň K gatlagyndan (käte L ýa-da M gatlakdan) bir elektrony ýuwudýar. Bu dargama aşakdaky shema boýunça geçýär:

$$ {}^{A}_{Z}\mathrm{X} + {}^{0}_{-1}e \rightarrow {}_{Z-1}^{\;\;A}\mathrm{Y} + \nu. \qquad (38.17.) $$

Netijede, dörän ýadro oýandyrylan halda bolup bilýär. Ol pes energetiki derejelere geçende bolsa γ – şöhle goýberilýär.

Atomyň elektron gatlagynda boşan ýere ýokarky gatlakdan elektron geçýär we netijede rentgen şöhlesi goýberilýär. Rentgen şöhlesiniň goýberilmegi bu dargamanyň alamaty bolup hyzmat edýär. Edil şol alamatyň üsti bilen ilkinji gezek 1937-nji ýylda bu dargama açyldy.

Bu dargamanyň mysaly bolup ^{40}K kaliýniň ^{40}Ar argona öwrülmegi hyzmat edýär:

$$^{40}_{19}\text{K} + {}^{0}_{-1}e \rightarrow {}^{40}_{18}\text{Ar} + \nu.$$

38.7. Gamma-şöhle we onuň häsiýetleri

Gamma-şöhlelenme radioaktiwligiň özbaşdak bir görnüşi däldir. Köp elementleriň α we β – dargamalarynda γ – şöhle goýberilýär. Ol şeýle-de ýadro reaksiýalarynda, zarýadly bölejikler tormozlananda we beýleki birnäçe özgertmelerde goýberilýär.

Häzirki döwürde γ – şöhläniň diňe dörän ýadro tarapyndan goýberilýändigi anyklanandyr. Dörän ýadro emele gelen wagty oýandyrylan bolmak bilen, takmynan 10^{-13} – 10^{-14} sekundyň dowamynda γ – şöhle goýberip, esasy hala geçýär. Bu geçişde birnäçe aralyk hallaryň bolmagy hem mümkin. Şeýle bolanda şol bir radioaktiw izotopyň γ – kwantlary biri-birinden energiýasy bilen tapawutlanýan birnäçe toparlardan ybarat bolup bilýär.

Ýadrolaryň köpüsiniň goýberýän γ – şöhlesi örän gysga elektromagnit şöhlesidir. Şonuň üçin onuň tolkun häsiýetleri örän gowşak ýüze çykýar. Bu şertde korpuskulýar häsiýetler has aýdyň ýüze çykyp başlaýar. Şeýle bolansoň γ – şöhlä γ – kwantlaryň akymy ýaly seredilýär. Dürli ýadrolaryň radioaktiw dargamasynda γ – kwantlaryň energiýasy 10 *keW*-dan 5 *MeW*-a çenli bolýar.

γ – kwantlar maddadan geçende ýa ýuwudylýarlar ýa-da maddada pytraýar. γ – kwantyň elektrik zarýady ýoklugy üçin olara kulon güýçleri täsir etmeýär. γ – kwantlar maddadan geçende elektronlar we ýadrolar bilen seýrek çaknyşýar. Çaknyşýan halatynda hereketiniň ugruny üýtgedýärler.

γ – kwantlar maddadan geçende atomlaryň elektron gatlagy we ýadrolary bilen özara täsirleşip bilýärler. Bu özara täsirleşmeleriň netijesinde fotoeffekt, komton effekti we elektron-pozitron jübütleriniň ýüze çykmasy bolup geçýär. Fotoeffekt we kompton effekti γ – kwantlaryň energiýasynyň kiçi bahalarynda (1 *MeW*-a çenli) ýüze çykýar.

Kwantlaryň energiýasy $E_\gamma > 1{,}02$ *MeW* bolanda ýadrolaryň elektrik meýdanynda elektron-pozitron jübütleri emele gelýär. Bu hadysanyň bolmagynyň ähtimallygy γ – kwantlaryň energiýasyna göni baglydyr. Bu energiýa $E_\gamma \approx 10$ *MeW* bolanda γ – kwantlaryň madda bilen täsiri netijesinde bolýan proses, esasan elektron-pozitron jübütleriniň emele gelmesidir.

Gamma-kwantlaryň maddalardan geçijilik ukybynyň ýokarylygy olary gamma-deffektoskoplarda ulanmaga mümkinçilik berýär. Bu deffektoskoplarda önümler gamma-kwantlar bilen şöhlelendirilýär we olaryň dürli ýerlerindäki intensiwligi boýunça önümdäki şikesler kesgitlenýär.

Gamma şöhläniň (alfa we beta şöhlelerde bolşy ýaly) maddany ionlaşdyryjy täsiri bardyr. Gamma-şöhläniň madda täsiri **ionlaşdyryjy şöhläniň möçberi** bilen häsiýetlendirilýär. Oňa aşakdakylar girýär.

Şöhlelenmäniň **ýuwudylan möçberi** – şöhlelenmäniň energiýasynyň şöhlelendirilýän maddanyň massasyna bolan gatnaşygydyr. Onuň birligi greý (Gr). $1Gr = 1\frac{J}{kg}$ bolmak bilen, ol 1 kg massaly madda ionlaşdyryjy şöhläniň $1J$ energiýasynyň berlendigini aňladýar.

Şöhlelenmäniň ekspozisiýa möçberi howany şöhlelendirme netijesinde dörän biratly elektrik zarýadly ionlaryň zarýadlarynyň jeminiň howanyň massasyna gatnaşygyna deň bolan fiziki ululykdyr.

HS ölçegler sistemasynda şöhlelenmäniň ekspozisiýa möçberiniň ölçeg birligi $\frac{Kl}{kg}$. Sistemadan daşarky birligi-rentgen (R). $1R = 2,58 \cdot 10^{-4}\frac{Kl}{kg}$.

38.8. Ýadro reaksiýalary

Atom ýadrosynyň başga bir ýadro ýa-da elementar bölejikler bilen täsirleşmeginiň netijesinde ýadronyň (ýa-da ýadrolaryň) özgermegine ýadro reaksiýasy diýilýär. Aralyk, takmynan 10^{-15} m bolanda ýadro güýçleriniň hasabyna bölejikleriň arasynda özara täsirleşme ýüze çykýar.

Köp gabat gelýän ýadro reaksiýasynyň görnüşi a ýeňil bölejigiň X ýadro bilen özara täsirleşip b ýeňil bölejigiň we Y ýadronyň emele gelmegidir:

$$\mathrm{X} + a \rightarrow \mathrm{Y} + b.$$

Bu deňleme gysgaça

$$\mathrm{X}(a, b)\mathrm{Y} \qquad (38.18.)$$

görnüşinde ýazylýar. Ýaýyň içinde başky we soňky ýeňil bölejikler görkezilýär. a we b ýeňil bölejikler neýtron (n), proton (p), deýtron (d), α-bölejik we γ-foton bolup biler.

Ýadro reaksiýalary ýylylyk goýbermek ýa-da ýuwutmak bilen bolup geçýär. Bölünýän energiýanyň mukdaryna **reaksiýanyň energiýasy** diýilýär. Ol başky we soňky ýadrolaryň massalarynyň tapawudy bilen kesgitlenýär. Emele gelen ýadrolaryň massalarynyň jemi başky ýadrolaryň massalarynyň jeminden uly bolsa, reaksiýa energiýany ýuwutmak bilen bolup geçýär. Reaksiýanyň energiýasy otrisatel bolýar.

Reaksiýany döredýän bölejikler has tiz bölejikler bolmadyk halatynda ýadro reaksiýasynyň iki etapda bolup geçýändigini 1936-njy ýylda N. Bor anyklady. Birinji etapda X ýadro a bölejigi eýeläp, aralyk Π ýadro döreýär. Oňa **düzüji ýadro** diýilýär. a bölejigiň energiýasy düzüji ýadronyň nuklonlarynyň arasynda paýlanýar. Netijede, bu ýadro oýandyrylan halda bolýar. Ikinji etapda düzüji ýadro b bölejigi goýberýär. Reaksiýanyň mysaly shemasy aşakdaky görnüşde bolýar:

$$X + a \rightarrow \Pi \rightarrow Y + b. \quad (38.19.)$$

Eger a we b bölejikler meňzeş (toždestwennyý) bolsa ($a \equiv b$), onda bu shema bölejikleriň pytramagyny görkezýär, a we b bölejikleriň energiýalary deň bolanda ($E_a = E_b$) maýyşgak pytrama, $E_a \neq E_b$ bolanda bolsa, maýyşgak däl pytrama bolup geçýär. a we b bölejikler meňzeş däl bolanda hakyky ýadro reaksiýasy bolup geçýär.

Energiýasy, takmynan 1 *MeW* bolan nuklonyň ýadronyň diametrine deň bolan aralygy ($\sim 10^{-14}$ m) geçmegi üçin gerek bolan wagta **häsiýetli ýadro wagty** diýilýär. 1 *MeW* energiýanyň nuklonyň 10^7 m/s tizligine, takmynan degişlidigi hasaba alnyp häsiýetli ýadro wagty hasaplananda $\tau \sim 10^{-21}$ s baha alynýar. Düzüji ýadronyň ortaça ömri $10^{-14} - 10^{-12}$ sekunda deň. Bu ýerden düzüji ýadronyň ömrüniň häsiýetli ýadro wagtyndan birnäçe tertip uludygy görünýär. Bu bolsa düzüji ýadronyň dargamagynyň birinji tapgyr bilen bagly däldigini görkezýär. Şeýle-de, düzüji ýadro her hili usullar bilen dargap bilýär. Dargamanyň ol ýa-da beýleki görnüşiniň bolmagynyň ähtimallygy birinji tapgyra bagly däldir.

Ýadro reaksiýasynyň netijeliligi reaksiýanyň σ **effektiw kese-kesigine baglydyr.**

Bu ululygyň ölçeg birligi meýdanyňky ýalydyr we düşýän bölejikleriň biriniň reaksiýa täsirini häsiýetlendirýär:

$$\sigma = \frac{dn_0}{n_0 N_0 dx}.$$

Bu kesgitlemä görä, wagt birliginde birlik göwrüminde N_0 ýadro bolan maddanyň kese-kesiginiň birlik meýdanyna n_0 bölejigi bolan tekiz-parallel akym düşýär. dn_0 – galyňlygy dx bolan gatlakda ýadro reaksiýasyny döredýän bölejikleriň sany.

Ýadro reaksiýalary birnäçe alamatlar boýunça klaslara bölünýär:

1. Reaksiýa döredýän bölejikleriň görnüşi boýunça – neýtronlaryň täsiri bilen reaksiýa; zarýadly bölejikleriň (meselem, protonlaryň, deýtronlaryň, alfa-bölejikleriň) täsiri bilen reaksiýa; gamma-kwantlaryň täsiri bilen reaksiýa.

2. Täsir edýän bölejikleriň energiýasy boýunça – kiçi energiýalardaky (elektron-wolt töweregi) reaksiýa (esasan neýtronlaryň gatnaşmagynda geçýän); gamma-kwantlaryň we zarýadly bölejikleriň (alfa-bölejik, proton) gatnaşmagynda orta energiýaly (birnäçe megaelektron-wolta çenli) reaksiýalar; erkin halda döremeýän elementar bölejikleriň döremegine getirýän ýokary energiýaly (ýüzlerçe we müňlerçe megaelektron-wolt) reaksiýalar.

3. Reaksiýa gatnaşýan ýadrolaryň görnüşleri boýunça – ýeňil ýadrolardaky ($A < 50$) reaksiýalar; orta ýadrolardaky ($50 < A < 100$) reaksiýalar; agyr ýadrolardaky ($A > 100$) reaksiýalar.

4. Ýadro öwrülişiginiň geçişiniň häsiýeti boýunça – neýtron goýbermek bilen geçýän reaksiýalar; zarýadly bölejikleri goýbermek bilen geçýän reaksiýalar; zarýadly bölejikleri goýbermän, bir ýa-da birnäçe gamma-kwanty goýberip, ýadronyň esasy hala geçiş reaksiýasy.

Alfa-bölejikleriň we $^2_1$D deýtronlaryň täsiri bilen geçýän ýadro reaksiýalarynyň mysallary:

a) taryhda birinji amala aşyrylan azodyň kisloroda öwrülişiniň ýadro reaksiýasy:

$$^{14}_{7}\text{N} + ^{4}_{2}\text{He} \rightarrow (^{18}_{9}\text{Fe}) \rightarrow ^{17}_{8}\text{O} + ^{1}_{1}p,$$

b) ilkinji gezek neýtron alnan reaksiýa:

$$^{9}_{4}\text{Be} + ^{4}_{2}\text{He} \rightarrow ^{12}_{6}\text{C} + ^{1}_{0}n,$$

ç) $^2_1$D deýtronlaryň-wodorodyň agyr ýadrosynyň (deýteriýa) täsiri bilen geçýän ýadro reaksiýalary. Bu reaksiýalar protonyň ýa-da neýtronyň emele gelmegi bilen $^3_1$H tritiniň agyr ýadrosynyň ýa-da $^3_2$He geliýniň ýeňil izotopynyň sintezine getirýär:

$$^{2}_{1}\text{D} + ^{2}_{1}\text{D} \rightarrow ^{3}_{1}\text{H} + ^{1}_{1}p \qquad ^{2}_{1}\text{D} + ^{2}_{1}\text{D} \rightarrow ^{3}_{2}\text{He} + ^{1}_{0}n. \tag{38.20}$$

38.9. Neýtronlaryň täsiri bilen geçýän ýadro reaksiýalary

Neýtronlaryň täsiri bilen geçýän ýadro reaksiýalarynda ^1_0n neýtronlaryň täsiri bilen emeli-radioaktiw izotoplar emele gelýär. Meselem, ýarym dargamasynyň periody 5000 ýyldan hem köp bolan $^{14}_6$C radiouglerod emele gelip bilýär:

$$^{14}_{7}\text{N} + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{14}_{6}\text{C} + ^{1}_{1}p. \tag{38.21}$$

Indiki dargama

$$^{14}_{6}\text{C} \rightarrow ^{14}_{7}\text{N} + ^{\;\,0}_{-1}e + ^{0}_{0}\tilde{\nu}_e,$$

$^{\;\,0}_{-1}e$ we $^{0}_{0}\tilde{\nu}_e$, degişlilikde elektronyň we antineýtrinonyň bellenilişi.

(38.21) ýadro reaksiýasy kosmos şöhleleriniň dörediýän neýtronlarynyň täsiri bilen atmosferada hemişe geçip durýar. Emele gelen $^{14}_6$C izotop β – şöhle goýberýänligi üçin **radiouglerod** diýilýär. Ösümlikleriň fotosintezi radiouglerodyň täsiri bilen geçýär. Ol tebigatdaky maddalaryň öwrülişigine gatnaşýar.

Neýtronlaryň ýadrolar bilen özara täsiriniň häsiýeti haýal we tiz neýtronlar üçin tapawutlydyr. Neýtronlaryň υ tizligi ýokary bolmak bilen, oňa degişli de Broýluň $\lambda = \dfrac{h}{p}$ tolkun uzynlygy ýadronyň R radiusyndan kiçi bolsa, ýagny $\dfrac{h}{(m\upsilon)} < R$

ýa-da neýtronyň tizligi üçin $\upsilon > \frac{h}{(mR)}$ şert ýerine ýetende neýtronlara **tiz neýtronlar** diýilýär. Tiz neýtronlaryň energiýasy 0,1 ÷ 50 MeW çäklerde bolýar.

Eger $\lambda > R$ bolsa neýtronlara **haýal neýtronlar** diýilýär. Olaryň energiýasy 100 keW-dan köp bolmaýar. Energiýasy 0,005 – 0,5 eW bolan haýal neýtronlara **ýylylyk neýtronlary** diýilýär. Energiýasy 0,005 eW-dan kiçi bolan neýtronlara **sowuk** ýa-da **ultrasowuk neýtronlar** diýilýär.

Neýtronlaryň ýadrolar bilen özara täsiriniň netijesinde neýtronlaryň ýadrolarda maýyşgak serpikmeleri bolup geçýär ýa-da ýadrolar neýtronlary eýeleýärler, ýagny reaksiýa geçmek şerti döreýär. **Haýallandyryjy** diýilýän maddalarda (grafit, D_2O agyr suw, HDO, berilliniň birleşmeleri) tiz neýtronlar ýadrolardan serpikýärler we olaryň energiýasy haýallandyryjy maddanyň atomlarynyň ýylylyk energiýasyna öwrülýär. Otag temperaturasynda olaryň energiýasy 0,025 eW töweregine çenli peselýär. Ýylylyk neýtronlaryň energiýasy düzüji ýadronyň energiýasy bilen gabat gelende neýtronlaryň **rezonansly ýuwdylmasy** bolup geçýär. **Transuran** himiki elementleriň alnyşy şu ýagdaýa esaslanan.

Uranyň giň ýaýran izotopynyň rezonansly neýtrony ýuwutmagy netijesinde $^{239}_{93}Np$ neptunyň emele geliş shemasyna seredeliň:

$$^{238}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{239}_{92}U \xrightarrow[23\ min]{\beta^-} ^{239}_{93}Np.$$

Shemada radioaktiw $^{239}_{92}U$ izotopyň ýarym dargamasynyň periody görkezilendir. Soňra $^{239}_{93}Np$ izotop $^{239}_{94}Pu$ plutona öwrülýär:

$$^{239}_{93}Np \xrightarrow[2,3\,\text{gün}]{\beta^-} ^{239}_{94}Pu.$$

Ýylylyk neýtronlarynyň täsiri bilen aňsat dargap bilýän plutoniý ýadro energiýasyny almakda giňden ulanylýar. Plutoniý alfa-radioaktiwdir. Onuň ýarymdargama periody (24000 ýyl) örän uludyr we durnukly $^{235}_{92}U$ uranyň izotopyna öwrülip bilýär:

$$^{239}_{94}Pu \xrightarrow[2,4 \cdot 10^4\ \text{ýyl}]{\alpha} ^{235}_{92}U.$$

Himiki elementleriň tizlendirilen ýadrolarynyň täsiri bilen geçýän ýadro reaksiýalary hem täsin netijeler berýär. Elementleriň periodiki sistemasynyň soňky elementleri (meselem, Ns – nilsboriý, Ku – kurçatowiý) şu usul bilen alnan elementlerdir. Kurçatowiý elementiniň alnyş shemasy:

$$^{242}_{94}Pu + ^{22}_{10}Ne \rightarrow ^{260}_{104}Ku + 4^{1}_{0}n.$$

Plutoniýniň $^{22}_{10}Ne$ neonyň ýadrosyny ýuwutmagy sebäpli, $^{260}_{104}Ku$ kurçatowiý elementi emele gelýär.

38.10. Ýadronyň dargama reaksiýasy

Rezonansly ýuwutma zerarly oýandyrylan agyr ýadro iki sany, takmynan deň bölege bölünip bilýär. Agyr ýadrolarda protonlaryň köp bolmagy, olaryň arasynda döreýän itekleşme kulon güýçleri bu ýadrolary "aňsat" dargamaga ukyply edýär.

Agyr ýadro iki bölege darganda ummasyz uly energiýa bölünip çykýar. Bu energiýa dargamadyk agyr elementiň baglanyşyk energiýasy bilen dargamada emele gelen iki ýadronyň baglanyşyk energiýalarynyň tapawudy bilen kesgitlenýär. Bu tapawut her nuklon üçin 1,1 *MeW* töweregi bolýar.

Özünde 238 nuklon saklaýan ${}^{238}_{92}\mathrm{U}$ uranyň ýadrosy darganda 200 *MeW* töweregi energiýa bölünip çykýar. Bir gram ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ uranyň ýadrolary darganda $8 \cdot 10^{10}$ J ýa-da 22000 *kWt* sagat energiýa bölünip çykýar.

$\frac{Z^2}{A} \geq 17$ şert ýerine ýetende agyr ýadro dargamaga ukyplydyr. Bu ýerde $\frac{Z^2}{A}$ – **dargamanyň parametri.** Elementleriň periodik sistemasynda dargama parametri $\frac{Z^2}{A} \approx 20$ bolan ${}^{108}_{47}Ag$-den soň ýerleşen ähli elementleriň ýadrolary üçin ýokarky şert ýerine ýetýär. $\left(\frac{Z^2}{A}\right)_{kr.} \geq 49$ **(dargamanyň kritiki parametri)** şerte gabat gelýän ýadrolar dargaman durup bilmeýärler.

$\frac{Z^2}{A} < \left(\frac{Z^2}{A}\right)_{kr.}$ bolanda, tunnel effekti esasyndaky α – dargama ýaly, ýadronyň öz-özünden (spontan) dargamagy mümkin. Öz-özünden dargaýan ýadrolaryň ýarym dargamasynyň periody $10^{16} - 10^{17}$ ýyl töweregi bolýar.

38.11. Dargamanyň zynjyr reaksiýasy

Ýadro böleklere bölünende onuň her böleginde neýtronlar protonlardan artykmaçlyk edýär. Artykmaç neýtronlar bölünen ýadrolar tarapyndan goýberilýärler we olara **dargama neýtronlary** diýilýär. Olaryň sany her hili bolýar. Ýadronyň dargamagy neýtronlaryň köpelmegine getirýär. Ol bir dargama hadysasynda emele gelen neýtronlaryň $\langle v \rangle$ ortaça sany bilen häsiýetlendirilýär. Plutoniniň ${}^{239}_{94}\mathrm{Pu}$ we uranyň ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ ýadrolary ýylylyk neýtronlarynyň täsiri bilen darganda bu san, degişlilikde 3,0 we 2,5-e deň bolýar. Dargama neýtronlarynyň içinde **pursatlaýyn (ikinji)** we **gijä galan neýtronlar** bolýar. Pursatlaýyn neýtronlar edil ýadro dargan mahaly 10^{-14} s töweregi wagtyň dowamynda goýberilýär. Gijä galýan neýtronlar önüm ýadrolar tarapyndan dargamadan biraz soň goýberilýär.

Dargama reaksiýasynyň netijesinde goýberilýän her bir neýtron bölünýän maddanyň goňşy ýadrosyna täsir edip, ony dargamaga mejbur edýär. Netijede, dargamalaryň sany progressiýa meňzeş şertde köpelýär. Bu hadysa **dargamanyň zynjyr reaksiýasy** diýilýär. Zynjyr reaksiýasynyň ýüze çykmagynyň şerti köpelýän neýtronlaryň bolmagydyr. Dargamanyň zynjyr reaksiýasy neýtronlaryň k **köpelme koeffisiýenti** bilen häsiýetlendirilýär. Bu koeffisiýent berlen nesildäki neýtronlaryň sanynyň mundan öňki nesildäki neýtronlaryň sanyna bolan gatnaşyk bilen häsiýetlendirilýär. Zynjyr reaksiýasynyň bolmagy üçin $k \geq 1$ şert ýerine ýetmelidir.

Köpelme koeffisiýenti dargaýan maddanyň tebigatyna baglydyr. Berlen izotop üçin bolsa, ol izotopyň mukdaryna, ölçeglerine we aktiw zolagyň görnüşine baglydyr. Zynjyr reaksiýasynyň geçip bilýän iň kiçi ölçegli aktiw zolagyna **kritiki ölçeg** diýilýär. Kritiki ölçegiň çäginde zynjyr reaksiýasynyň bolmagy üçin şert döredýän **massa kritiki** massa diýilýär.

$k > 1$ bolanda dargamalaryň sany üznüksiz artýar we ýarylyşa getirip bilýär. Oňa **artýan reaksiýa** diýilýär. $k = 1$ bolanda öz-özüni saklaýan reaksiýa amala aşýar. Wagtyň geçmegi bilen neýtronlaryň sany üýtgemeýär. $k < 1$ bolanda **togtaýan reaksiýa** bolup geçýär.

Zynjyr reaksiýalary **dolandyrylýan** we **dolandyrylmaýan** reaksiýalara bölünýär. Atom bombasynyň partlamasy dolandyrylmaýan reaksiýanyň mysalydyr. Saklanýan wagty ýarylmazlygy üçin atom bombasyndaky $^{235}_{92}\mathrm{U}$ (ýa-da $^{239}_{94}\mathrm{Pu}$) maddalar her biriniň massasy kritiki massadan kiçi bolan iki bölege bölünip birnäçe aralykda ýerleşdirilýär. Bombany ýarmak gerek bolanda adaty ýarylyş bilen bu massalar biri-birine golaýlaşdyrylýar we netijede, zynjyr reaksiýasy başlanyp, partlama bolýar.

Dolandyrylýan zynjyr reaksiýasy ýadro reaktorlarynda ulanylýar. Onuň esasynda **ýadro energetikasy** işleýär.

38.12. Atom ýadrolarynyň sintezi

Seredilip geçilen deýteriniň ýadrolaryndan tritiniň we geliýniň ýadrolarynyň emele geliş reaksiýalary (38.20) atom ýadrolarynyň sinteziniň mysalydyr. Bu reaksiýalarda hem içki ýadro energiýasy bölünip çykýar. Üç ýadronyň – $^{2}_{1}\mathrm{D}$, $^{3}_{1}\mathrm{H}$, $^{3}_{2}\mathrm{He}$ baglanşyk energiýalarynyň gatnaşyklary 1 : 3 : 6 sanlaryň gatnaşyklary ýalydyr. Diýmek, (38.20) reaksiýalar köp mukdardaky energiýany bolup çykarmak bilen geçýär. Ol reaksiýalaryň birinjisinde 4,04 *MeW*, ikinjisinde bolsa 3,27 *MeW* energiýa bölünip çykýar.

$$^{2}_{1}\mathrm{D} + {}^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}n$$

reaksiýada öňkülerdäkiden hem köp, ýagny 17,58 *MeW* energiýa bölünip çykýar.

Bir nuklona düşýän energiýa $\frac{17,6}{5}\,MeW = 3,5\,MeW$ bolýar. Bu bolsa $^{238}_{92}\mathrm{U}$ dargama reaksiýasynda her nuklona düşýän energiýadan $\left(\frac{200}{238} = 0,85\,MeW\right)$, takmynan dört esse köpdür. Dört protonyň birleşip, geliýniň $_2^4$He ýadrosyny emele getirýän reaksiýa bölüp çykarýan udel energiýasy boýunça has netijelidir.

Itekleşmäniň potensial energiýasyny ýeňip geçmek bilen baglanyşykly ýeňil ýadrolarynyň sinteziniň reaksiýalary $10^8 - 10^9$ K töweregi aşa ýokary temperaturalarda geçip bilýär. Bu reaksiýalara **termoýadro sintez reaksiýalary** diýilýär. Olar plazma halyndaky maddalarda geçýär. Ýyldyzlaryň şöhlelenmesini energiýa bilen termoýadro reaksiýalary üpjün edýär diýlip hasaplanýar. Gün her sekuntda $3{,}8 \cdot 10^{26}$ J energiýa şöhlelendirýär. Bu bolsa bir sekuntda massa birliginden $1,88 \cdot 10^{-4} \dfrac{J}{(s \cdot kg)}$ energiýa goýberilýär diýildigidir.

Gündäki termoýadro reaksiýalary termoýadro aýlawlary görnüşinde geçmek bilen, wodorodyň ýadrosynyň geliýniň ýadrosyna öwrülmeginiň netijesinde bolup geçýär diýlip hasaplanýar.

Bu aýlawlaryň bir görnüşi **proton-proton** aýlawlarydyr. Ol pozitron we neýtrino goýbermek bilen, iki protonyň birleşip deýteriý emele gelmeginden başlanýar:

$$_1^1p + {}_1^1p \to {}_1^2\mathrm{D} + {}_{+1}^{\;\,0}e + {}_0^0\nu_e.$$

Soňraky aýlaw

$$_1^2\mathrm{D} + {}_1^1p \to {}_2^4\mathrm{He} + \gamma$$

shema boýunça geçýär.

Bu aýlawyň ähtimal dowamy energiýa bölüp çykarmak bilen geçýän aşakdaky reaksiýadyr.

$$_2^3\mathrm{He} + {}_2^3\mathrm{He} \to {}_2^4\mathrm{He} + 2{}_1^1p.$$

Uglerod-azot termoýadro aýlawlarynda uglerodyň ýadrosynyň "ýardam beriji" bolup hyzmat etmegi netijesinde wodorodyň we geliýniň ýadrolarynyň birleşmegi bolup geçýär.

Aýlawyň başynda tiz proton uglerodyň ýadrosyna aralaşýar:

$$_6^{12}\mathrm{C} + {}_1^1p \to {}_7^{13}\mathrm{N} + \gamma.$$

Ýarymdargamasynyň periody 14 minut bolan azodyň radioaktiw $_7^{13}$N izotopynda

$$_1^1p \to {}_0^1n + {}_{+1}^{\;\,0}e + {}_0^0\nu$$

öwrülme bolup geçýär we uglerodyň ýadrosynyň izotopy emele gelýär:

$$_7^{13}\mathrm{N} \to {}_6^{13}\mathrm{C} + {}_{+1}^{\;\,0}e + {}_0^0\nu_e.$$

Ummasyz köp ýyllaryň dowamynda aşakdaky ýaly öwrülişikler bolýar. Takmynan, her 2,7 million ýylda $_6^{13}$C ýadro protony ýuwudýar we azodyň durnukly $_7^{14}$N izotopyny emele getirýär:

$$_6^{13}\mathrm{C} + {}_1^1p \to {}_7^{14}\mathrm{N} + \gamma.$$

Ortaça 32 million ýyldan soň $_7^{14}$N ýadro protony ýuwdyp kislorodyň $_8^{15}$O ýadrosyna öwrülýär:

$$^{14}_{7}\mathrm{N} + ^{1}_{1}p \rightarrow ^{15}_{8}\mathrm{O} + \gamma$$

Ýarymdargamasynyň periody 3 minut bolan durnuksyz $^{15}_{8}\mathrm{O}$ ýadro pozitron we neýtrino goýberip, $^{15}_{7}\mathrm{N}$ ýadro öwrülýär:

$$^{15}_{8}\mathrm{O} \rightarrow ^{15}_{7}\mathrm{N} + ^{0}_{+1}e + ^{0}_{0}\nu_e.$$

Aýlaw, takmynan 100 müň ýyldan soň

$$^{15}_{7}\mathrm{N} + ^{1}_{1}p \rightarrow ^{12}_{6}\mathrm{C} + ^{4}_{2}\mathrm{He}$$

reaksiýa bilen gutarýar.

Aýlawlaryň ahyrky netijesinde dört proton geliýniň ýadrosyny emele getirýär we iki pozitrony goýberýär hem-de γ – şöhle goýberýär. Geliýniň bir ýadrosy 26,8 *MeW* energiýa bolup çykarýar. Bu energiýadan bir gramm-atoma 700 müň $kWt \cdot sagat$ energiýa düşýär. Bu energiýa Günüň şöhlelenme energiýasy bilen deňeşdirerlidir. Ýeriň şertleri üçin göz öňüne getirilende aýlawlaryň arasyndaky wagt örän ummasyz. Ýöne, Günde bu aýlawlaryň haçan başlanandygy belli däl, has öňden bäri dowam edýändigi belli. Şonuň üçin Günde bu aýlawlaryň her hili etaplary geçip duran bolmaly.

Gündäki şertlere meňzeş şertler döredilip, **wodorod bombasy** ýasaldy. Onda deýteriý we tritiý görnüşli garyndyda partlaýyş häsiýetli, öz-özüni goldaýan termoýadro reaksiýasy geçýär:

$$^{2}_{1}\mathrm{D} + ^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow ^{4}_{2}\mathrm{He} + ^{1}_{0}n. \qquad (38.22)$$

Termoýadro reaksiýasyny geçirmek maksady bilen ýokary temperatura almak üçin tiz zynjyr reaksiýaly atom bombasy ulanylýar.

Häzirki döwürde dolandyrylýan termoýadro reaksiýasyny amala aşyryp bolanok. Dolandyrylýan emeli termoýadro reaksiýasynyň teoretiki esasy bolup aşakdaky reaksiýalar hyzmat edýär:

$$^{2}_{1}\mathrm{D} + ^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow ^{4}_{2}\mathrm{He} + ^{1}_{0}n \quad \text{ýa-da} \quad ^{2}_{1}\mathrm{D} + ^{2}_{1}\mathrm{D} \rightarrow ^{3}_{1}\mathrm{H} + ^{1}_{1}p. \qquad (38.23)$$

Dolandyrylýan termoýadro sinteziniň amala aşyrylmagy adamzada ýeňil elementlerde jemlenen energiýanyň ummasyz hazynasyna ýol açar. Bu usul bilen ýadro energiýasyny almak üçin adaty suwuň düzümindäki deýteriýni ulanmak bolýar. Ummanlaryň suwlaryndaky deýteriniň mukdary, takmynan $4 \cdot 10^{13}$ tonna barabardyr. Bu mukdara degişli energiýa 10^7 $MWt \cdot ýyla$ deňdir. Bu ugurda işleýän hünärmenleriň pikirine görä, dolandyrylýan termoýadro reaksiýasynyň açarynyň tapyljak wagty we bütin adamzat üçin energetika meselesiniň peýdaly tarapa çözüljek wagty daşda däldir.

XXXIX BAP. ELEMENTAR BÖLEJIKLER

39.1. Material mikrobölejikler barada umumy düşünjeler

Islendik fiziki hadysa materiýanyň bölejikleriniň saýlanyp alnan toplumyndaky özara täsirleşmeleriň netijesidir. Bu sistemalary we hadysalary derňelýän obýektleriň hususy ölçeglerine ýa-da onuň düzümindäki bölejikleriň aradaşlyklaryna görä seljermek zerur. Biziň öwrenişen "adaty" şertlerimizde, ýagny adaty ölçeglerdäki jisimleriň toplumyna makrodünýä diýilýär, hadysalar bolsa, makroskopik fizika degişlilikde öwrenilýär. Obýektiň ölçegleri ýagtylyk ýaýranda millionlarça ýyl talap edýän (gysgaça millionlarça ýagtylyk ýylyna deň) bolsa, gürrüň megadünýä barada gidýär we ol kosmologiýa, astrofizika ylymlary tarapyndan öwrenilýär. Obýektiň ölçegleri 10^{-8} metrden kiçi bolanda, biz mikrodünýä bilen iş salyşýarys, olaryň kanunlary bolsa kwant fizikasyna laýyklykda kesgitlenýär. Şeýlelikde, material dünýäniň gurluş derejesi, basgançagy boýunça megadünýä (megos – grekçe uly, äpet), makrodünýä (macros – grekje uzyn, uly) we mikrodünýä (micros – grekje kiçi) derejelere bölünip, olaryň hersiniň mahsus aýratynlyklary, kanunalaýyklyklary, öwreniş usullary bardyr, emma olar biri-birinden üzňe bolman, çuňňur baglanşykdadyr.

Adamzat aňyýetiniň ähli ugurlar boýunça bolşy ýaly, fizikanyň taryhynda-da mikrodünýä bolan garaýyş barha kämilleşip, çuňlaşyp, aýdyňlaşyp gelýär. Eger-de gadymy alymlar maddanyň iň kiçi bölünmeýän bölejiklerden düzülýändigini çak edip, olara atom diýip at goýan bolsalar, eýýäm XIX asyrda ähli maddalaryň molekulalardan, molekulalaryň bolsa atomlardan ybaratdyklary gutarnykly kesgitlenýär. Netijede, mikrodünýä mahsus ölçegleriň $10^{-8} \div 10^{-10}$ m barabar bolan atom-molekulýar derejesi açylýar. Emma XX asyryň başlarynda, ýagny 1911-nji ýylda E. Rezerfordyň α-bölejikleriň seçelenmesi bilen bagly tejribelerinde, atomlaryň örän çylşyrymly içki gurluşlarynyň bardygy, olaryň hususy ölçegleri $10^{-14} \div 10^{-15}$ m bolan düzüm bölejikleriniň bardygy ýüze çykarylýar. Atomyň merkezinde dykyz ýadro bolup, onuň töweregini ýeňil, selçeň elektron bulutjygy büräp, üznüksiz hereket edýändigi äşgär bolýar. Netijede, materiýanyň bölejiklere bölünmeginiň atom derejesinde çäklenmeýändigi aýdyň bolýar.

Tertip nomeri Z, massa sany A bolan atom ýadrosynda Z proton (p) we $A - Z$ neýtron (n) jemlenýär hem-de onuň töwereginde Z elektron (e) ýerleşýär. Şonuň üçin hem atom ýadrosy atomyň himiki özboluşlylygyny kesgitleýär.

Protonlara we neýtronlara nuklon diýip umumy at dakylýar hem-de olar adronlar diýilýän mikroobýektleriň uly toparyna degişlidir. Şeýlelikde, materiýanyň kwant bölejikleriniň hususy ölçegleri: $R \approx 10^{-15}$ **adron** derejesi açylýar.

Atom ýadrosy gurşap alan elektronlarynyň käbirini, belli bir şertde ýitirip ýa-da goşmaça elektrony özüne birikdirip bilýär we otrisatel ýa-da položitel ionlaryň döremegine getirýär. Elektron şol bir atomyň düzüminde bir energetik derejeden başga bir energetik derejä geçip bilýär.

Atomlaryň himiki we ençeme fiziki häsiýetlerine elektron sebäpkärdir. Elektron maddanyň kwant bölejikleriniň leptonlar diýlip atlandyrylýan bölejikleriniň ilkinjisidir.

Atomyň düzüm bölejikleri açylandan soň olara elementar (iň sadaja) bölejikler diýip at berilýär. Emma, adronlaryň-da bölünýändikleri we görnüşini üýtgedip bilýändikleri belli boldy. Elektronyň içki gurluşynyň bardygy barada häzirki döwürde hiç hili maglumat ýok. Şeýle-de bolsa, atomyň düzüm bölekleri, "kerpiçjikleri" adatça elementar bölejikler diýlip hasap edilýär. Olaryň özara täsirleşmeleri öwrenilende (kosmos şöhleleri, emeli tizlendirilen zarýadly bölejikleriň täsirleşmesi we ş.m.), elementar bölejikler diýilýän 400 töweregi dürli bölejikler açyldy we olaryň sany gitdigiçe artýar. Häzirki zaman tizlendirijilerinde iň uly energiýa 10^{12} *eW* – 10^3 *GeW* bolup, degişli iň kiçi ölçeg aralyklary $R \approx 10^{-19}$ *m* töweregidir.

Bölünmeýän elementar bölejiklere hakyky elementar bölejikler ýa-da fundamental bölejikler diýilýär.

39.2. Elementar bölejikleriň umumy häsiýetleri

Tebigy şertlerde erkin ýa-da gowşak baglanyşykdaky hallarda duşýan durnukly ýa-da durnuklyrak elementar bölejiklerden iň bellileri e^- elektron (e^+ pozitron), p proton ($\tilde{p}$ antiproton), n neýtron ($\tilde{n}$ antineýtron), γ foton, ν_e elektron neýtrinosydyr ($\tilde{\nu}_e$ antineýtrino). Elementar bölejikleriň şu agzalanlardan özgeleri juda durnuksyzdyr.

Elementar bölejikleri aýry-aýralykda häsiýetlendirmek üçin ençeme fiziki ululyklar girizilip, şolaryň bahalaryna görä-de bölejikler biri-birinden tapawutlandyrylýar. Bulardan ulanylýanlary: massa, ömrüniň ortaça möhleti, spin bahasy, elektrik zarýady, magnit momenti we ş.m. Emma, bulardan başga-da, bir topar özboluşly ululyklar girizilýär. Olar barada soňra durup geçeris.

1. Bölejigiň massasy, Eýnşteýniň girizen $W_0 = mc^2$ ýa-da $m = \dfrac{W_0}{c^2}$ gatnaşygyna laýyklykda bölejigiň massasy energiýa ölçeginde aňladylýar (dynçlyk energiýasy). Sebäbi özara täsirleşmede energiýa deňleşigine gözegçilik etmek amatly bolýar. Mysal üçin:

$$m_\gamma = 0, \quad m_\nu = 0, \quad m_e \cong 0{,}51\ MeW$$
$$m_p \cong 938{,}3\ MeW, \quad m_n \cong 939{,}6\ MeW \tag{39.1}$$

Häzire çenli mälim bolan bölejikleriň içinde aralyk bozonyň massasy protonyňka görä 100 esseden-de gowrakdyr.

2. Elementar bölejigiň ömrüniň ortaça möhleti τ, onuň durnuklylygynyň ölçegi bolup, ol sekundlarda aňladylýar. Tejribelerde elektronyň, protonyň, fotonyň we neýtrinonyň dargaýanlygy barada aýdyň alamata duşulanok. Şona görä-de, olar absolýut durnukly hasap edilýär ($\tau = \infty$).

Neýtron barada aýdylanda, ol erkin halynda ortaça $\tau_n = (898 \pm 16)s$ döwürde

$$n \rightarrow p + \tilde{e} + \tilde{v}_e \tag{39.2}$$

ýagdaýda dargaýar. Ýadronyň düzüminde ol absolýut durnuklydyr. Şoňa görä-de neýtron durnukly (kwazistabil) hasap edilýär. Elementar bölejikleriň ortaça ömri 10^{-6}, 10^{-8}, 10^{-10}, 10^{-13} s bolan toparlary bar, α rezonanslar diýlip atlandyrylan has durnuksyz bölejikleriň bolsa ortaça ömri $10^{-24} \div 10^{-23}$ s barabar.

3. Spin $\vec{J}$ – elementar bölejikleriň impulsynyň hususy momenti, ýagny onuň dynçlykdaky hasaplaýyş sistemasyna görä impulsynyň momentidir.

Spin $\hbar$ ululygyň birliklerinde aňladylyp, onuň bitin ýa-da ýarymbitiň bahalaryna deň bolup bilýär. J spinli mikrobölejik $2J + 1$ spin hallarynda bolup biler. Saýlap alnan Z ugra spiniň proýeksiýasy $-J, -(J-1), ..., ...J+1, J$ bahalara eýe bolup biler. Mysal üçin, elektronyň, protonyň, neýtronyň hem-de neýtrinonyň spinleri $J = ½$, γ fotonyňky $J_1 = 1$. Spin elementar bölejikleriň iň wajyp häsiýetnamalarynyň biri bolup, dürli bölejikler üçin 0-dan (mezonlaryň aglabasy) $J = 6$ (α rezonansy) çenli üýtgeýär. Dynçlyk halynda bölejigi häsiýetlendirýän islendik wektor (mysal üçin, hususy magnit momenti) diňe spin wektory bilen ugurdaş (kollinear) bolup biler:

$$\vec{A} = \alpha\vec{J}. \tag{39.3}$$

Mundan başga-da J spin mikrobölejigiň haýsy statistika eýerýändigini kesgitleýär (Boze-Eýnşteýniň ýa-da Fermi-Dirakyň statistikalary). Bitin spinli bölejikleriň hemmesine **bozonlar,** ýarymbitin spinlilere bolsa – **fermionlar** diýilýär. Fermionlar Pauliniň prinsipine boýun egýärler. Ýarymbitin spin bolany üçin elektronlar fermionlara, bitin spinli fotonlar bolsa bozonlara degişlidir.

4. q elektrik zarýady elementar bölejigiň elektromagnit täsirleşmesine gatnaşmaga ukybyny häsiýetlendirýär we $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Kl elementar zarýadyň birligi esasynda aňladylýar.

Erkin haldaky bölejikleriň ählisiniň zarýady bitin sanly bahalara eýedir we käbir rezonanslardan ($q = \pm 2$) başgalarynyň zarýady nola ýa-da ± 1-e deňdir. Zarýadlara şeýle baha bermek ýeterlik derejede takyk diýip hasap etmek bolar. Häzirki wagta çenli geçirilen tejribelerde elektron bilen ($q = -1$) protonyň ($q = 1$) zarýadlarynyň jemi, iň bolmanda 10^{-21} e-den kiçidir. Edil şonuň ýaly-da eger neýtronyň zarýady bar hem bolsa ol 10^{-21} e-den kiçidir.

5. Hususy magnit momentiniň $\vec{p}_m$ wektory elementar bölejigiň daşky magnit meýdany bilen täsirleşmesini häsiýetlendirýär. Magnit meýdanynda oňa täsir edýän güýç:

$$\vec{F} = \text{grad}\left(\vec{p}_m \vec{B}\right), \text{ onuň momenti } \vec{M} = \left[\vec{p}_m \vec{B}\right]$$

we potensial energiýasy $W = -\left(\vec{p}_m \vec{B}\right)$ deňlikler bilen aňladylýar.

Belläp geçilişi ýaly, (39.3) aňlatmanyň esasynda:

$$\vec{p}_m = \gamma \vec{J}. \tag{39.4}$$

Saýlanyp alnan ugra (daşky meýdanyň ugruny) görä $\vec{J}$ spin kwantlaşýar. Proeksiýanyň maksimal bahasyna degişli magnit momenti μ harpy bilen bellenýär:

$$\mu = \gamma J. \tag{39.5}$$

Eger $\vec{p}_m$ we $\vec{J}$ ugurdaş bolsa $\mu > 0$ bolýanlygy aýdyňdyr. Magnit momenti $\mu_0 = e\hbar/2m$ magneton birliklerde aňladylýar. Elementar bölejigiň massasyny $m = m_e$ diýip alnanda:

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} \text{ – Bor magmetony,}$$

protonyň massasy alnanda:

$$\mu_e = \frac{e\hbar}{2m_p} \text{ – ýadro magnetony diýilýär.}$$

Foton we neýtrino üçin $\mu = 0$.

Proton we neýtron üçin $\mu_p \approx 2{,}79\mu_e$, $\mu_n = -1{,}91\mu_e$.

Elektron barada aýdylanda, umuman, $\mu_e \cong \mu_B$, emma has takyk ölçelende ujypsyzja tapawut (1947 ý.) ýüze çykaryldy, ýagny

$$\frac{\mu_e}{\mu_B} = 1{,}0011596567 \pm 35.$$

Kwant elektrodinamikasynyň nukdaý nazaryndan:

$$\mu_e = \mu_B\left(1 + \frac{\alpha}{2\pi}\right),$$

$$\alpha = \frac{e^2}{(4\pi\varepsilon_0\hbar c)} \approx \frac{1}{137{,}04},$$

bu ýerde α – inçe gurluş hemişeligi.

Şeýlelikde, 0,1% tapawut tejribe bilen doly tassyklanýar we elektromagnit täsirleşmesiniň kwant teoriýasynyň ýeterlik derejede kämilleşendigine şaýatlyk edýär.

6. Antibölejikler. 1930-njy ýylda P.Dirak her bir elementar bölejigiň özüne degişli antibölejiginiň tebigatda bolmalydygy baradaky pikiri orta atdy. 1932-nji ýylda ilkinji antibölejik (antielektron e^+ – pozitron) kosmos şöhleleri öwrenilende ýüze çykaryldy. Elementar bölejik bilen onuň antibölejiginiň massalary, ömürleri we spinleri deň bolmaly, olaryň elektrik zarýadlary, magnit momentleri, barion zarýadlary we beýleki ş.m. ululyklary bolsa alamaty ýa-da ugry boýunça biri-birine ters bolmaly. Foton we käbir beýleki bölejikler öz antibölejikleri bilen tapawutsyz deňdirler, şoňa görä-de olara hakyky neýtral bölejikler diýilýär.

Ýokary energiýaly foton ($E_\gamma > 2m_ec^2$) atom ýadrosy bilen täsirleşende elektron-pozitron jübüti döräp bilýär:

$$\gamma + \mathrm{X} \rightarrow \mathrm{X} + e^- + e^+. \tag{39.6}$$

Emma olar duşuşanlarynda annigilýasiýa (latynça – ýok bolmak, hiç zada öwrülmek) bolup, ýene-de fiziki foton döreýär:

$$e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma. \tag{39.7}$$

Bu hadysa materiýanyň ýitmesi, ýok bolmasy däldir. Ol diňe bir bölejigiň görnüşiniň üýtgemesidir.

Häzirki döwürde elementar bölejikleriň ählisiniň diýen ýaly antibölejikleri tapylandyr. Olaryň deňlemeleri bolsa özara simmetrikdir.

39.3. Elementar bölejikleriň dürli görnüşleriniň açylyşy

1932-nji ýylda elementar bölejikleriň bary-ýogy dört sanysy (e, γ, p, n) belli bolup, olar atomyň gurluşyny sadaja düşündirmäge, göz öňine getirmäge ýeterlikdi. Ýagny atomyň ýadrosynyň düzümine protonlar we neýtronlar girýär, ýadronyň töweregini bolsa elektronlaryň gatlajyklary gurşap alýar. Elektronlaryň sany ýadrodaky protonlaryň sanyna deň we olar atomyň himiki aktiwligini kesgitleýärler. Elektron gatlajyklaryň halynyň üýtgemesi fotonyň goýberilmegi ýa-da siňdirilmesi bilen alamatlandyrylýar. Elektrik zarýadly bölejikleriň täsirleşmesi foton alşygy arkaly amala aşyrylýar. Emma β – dargamada energiýa deňleşigini üpjün etmek üçin ýene-de bir bölejigiň bolmalydygy barada çaklamasyny W.Pauli teklip etdi we neýtrinonyň esasy häsiýetlerini öňünden kesgitlemegi başardy (neýtrino italýança – örän kiçijek neýtral bölejigi aňladýar).

Ýadronyň düzüminde protonlar bilen neýtronlary nähili güýç saklap bilýänligi uzak wagtlap nämälimligine galdy. Diňe 1934-35-nji ýyllarda ýadro güýçleriniň alyşma bölejikler arkaly bolýanlygy aýdyňlaşdy (I.Tamm, D.Iwanenko, H.Ýukawa). H.Ýukawanyň görkezişine görä, ýadro güýçlerini döredýän alyşma bölejikleriniň massasy elektronyň massasyndan, takmynan 200 ÷ 300 esse uly, nuklonlaryň (p, n) massasyndan bolsa 10 esse kiçi bolmaly. Şoňa görä-de olara mezonlar (mezon – grekçe aram, ortalyk bölejikler) diýlip at berilýär.

Kosmos şöhleleri öwrenilýärkä 1937-nji ýylda massasy $m \approx 200\ m_e$ bolan zarýadly bölejikler bellige alnanda olara Ýukawanyň çak eden mezonlarymyka öýdüldi. Emma soňraky barlaglaryň netijesinde olaryň ýadro bilen örän gowşak täsirleşýändikleri we häsiýetleri boýunça elektrona meňzeşdikleri kesgitlenildi. Ol bölejiklere mýuonlar (μ^-) diýip at goýuldy. Onuň antibölejigi položitel zarýadly μ^+ (antimýuon). Mýuonlaryň ömri $T \sim 10^{-6}\ s$ bolup, olar dargama sezewar bolýarlar:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \tilde{\nu}_e + \nu_\mu, \qquad \mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \tilde{\nu}_\mu, \tag{39.8}$$

bu ýerde $\nu_\mu(\tilde{\nu}_e)$ – mýuon neýtrinosy (antineýtrinosy). 1975-nji ýylda has agyr ($m = 3500m_e$)$\tau^-(\tau^+)$ taon (antitaon) açyldy. Taonyň ömri $\sim 10^{-13}$ s bolup, onuň hem öz neýtrinosy-taon neýtrinosy (antineýtrinosy) $\nu_\tau(\tilde{\nu}_\tau)$ bardyr.

Ýadro täsirleşmesinde alyşma bölejikleri –π pionlar (π^+, π^0, π^-) XX asyryň 40-njy ýyllarynyň ahyrynda kosmos şöhlelenmelerinde açyldy. Olaryň ömri $T - 10^{-8}$ s bolup, soňra dargaýyşa sezewar bolýarlar:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu, \qquad \pi^- \rightarrow \mu^- + \tilde{\nu}_\mu. \tag{39.9}$$

Pion π^0 – hakyky neýtral bölejik bolmak bilen, ol has durnuksyzdyr we $T - 10^{-16}$ s döwürde $\pi^0 \rightarrow (2\gamma)$ görnüşde dargaýar.

XX asyryň 50-nji ýyllarynda elementar bölejikleriň ýene-de bir uly topary açyldy. Olar: **kaonlar –K^+ K^0, lýambda-giperon Λ^0, sigma-giperonlar Σ^+, Σ^0, Σ^-, ksi-giperonlar $\Xi^0\Xi^-$ omega-giperon Ω^{-1}.**

Giperonlaryň (hyper-grekçe aşa, äpet) massalary protonyň massasyndan uludyr. Olaryň täsin tarapy örän tiz (10^{-23} s), jübüt-jübütden döräp, ýeke-ýekeden, has haýal (10^{-10}; 10^{-8} s) dargaýarlar. Şoňa görä-de bu topara **“geň” bölejikler** (strannyýe) diýip at goýlan.

XX asyryň 60-njy ýyllarynda elementar bölejikleriň, **rezonanslar** diýip atlandyrylan iň uly topary (ýüzden-de köp) açylýar. Rezonanslaryň ömri örän gysga, ýagny $10^{-24} \div 10^{-23}$ s töweregi, emma olar elementar bölejiklere mahsus (massa, spin, elektrik zarýady we ş.m.) ähli ululyklara eýedirler.

1974-nji ýylda durnuklyrak massiw rezonans J/ψ (ji-psi) mezonyň ýüze çykarylmagy bilen, “jadylanan” (oçarowannyýe) diýip atlandyrylan täze topar ((D^+, D^0, F^+, Λ_c^+) we başgalar) açyldy.

Bularyň ömri -10^{-20} s bolup, massalary protonyňkydan 3 esse uly. 1977-nji ýylda massasy boýunça protondan 10 esseden-de uly γ ipsilon-mezon açyldy. “Enaýy” (prelestnyýe) bölejikler diýip atlandyrylan bu topara B^+, B^0 mezonlar hem degişlidir.

1983-nji ýylda **gowşak täsirleşmäni** geçiriji **aralyk bosonlar** W^+, W^-, Z^0 bellige alyndy. Olar häzire çenli belli bolan iň agyr we iň durnuksyz bölejiklerdir ($T = 10^{-25}$ s, $m_w = 81$ GeW, $m_z = 93$ GeW), (deňeşdiriň $m_p = 0{,}938$ GeW).

Soňky döwürlerde “jadylynan” we “enaýy” bölejikleriň has del görnüşleriniň, “hakyky” bölejikleriň toplumynyň bardygy çak edilýär (Dirakyň monopollary, kwarklar, glýuonlar we ş.m.).

39.4. Elementar bölejikleriň özara öwrülişikleri

Nazary we tejribe esasda mikrobölejikleri öwrenmekde, köplenç, **seçelenme** usulyndan peýdalanylýar. Biziň ozal seredip geçen tejribelerimiz (Rezerfordyň, Frank-Gersiň, Ştern-Gerlahyň, Komptonyň we başgalaryň tejribeleri) oňa mysal bolup biler. Bularyň hemmesinde-de mikrobölejikleri biri-birine ýeterlik golaýlaşdyryp täsirleşmäge mejbur etmek we täsir sebäpli hereket hallarynyň üýtgeýşine ýa-da täze döreýän bölejikleriň hereketini ýüze çykarmak (detektirlemek) zerurdyr. Özara täsirleşme örän köpdürli hadysalardan ybarat bolup, olar, esasan, üç uly toparlara bölünýär:

1. Maýyşgak seçelenmede

$$a + b \rightarrow a + b \qquad (a,\ b\text{-bölejikleriň belgisi})$$

mikrobölejikler özgermän, diňe öz hereket halyny üýtgedýärler. Rezerfordyň we Komptonyň tejribeleri bu hadysa mysal bolup biler.

2. Maýyşgak däl hadysalarda (şeýle hadysalara, köplenç, reaksiýa diýilýär)

$$a + b \rightarrow C_1 + ... + C_n$$

täsirleşýän bölejikler başga görnüşli bölejiklere öwrülýärler. Oňa agzalyp geçirilen (39.6), (39.7) we ş.m. reaksiýalar mysal bolup biler.

3. Seçelenme hadysalarda döreýän bölejikler, köplenç, durnuksyz bolýarlar we dargama sezewar bolýarlar:

$$a \rightarrow C_1 + ... + C_n.$$

Şeýle hadysa (39.8), (39.9) reaksiýalar mysal bolup biler.

Dargama hadysasynda, şol bir başlangyç serişdelerde-de, elmydama şol bir bölejikleriň däl-de, gaýtam dürli bölejikleriň döräp bilýändigini belläp geçmelidiris. Reaksiýadan öňki täsirleşýän bölejikleriň toplumyna **girelge kanaly,** reaksiýanyň ahyrynda döreýän bölejikleriň toplumyna bolsa **çykalga kanaly** diýilýär. Mysal üçin, K^+ – kaonyň dargamasynda nähili önümleriň döreýänligini we olaryň ortaça bolmak ähtimallygyny alyp bileris:

$$K^+ \begin{cases} \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu & (63,5\%) \\ \rightarrow \pi^+ + \pi^0 & (21,2\%) \\ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^- & (5,6\%) \\ \rightarrow \dots\dots\dots\dots & (11,7\%) \end{cases} \qquad (39.10)$$

Ähli seçelenme we dargama hadysalar energiýanyň, impulsyň, impuls momentiniň, elektrik zarýadynyň saklanma kanunlaryna doly laýyklykda bolup geçýärler. Girelge we çykalga kanallaryndaky bölejikleriň doly energiýalarynyň tapawudyna **hadysanyň (prosesiň) energiýasy** diýilýär. Bu energiýanyň hasaplanyş formulalary:

$$\text{seçelenme } Q = \left[(m_a + m_b) - \sum_{i=1}^{n} m_i\right]c^2, \qquad (39.11)$$

$$\text{dargama } Q = \left[m_a - \sum_{i=1}^{n} m_i\right]c^2. \qquad (39.12)$$

Eger massalar energiýa birliklerinde aňladylýan bolsa, onda (39.11), (39.12) formulalarda c^2 ýazylmaýar.

Islendik maýyşgak hadysalarda energiýa bölünip çykarylmaýar we ýuwdulmaýar, ýagny $Q = 0$. Maýyşgak däl hadysalaryň energiýasy položitel ($Q > 0$) ýa-da otrisatel ($Q < 0$) bolup biler. Birinji şertde oňa **ekzotermik** (ýylylyk çykarýan), ikinji şertde bolsa – **endometrik** (ýylylyk siňdirýän) diýilýär. Endotermik reaksiýalar täsirleşýän bölejikleriň energiýalarynyň belli bir derejesinden ýokary ýagdaýynda bolup geçýär. Degişli iň kiçi energiýa bolsa, **bosaga** energiýasy ýa-da gysgaça **bosaga** diýilýär ($W_{bos} \geq |Q|$).

Impulsyň saklanma kanunyna laýyklykda, eger garşylykly hereket edip çaknyşýan bölejikleriň doly impulsy nola deň bolsa, onda olaryň energiýasynyň täze döreýän bölejikleriň dynçlyk massasyna öwrülmegi mümkin. Mysal üçin, elektron-pozitron jübütiniň döremegi bilen bagly (39.6.) reaksiýa ekzotermikdir.

Onuň energiýasy $Q \approx 2m_ec^2 \approx 1{,}02\ MeW.$

Tersine, elektron-pozitron annigilýasiýasy endotermik reaksiýadyr. Onuň reaksiýasy:

$$Q = -2m_ec^2 \approx -1{,}02\ MeW.$$

Antiprotonyň döremegine getirýän endotermik reaksiýada iki proton garşylykly deň hereket edeňde energiýa bosagasy

$$Q = -2m_pc^2 \approx -1{,}9\ GeW$$

(gigaelektronwolt ýa-da 10^9 *eW*).

Emma protonlaryň biri başda hereketsiz bolsa, onda

$$W_{bos} = 6m_pc^2 \approx 5{,}7\ GeW.$$

Bu ýerden görnüşi ýaly, garşydaş protonlary täsirleşdirmek has amatlydyr. Uly energiýaly bölejikleriň esasy çeşmesi XIX asyryň 50-nji ýyllaryna çenli kosmos şöhleleri bolup, olaryň energiýasy $10^{10} \div 10^{20}$ *eW* ýetýär. Emma howa gatlagynyň täsiri, takyk gözegçiligiň kynlygy, dykyzlygynyň pesligi köp päsgelçilikler döredýärdi.

Häzirki döwürde tejribe geçirmek üçin elementar bölejikleriň tizlendirijileri ulanylýar. Olarda tejribe şertleri takyk gaýtalanyp bilýär. Olarda elektronlary 35 *GeW*, protonlary 10^6 *GeW* energiýa çenli tizlendirip bolýar we gelejekde bu sanlary hasda ulaltmak üçin täze desgalar gurulýar. Olaryň iň oňaýlysy takmyn deň, emma garşylyklaýyn ugrukdyrylan impulsy bölejikleri çaknyşdyrmaga mümkinçilik berýan **kollaýderler** diýip atlandyrylýan desgalardyr.

Täsirleşdirilýän bölejikleriň çogdamlarynyň biri esasy tizlendirijiden, ikinjisi bolsa **toplaýjy halkadan** alynýar. Toplaýjy halka esasy tizlendirijiden ýokary energiýaly zarýadly bölejik girizilýär we onuň tekizligine perpendikulýar magnit meýdany bölejikleri töwerek boýunça aýlanmaga mejbur edýär (Lorens güýjüni ýatlaň). Örän ýokary wakuumda bölejikler energiýasyny ýitirmän diýen ýaly birnäçe günüň dowamynda aýlanyp bilýärler. Gerek pursatynda magnit meýdan öçürilip, toplanan bölejikler esasy tizlendirijiden çykýan bölejiklere garşylyklaýyn gönükdirilýär.

Mysal üçin, 2008-nji ýylda dünýäde iň uly hasaplanýan, Fransiýa bilen Şweýsariýanyň araçäginde gurulan uly adron kollaýderiniň käbir görkezijilerine seredeliň. Onuň esasy halkasynyň uzynlygy 26 659 *m*. Ol protonlary we agyr ionlary (gurşunuň ionlary) ýagtylygyň tizligine çenli tizlendirmek hem-de biri-birine ugrukdyrylan protonlaryň (agyr ionlaryň) akymynyň çaknyşmasynyň netijesini öwrenmek üçin niýetlenendir.

Bu adron kollaýderinde ilkinji gezek protonlaryň akymyny 1,18 *TeW*-a çenli tizlendirmek amala aşyryldy (1 *TeW* = 10^{15} *eW*). Bu şertde proton – proton çaknyşmasynynyň energiýasy iki esse, ýagny 2,36 *TeW* bolar. Bu energiýanyň 7,0 *TeW*-a ýetiriljekdigi barada ýörite habar berildi.

39.5. Fundamental täsirleşmeler

Häzirki wagtda dürli görnüşdäki dört täsirleşme, ýagny zarply (güýçli), elektromagnit, gowşak we grawitasiýa täşirleşmeleri tapawutlandyrylýar.

1. Zarply täsirleşme adronlar diýlip atlandyrylýan bölejiklere (şol sanda protonlara we neýtronlara) mahsusdyr. Zarply güýjüň täsiri bilen adronlar ýadronyň düzüminde saklanýar. Onuň täsiri bilen antiprotonyň, antineýtronyň, geň bölejikleriň döremegine getirýän reaksiýalar bolup geçýär.

2. Elektromagnit täsirleşme diňe elektrik zarýadly bölejiklere, fotonlara mahsusdyr we esasy öwrenilen güýçlerdir. Bu görnüşdäki täsirleşme maddalaryň makroskopik häsiýetleriniň aglabasyna, elektron-pozitron jübütiň döremegine hem-de annigilýasiýasyna, neýtral π^0 pionyň synmagyna, zarýadly bölejikleriň seçelenmesine sebäp bolýar.

3. Gowşak täsirleşme fotondan başga ähli mikrobölejiklere mahsusdyr. Gowşak täsirleşme atom ýadrosynda β öwrülişik bolmagyna, elementar bölejikleriň aglabasynyň (şol sanda neýtronyň) durnuksyzlygyna we ş.m. getirýän güýçlerdir. Grawitasiýadan başga diňe gowşak täsirleşmä gatnaşýan aýratyn häsiýetli bölejik neýtrinodyr.

4. Grawitasion täsirleşme älemdäki ähli jisimlere mahsusdyr we bütündünýä dartyşma güýçleri hökmünde ýüze çykýar. Grawitasion täsirleşme jisimiň massasyna bagly bolmak bilen beýleki täsirleşmelere görä iň gowşagydyr. Şoňa görä-de, grawitasion täsirleşme makro we megadünýäde has ähmiýetli bolup, mikrodünýäde uly ähmiýete eýe däldir. Onuň ýeterlik täsiri diňe mikrobölejigiň energiýasy $W \sim 10^{28}$ *eW* ýa-da degişli aralyklar $R \sim 10^{-35}$ *m* bolanda duýulýar.

Fundamental täsirleşmeler α_i intensiwligi, R_i täsir radiusy we τ_i mahsus wagty bilen tapawutlandyrylýar. Täsirleşmeleriň intensiwlikleriniň $\frac{\alpha_i}{\alpha_j}$ gatnaşygyna şol täsirleşmeleriň energiýalarynyň gatnaşygy hökmünde düşünilýär. Şeýle kesgitleme gümürtigräk bolsa-da, amatlylygy, görnetinligi bilen tapawutlanýar. Ýönekeýje mysal – grawitasion we elektromagnit täsirleşmeleriň energiýalarynyň gatnaşygy:

$$\frac{\alpha_G}{\alpha_E} = \frac{Gm^2}{r} : \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r} = 4\pi\varepsilon \frac{Gm^2}{e^2} \approx 10^{-36}, \qquad (39.13)$$

ýagny grawitasion täsirleşme iki protonyň arasynda elektromagnit täsirleşmeden 10^{36} esse gowşakdyr. Hasaplamalaryň görkezişine görä, eger zarply täsirleşmäniň intensiwligini bir birlik diýip alsak, şoňa görä beýleki täsirleşmeleriň intensiwligini alarys: $\alpha_S \sim 1$; $\alpha_E \sim 10^{-2}$; $\alpha_W \sim 10^{-10}$; $\alpha_G \sim 10^{-38}$.

Bu ýerde α_S – zarply; α_E – elekromagnit; α_W – gowşak; α_G – grawitasion täsirleşmeleriň intensiwligi.

Fundamental täsirleşmäniň ýüze çykýan aralyklarynyň ýokary çägini R_i täsirleşme radiusy aňladýar. Tejribelere görä:

$$R_S \sim 10^{-15}\, m; \quad R_E \sim \infty; \quad R_W \sim 10^{-18}\, m; \quad R_G \sim \infty.$$

Fundamental täsirleşmelere mahsus wagt:

$$\tau_S \sim 10^{-23}\, s; \quad \tau_E \sim 10^{-20}\, s; \quad \tau_W \sim 10^{-13}\, s; \quad \tau_G \sim ? \text{ (näbelli)}$$

Bu wagtlar şol täsirleşmä gatnaşýan elementar bölejigiň iň kiçi ömür dowamlylygyny aňladýar. Mysal üçin, zarply täsirleşmä sezewar bolýan, iň durnuksyz rezonanslaryň ömrüne barabar ululyk $\tau_S \approx 10^{-23}\, s$.

39.6. Leptonlar

Zarply täsirleşmä gatnaşýan ýarymbitin spinli ($J = 1/2$) fermionlara **leptonlar** (grekçe leptos-ýeňil, ownuk) diýilýär.

Häzirki wagtda elektrik zarýadly üç dürli lepton – e^- elektron, μ^- mýuon, τ taon we olaryň antibölejikleri (e^+, μ^+, τ^+) bellidir. Olaryň her birine degişli neýtral bölejikler-neýtrinolar (ν_e, ν_μ, ν_τ) we antineýtrinolar bardyr. Başgaça aýdylanda, leptonlaryň üç dürli nesli ýa-da dubletleri (jübütleri) bardyr. Olara elektron jübüti (e^-, ν_e), μ mýuon jübüti (μ^-, ν_μ) we τ taon jübüti (τ^-, ν_τ) diýilýär. Olara degişli antilepton jübütleri hem bardyr:

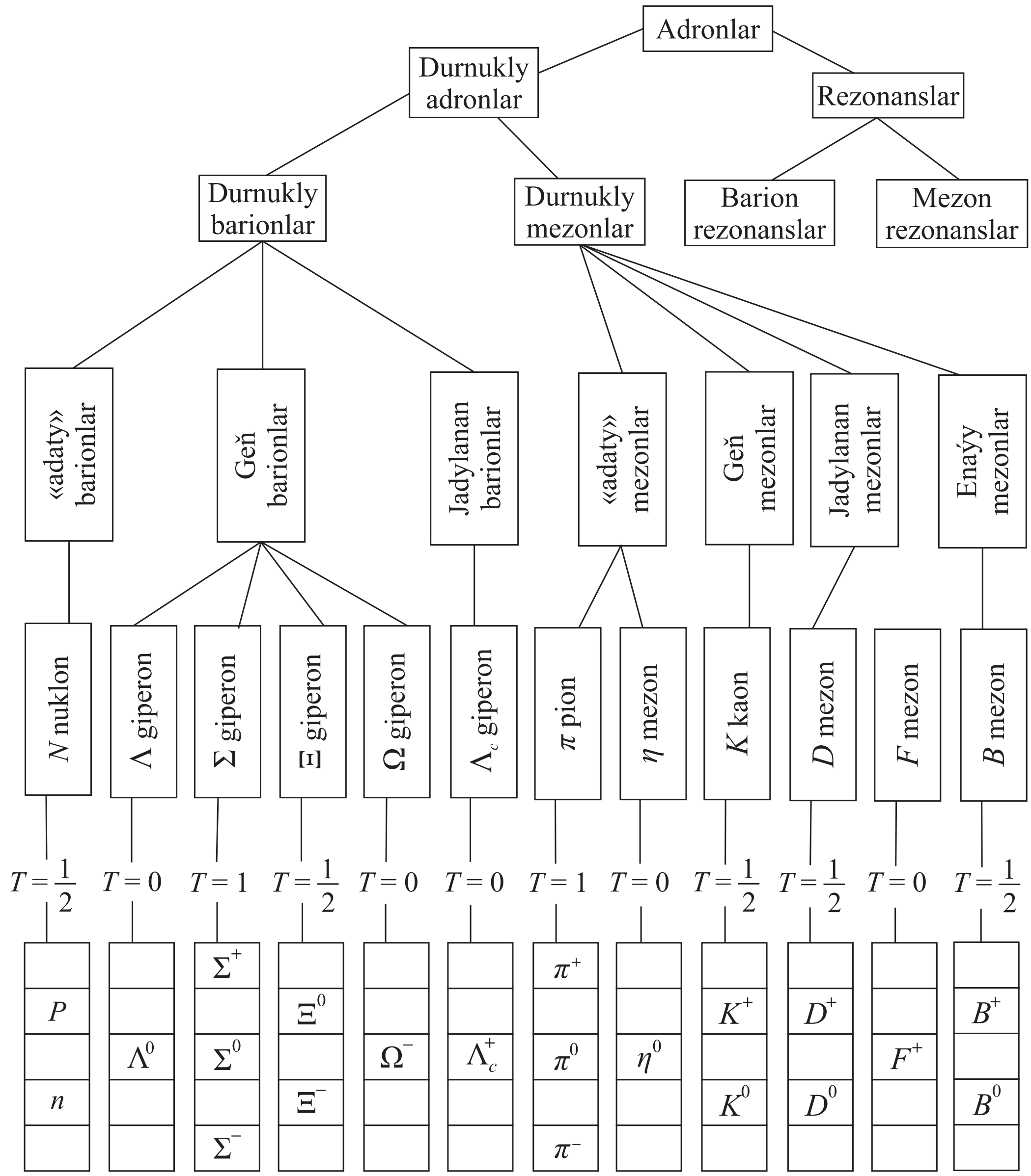
$$\tilde{E} = (e^+, \tilde{\nu}_e), \quad \tilde{M} = (\mu^+, \tilde{\nu}_\mu), \quad \tilde{T} = (\tau^+, \tilde{\nu}_\tau).$$

Leptonlary biri-birinden tapawutlandyrmak üçin L **lepton zarýady** diýilýän ululyk girizilýär. Ähli leptonlar üçin $L = +1$, antileptonlar üçin $L = -1$, beýleki bölejikler üçin $L = 0$. Emma lepton zarýadynyň özara öwrülişigi bolmaýanlygy sebäpli, lepton zarýady üç dürli zarýadlaryň jemi görnüşde alynýar:

$$L = L_e + L_\mu + L_\tau. \qquad (39.14)$$

Bulara, degişlilikde, elektron zarýady, mýuon zarýady we taon zarýady diýilýär (olaryň zarýadlarynyň, massalarynyň we spinleriniň bahalary 39.1-nji tablisada görkezilýär). Gowşak täsirleşmede ähli özara öwrülişiklerde diňe bir jemi lepton zarýady däl-de, onuň düzümindäki aýry-aýry lepton zarýadlary-da (L_e, L_m, L_t) üýtgemän saklanýarlar.

39.1-nji tablisa



Grawitasiýadan başga diňe gowşak täsirleşmä gatnaşýan neýtrino (antineýtrino) täsin häsiýetleri bilen tapawutlanýar. Onuň dynçlyk massasynyň takyk nola deňdigi ýa-da noldan tapawutlanýandygy baradaky pikirler doly aýdyňlaşdyrylman gelýär. Neýtrino bölejiginiň spini ½ bolup, ol impulsyň ugruna ýa-da garşysyna gönükdirilen bolup biler. Spiniň impulsyň ugruna proýeksiýasy ±½ bolup, onuň iki esse bahasyna spirallyk diýilýär. Neýtrino çepbekeý spirally, antineýtrino bolsa, saglakaý spirally bölejiklerdir.

39.7. Adronlar

Zarply täsirleşmä gatnaşmaga ukyply we oňa hakyky gatnaşýan elementar bölejiklere **adronlar** diýilýär.

Bu bölejikler beýleki fundamental täsirleşmelere-de gatnaşýarlar. Olaryň sany häzirki wagtda 300-den-de geçýär we durnukly ($\tau >> 10^{-23}$ s) hem-de durnuksyz ýa-da rezonanslar ($\tau \sim 10^{-24} - 10^{-23}$ s) diýip atlandyrylýan iki uly topara bölünýär (39.1-nji we 39.2-nji tablisalar). Adronlaryň ömri (syngy dargamasyna çenli gerek bolan ortaça wagt) olaryň dargamagynda haýsy fundamental güýjüň esasydygy bilen baglydyr. Dargamanyň sebäbi, esasan, zarply täsirleşmedir. Eger esasy sebäp elektromagnit täsirleşmesi bolsa, onda bölejik durnukly bolýar. Muňa Σ^0 – giperonyň dargamasy mysal bolup biler:

$$\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma \qquad (\tau \approx 5 \cdot 10^{-20}\ s). \qquad (39.15.)$$

Bitin spinli adronlara **mezonlar,** ýarymbitin spinli adronlara bolsa **barionlar** diýilýär. Öň belläp geçilişi ýaly, mezonlar statistikasy boýunça **bozonlara,** barionlar bolsa, **fermionlara** degişlidir.

Adronlary häsiýetlendirmek üçin lepton zarýadlaryna meňzeş **barion zarýady** B girizilýär. Bu şertde-de barionlaryň zarýady $B = +1$, antibarionlaryňky $B = -1$. Barion zarýady ähli reaksiýalarda üýtgemän saklanýar diýip hasaplanýar. Barionlara degişli däl beýleki ähli bölejikleriň **barion zarýady** $B = 0$.

Adronlar häsiýetleri boýunça kiçeňräk meňzeş toparçalara bölünýärler. Olara **izomultipletler** diýilýär. Bu toparçalara massalary we zarply täsirleşmä gatnaşyşlary deň, emma beýleki fundamental täsirleşmelere gatnaşyşlary dürli bolan adronlar girýär. Mysal üçin: N (nuklon) izodubletine girýän p (proton) bilen n (neýtron) atom ýadrosynda özaralarynda ($p-p, p-n, n-n$) deň derejede täsirleşýär, emma elektromagnit täsirleşmeleri dürlüdir. Izomultipletlere girýän adronlaryň N sanaw sanyny kesgitlemek üçin matematiki aparatda izospin diýip atlandyrylýan T ululyk girizilýär we adaty spinlere meňzeş onuň T_z proýeksiýasy kesgitlenýär. Izomultipletiň agzalarynyň sany $N = 2T + 1$.

Bölejigiň belgisi	**Spin, $\hbar$**	**Massa, *MeW***	**Ortaça ömri, *s***	**Kwark düzümi**
$\pi^{\pm}$ π^0	0	139,57 134,96	$2{,}6 \cdot 10^{-8}$ $0{,}8 \cdot 10^{-16}$	$u\tilde{d}(d\tilde{u})$ $u\tilde{u}(d\tilde{d})$
η^0	0	548,8	$0{,}7 \cdot 10^{-18}$	$u\tilde{u}$, $d\tilde{d}$, $s\tilde{s}$
K^+ K^0	0	493,67 497,7	$1{,}2 \cdot 10^{-8}$ $\begin{cases}0{,}9 \cdot 10^{-10}\\ 5{,}2 \cdot 10^{-8}\end{cases}$	$u\tilde{s}$ $d\tilde{s}$
D^+ D^0	0	1869 1865	$4 \cdot 10^{-13}$ $2 \cdot 10^{-13}$	$c\tilde{d}$ $c\tilde{u}$
F^+	0	1971	$2 \cdot 10^{-13}$	$c\tilde{s}$
B^+ B^0	0	5271 5274	$\sim 10^{-12}$	$u\tilde{d}$ $a\tilde{b}$
p n	½	938,28 939,57	$> 2 \cdot 10^{32}$ ýyl 898 ± 16	uud udd
Λ^0	½	1115,6	$2{,}6 \cdot 10^{-10}$	uds
Σ^+ Σ^0 Σ^-	½	1189,4 1192,5 1197,3	$0{,}8 \cdot 10^{-10}$ $5 \cdot 10^{-20}$ $1{,}5 \cdot 10^{-10}$	uus uds dds
Ξ^0 Ξ^-	½	1315 1321,3	$2{,}9 \cdot 10^{-10}$ $1{,}6 \cdot 10^{-10}$	uss dss
Ω^-	3/2	1672,5	$0{,}8 \cdot 10^{-10}$	sss
Λ_c^+	½	2281	$2 \cdot 10^{-13}$	udc

Mysal üçin, nuklonlaryň sany iki (p we n), şoňa görä-de neýtron üçin $T_n = -\frac{1}{2}$, proton üçin $T_p = +\frac{1}{2}$, pionlaryň (π^+, π^0, π^-) sany $N = 3$, şoňa görä-de $T = 1$, $T_z(\pi^+) = +1$; $T_z(\pi^0) = 0$; $T_z(\pi^-) = -1$.

Zarply täsirleşmede izospin üýtgemän saklanýar, beýleki täsirleşmede bolsa saklanmaýar.

Ilkibaşda, diňe nuklonlar bellikä bu şertli düzgün doly kanagatlandyrýardy, ýagny olaryň zarýady $q \approx T_z + 1/2B$ aňlatma arkaly doly kesgitlenýär. Emma XX asyryň ortalarynda anyklanan “geň” bölejiklerde (K^+ mezonlarda $q = +1$, $T_z = +1/2$, $B = 0$) ol şert ýerine ýetmeýär. Şoňa görä-de, kwant sanlaryň ýene bir görnüşi S-geňlik diýip at berlen san girizilýär. “Geň” bölejikler üçin Gell-Mann-Nişijimiň gatnaşygy:

$$q = T_z + 1/2(B + S) \qquad (39.16.)$$

ýerine ýetmelidir.

K^+ – mezon üçin geňlik $S = +1$, “adaty” bölejikler üçin bolsa $S = 0$ diýip kabul edilýär.

Geňlik zarply we elektromagnit täsirleşmede saklanýar, emma gowşak täsirleşmede saklanmaýar. Geň bölejikler elmydama jübüt-jübütden we örän tiz ($\tau \sim 10^{-23}$ s) döreýärler. Darganlarynda bolsa ýeke-ýekeden, haýal ($\tau \sim 10^{-10} \div 10^{-8}$ s) dargaýarlar. Şonuň üçin-de olara geň bölejikler diýip at goýlan. Sebäbi olar dörände zarply täsirleşmä, darganlarynda bolsa gowşak täsirleşmä sezewar bolýarlar.

XX asyryň 70-nji ýyllarynda açylan täze elementar bölejikler üçin (39.16.) aňlatma hem kanagatlandyrmaýar. Bu bölejiklere “jadylanan” (iňlisçe – charm, rusça – oçarowannyýe) diýip at dakylýar we ýene-de bir kwant sany – C “jadylananlyk” girizilýär. Netijede, Gell-Mann-Nişijimiň şerti

$$q = T_z + 1/2(B + S + C) \qquad (39.17.)$$

görnüşi alýar. “Jadylananlyk” hem “geňlik” ýaly saklanma häsiýete eýedir.

Elementar bölejikleriň ýene-de bir üýtgeşik toparyna “enaýy” (iňlisçe – beanty, rusça – prelestnyýe) bölejikleriň açylmagy bilen, ýene-de bir kwant san – b “enaýylyk” düşünjesi girizilýär we (39.17.) aňlatma

$$q = T_z + \frac{1}{2}(B + S + C - b) \qquad (39.18.)$$

görnüşi alýar.

Nazary seljerişleriň görkezişine görä, elementar bölejikleriň ýene-de bir görnüşi bolmaly diýip çak edilýär. Olara “hakyky” elementar bölejikler diýip at goýlan. Eger “hakyky” (iňlisçe-truth, rusça – istinnyý) bölejikler tejribede açylsalar, onda t – “hakykylyk” diýip ýene-de bir kwant san girizilmeli bolar.

Her bir täsirleşme özüne mahsus bolan saklanma kanunlary bilen tapawutlanýar. Täsirleşme näçe batly boldugyça, şonça-da, ol has simmetrikdir, ýagny oňa saklanma kanunlary mahsusdyr.

Ähli täsirleşmelerde energiýa, impuls, impulsyň momenti, elektrik zarýady hökman saklanýar. Üç dürli lepton zarýadlaryň, barion zarýadynyň saklanma kanunlarynyň-da bozulýan ýagdaýlary häzire çenli mälim däldir. Şoňa görä-de, olar hem saklanýar diýmäge esas bar.

Zarply täsirleşme iň simmetrik täsirdir. Onuň täsirine geçýän hadysalarda izospin, onuň proýeksiýasynda “geňlik”, “jadylananlyk” we beýleki fiziki ululyklaryň aglabasy saklanýandyr. Elektromagnit täsirleşmede, eýýäm izospin saklanmaýar. Gowşak täsirleşmede diňe uniwersal saklanma kanunlary amala aşýar.

39.8. Kwarklar

Elementar bölejikler düýpli öwrenildigiçe, olaryň iň köp sanlysy bolan **adronlaryň düzme gurluşynyň** bardygy aýan bolup başlaýar. Ilki başdan belli bolan adronlaryň (proton we neýtron) radiuslaryny takyk ölçemek başardýar, ýagny

$$R_N \approx 0{,}8 \cdot 10^{-15}\ m$$

Protonyň zarýadynyň deňölçegli paýlanman,

$$\rho(r) = e \cdot 3{,}06\exp(-4{,}25r) \qquad (39.19.)$$

görnüşde eksponensial paýlanýandygy tejribelerde subut edilýär we nuklonlarda (proton) kwantlaýyn gurluşyň bardygy elektronlaryň maýyşgak däl seçelenmesi arkaly ýüze çykarylýar.

1964-nji ýylda adronlaryň düzümindäki has ownuk bölejikleriň bolmalydygy barada çaklama teklip edilýär. Ol bölejiklere Gell-Mamm tarapyndan **kwark** diýilip at berilýär. Şeýlelikde, elementar bölejikler iki derejä: adronlara we fundamental bölejiklere bölünýär. Ilki başda üç kwark bilen oňňut edilen bolsa, häzir alty kwark we olaryň antikwarklary bar diýip hasap edilýär.

Kwarklaryň we antikwarklaryň elektrik zaýadlary, elementar zarýad hasaplanýan, elektronyň e zarýadynyň üçden birine ýa-da üçden ikisine $\left(\frac{1}{3}e; \frac{2}{3}e\right)$, spinleri bolsa $\frac{h}{2}$. Kwarklaryň sanawy we ölçeg ululyklary 39.3-nji tablisada getirilen.

Kwarklar leptonlar ýaly üç jübüt (dublet) (u, d), (c, s), (t, b) emele getirýärler. Birinji jübüt adaty nuklonlaryň, ikinji “jadylanan” we “geň” bölejikleriň, üçünji jübüt bolsa “hakyky” we “enaýy” bölejikleriň düzüminde bolup, olaryň esasy häsiýetlerini kesgitleýär. Kwarklaryň dürli düzümde çalşyrylmasy esasynda häzire çenli belli bolan adronlaryň ählisini alyp bolýar.

39.3-nji tablisa

Kwark	Belgisi	$J, \hbar$	B	q	T	T_z	c	s	t	b
Ýokarky (iňlisçe – up, rusça – werhniý)	u	$1/2$	$+1/3$	$+2/3$	$1/2$	$+1/2$	0	0	0	0
Aşaky (down, nižniý)	d	$1/2$	$+1/3$	$-1/3$	$1/2$	$-1/2$	0	0	0	0
Jadylanan (charm, oçarowanyý)	c	$1/2$	$+1/3$	$+2/3$	0	0	+1	0	0	0
Geň (strange, strannyý)	s	$1/2$	$+1/3$	$-1/3$	0	0	0	–1	0	0
Hakyky (truth, istinnyý)	t	$1/2$	$+1/3$	$+2/3$	0	0	0	0	+1	0
Enaýy (beauty, prelestnyý)	b	$1/2$	$+1/3$	$-1/3$	0	0	0	0	0	+1

Spini $J = \frac{3}{2}$, “geňligi” $S = -3$ bolan Ω^- – giperonyň üç s – “geň” kwarkdan ybarat bolmalydygy aýdyň. Emma üç deň fermionlaryň (s – kwarklar) bir energetik derejede bolmagy Pauliniň gadaganlyk prinsipine ters gelýär. Şoňa görä-de, kwarklara üç dürli tapawut bermek üçin “reňklilik” diýilýän kwant sany girizilýär we olar R – gyzyl (iňlisçe – red), G – ýaşyl (green) hem-de B – mawy (blue) diýip atlandyrylýar. Elbetde, bu **“reňkleriň”** gözüň duýýan reňkleri bilen hiç hili dahylly ýeri ýokdur. Emma bu üç reňkiň deň derejede goşulmagy netijesinde ak reňk döreýändigine belli bir ähmiýet berilýär, ýagny üç dürli (R – gyzyl, G – ýaşyl, B – mawy) **“reňkdäki”** kwarklary birleşdirýän adron reňksiz (ak) hasap edilýär. Kwarklaryň alty dürli kysymlary (u, d, c, s, t, b) bolsa **hoşboýlyk** (ýakymly yslylyk, aromat) diýip atlandyrylýar. Şeýlelikde, kwarklar hoşboýlygy boýunça alty, reňkleri boýunça üç dürli bolýarlar. Antikwarklaryň $\tilde{R}$, $\tilde{G}$, $\tilde{B}$ -üç “antireňkleri” bar diýip hasaplanýar.

Adronyň “reňksiz” bolmagy Pauliniň gadaganlyk prinsipine doly laýyk gelýär. Uzak we dürli usullar arkaly geçirilen gözleg tejribelerinde kwarklara erkin halda gözegçilik almak, häzire çenli başa barmaýar, emma olaryň bolmalydygy barada, hatda bardygy barada-da oýlanmaga esas berýän maglumatlar ýeterlik köp.

Kwarklar “reňkli” zatlar hökmünde, erkin halda bolup bilmeýärler, diňe reňksiz (ak) adronlaryň içki düzüminde bolup bilýärler diýip hasap edilýär. Belkide olaryň baglanşyk energiýasy şeýle bir uly bolup, häzirki zaman tizlendirijileriniň energiýasy ýeterlik däldir. Teoriýada “reňkleriň” konfaýnmenti (“ýesirlenmegi”) kwarklaryň adaty däl häsiýeti bilen hem esaslandyrylýar. Ýagny kwarklaryň özara täsirleriniň olaryň aradaşlyklary ulaldygyça kiçelmän, gaýtam ulalýandygy ýüze çykaryldy. Bu hadysalar materiýanyň dürli görnüşleriniň çäksiz köpdügine ýene bir gaýta şaýatlyk edýär.

39.9. Fundamental täsirleşmeleri geçirgiçler

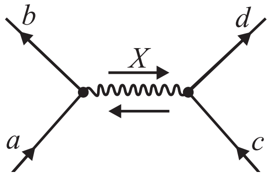
XX asyryň 70-nji ýyllarynda elementar bölejikleriň iki bölege – adronlara we fundamental bölejiklere bölünmegi, olaryň özara täsirleşmeleriniň (fundamental täsirleşmeleriň) ähli görnüşleriniň-de bir meňzeş amala aşyrylýanlygynyň tassyklanmagy fizika ylmynyň ajaýyp üstünlikleriniň biridir. Fundamental täsirleşmeleriň ählisi-de alyşykly häsiýetdedir, ýagny her bir täsirleşme wagtynda oňa gatnaşýan a bölejik käbir X bölejigi çykaryp goýberýär ýa-da siňdirýär. X bölejik fundamental täsirleşmäniň haýsy görnüşdedigini kesgitleýär we şoňa görä-de a bölejik başga bölejige öwrülip ýa-da öňküligine saklanyp biler (saklanma kanunlaryna laýyklykda):

$$a \leftrightarrow X + b; \qquad c + X \leftrightarrow d.$$

Bu hadysada X bölejik diňe täsiri geçiriji bolup, katalizator wezipesini ýerine ýetirenden soň ýitip gidýär. Şeýlelikde:

$$a + c \to b + d. \tag{39.20}$$

Eger $a = b$, $c = d$ bolsa hadysa maýyşgak seçelenme bolar, emma X bölejigi alyşmak netijesinde bolýar. Şeýle nukdaý nazardan a, b, c, d bölejikler täsirleşmä gatnaşýan, X bölejik bolsa täsiri geçirgiç bölejik diýip hasaplanýar. Bu hadysany grafiki görnüşde aňlatmagy ilkinji bolup amerikan fizigi R.Feýnman girizdi we oňa feýnman diagrammalary diýilýär (*39.1-nji çyzgy*).



39.1-nji çyzgy

Klassyky fizikanyň düşünjelerine esaslanylsa şeýle alşykly täsirleşme bolup bilmejek hadysa ýaly görünýär. Sebäbi erkin elektron, mysal üçin, hiç hili bölejigi goýberip-de, siňdirip-de bilmez. Bu ýerde, hamana, energiýanyň saklanma kanuny bozulýan ýaly bolýar. Emma, kwant fizikasynda energiýa – wagt kesgitsizlikleriniň gatnaşygyny

$$\Delta W \Delta t \sim \hbar$$

göz öňünde tutsak, $\Delta t \sim \dfrac{\hbar}{\Delta W}$ möhletde tamamlanýan hadysalarda, gysga wagtda energiýa ΔW ululykdan takyk kesgitlenip bilinmez, ýagny şol Δt möhletde energiýa ΔW ululyga üýtgäp biler. Diýmek, täsirleşme döredýän X bölejigiň energiýasy (massasy) näçe uly boldugyça, täsirleşme döwri gysga bolmaly.

Şol döwürde täsiri geçirgiç, döräp hem ýitip ýetişýän, aralyk X bölejiklere wirtual (bolaýmaly) bölejikler diýilýär we olaryň Δt möhletde c tizlik bilen geçip biljek uzaklygyna $R \sim c\Delta t$ täsirleşme radiusy diýilýär:

$$R \sim \frac{\hbar}{m_x c} \qquad \text{ýa-da} \qquad m_x \sim \frac{\hbar}{Rc}. \tag{39.22}$$

Eger atom ýadrosynyň çäklerindäki täsirleşmelerde $R \approx (1 \div 2) \cdot 10^{-15}\ m$ diýip hasap edilse, onda täsirleşmäni geçirgiç mezonlaryň (aralyk bölejikleriň) massasy $m \approx (200 \div 300) m_e$ barabar bolar. Şeýle usul bilen H. Ýukawa mezonlaryň bolmalydygyny öňünden aýtmagy başarypdyr. Fundamental täsirleşmelere mahsus radiuslar, olara gatnaşýan bölejikler, täsirleşmäniň möhleti we batlylygy (güýçliligi) 39.4-nji tablisada görkezilen.

39.4-nji tablisa

Täsirleşme	α_i	**R, m**	**τ, s**	**Saklanma kanunlar**	**Gatnaşýan bölejikler**	**Geçirgiçler**	**Üýtgeýär**	
							reňki	**hoşboýlygy**
S	~1	$\sim 10^{-15}$	$\sim 10^{-23}$	ählisi	$q(H)$	g_i ($i = 1, ..., 8$)	+	–
E	$\sim 10^{-2}$	∞	$\sim 10^{-20}$	T-den başgasy	$q(H)$ $1^{\pm}$, $W^{\pm}$	γ	–	–
W	$\sim 10^{-10}$	$\sim 10^{-18}$	$\sim 10^{-13}$	p, E, J q, B, L	$q(H)$ l	$W^{\pm}$, Z^0	–	+
G	$\sim 10^{-38}$	∞	?	?	ählisi	G	?	?

Tablisada: q – kwarklar, H – adronlar, T – izospin.

Elektromagnit täsirleşmesini geçirgiçler elektrik taýdan neýtral (q = 0) we massasyz (m = 0) fotonlardyr. Bu täsirleşmä ähli kwarklar (adronlar, leptonlar we $W\pm$ aralyk bozanlar) gatnaşýarlar. Ol zarply täsirleşmeden 100 esse gowşakdyr. Fotonlaryň reňki we hoşboýlygy ýokdur, şoňa görä-de, elektromagnit täsirleşmäniň netijesinde täsirleşýän fundamental bölejikleriň reňki, hoşboýlygy üýtgemeýär.

Kwant elektrodinamikanyň teoretiki salgylanmalary ölçeg netijeleri bilen ýokary takyklykda (10-njy sana çenli) tassyklanýar.

Zarply täsirleşmäniň geçirgiçleri hökmünde elektrik taýdan neýtral, massasyz sekiz dürli glýuonlar gi (iňlisçe glue – kleý, ýelim) hasap edilýär. Her bir glýuonyň belli bir "reňki", ýa-da antireňkli bolup, onuň hoşboýlygy ýokdur. Kwark glýuon goýberip ýa-da siňdirip, diňe reňkini üýtgedýär, emma hoşboýlygy üýtgemeýär. Zarply täsirleşmä reňksiz leptonlar gatnaşyp bilmeýärler, muňa gatnaşýan adronlaryň düzüminde reňkli glýuonlaryň barlygy sebäp bolýar. Emma adronlaryň arasynda nähili alyş-çalyş bolsa-da, olaryň özi reňksizligine galýarlar. Zarply täsirleşmäniň teoriýasy-kwant hromodinamikasy (grekçe hromos – reňk) doly işlenip tamamlanmasa-da, onuň netijeleri çuňňur manylylygy bilen ulanmaga oňaýlydyr.

Gowşak täsirleşmäni geçirgiçler elektrik zarýadly ($q = \pm 1, 0$), uly massaly W^+, W^-, Z^0 aralyk bozonlardyr:

$$m_W \approx 81\ GeW, \qquad m_Z \approx 93\ GeW.$$

Aralyk bozonlary kwarklar-da, leptonlar-da goýberip ýa-da siňdirilip bilýärler. Fotonlardan we grawitonlardan başga ähli fundamental bölejikler, şol sanda aralyk bozonlaryň özleri-de, gowşak täsirleşmä gatnaşýarlar. W^+, W^- aralyk bozonlar diňe zarply täsirleşmä gatnaşmaga ukyply däldirler. Gowşak täsirleşmede (aralyk bozonlaryň alyşygynda) oňa gatnaşýan bölejikleriň reňki üýtgemän, hoşboýlygy üýtgeýär. Gowşak täsirleşmäniň häsiýetleri teoriýa boýunça öňünden aýdylyp, soňra tejribede subut edildi. Gowşak täsirleşmede izospin, "geňlik" kysmy adron kwant sanlary saklanmaýar.

Grawitasion täsirleşmäni geçirgiçler zarýadsyz (q = 0), massasyz, J = 2 spinli G grawitonlardyr. Grawitonlary tejribede ýüze çykarmak häzire çenli başardanok we bu täsirleşmäniň teoriýasy ösüş ýolunda. Häzirlikçe çözülmegine garaşýan meseleler örän köp.

Fundamental täsirleşmeleriň hemmesiniň-de alyşykly häsiýetde bolýandygynyň aýdyňlaşmagy bilen olaryň birleşdirilmek mümkinçiligi barada ynam güýçlenýär. Häzirki wagtda elektromagnit we gowşak täsirleşmeler birleşdirilip, elektrogowşak täsirleşme teoriýasy işlenip düzüldi. Elektrogowşak we zarply täsirleşmeler bitewileşdirilip, "beýik birleşme" – elektroýadro täsirleşmesi barada alnyp barylýan synanşyklary örän üstünlikli hasap edip bolar. Hatda fundamental täsirleşmeleriň dördisini-de birleşdirýän teoriýanyň (giňeldilen supergrawitasiýa) döredilmegi ugrundaky derňewler başlandy.

Fundamental täsirleşmeleriň bitewileşdirilmegi ugrundaky teoretiki synanşyklar täze dünýägaraýyşlary talap edýär. Eger zarply täsirleşme fundamental bölejikleriň diňe “reňkini”, gowşak täsirleşme diňe “hoşboýlygyny” üýtgedip, elektromagnit täsirleşme bolsa olaryň reňkini-de, hoşboýlygyny-da üýtgedip bilmeýän bolsa, onda tebigatda olaryň hemmesini-de üýtgedip bilýän täsir bardyr. Bitewileşdirilen teoriýa laýyklykda şeýle täsir bolmaly, emma ony geçirgiçler äpet massaly ($m \sim 10^{15}$ GeW) bölejikler bolmaly. Bu bölejikler X we Y belgiler bilen aňladylýar, olaryň alyş-çalşygy netijesinde kwarklar hem-de leptonlar özara öwrülişik edip bilýärler. Şeýle täsirleşmede B barion we L lepton zarýadlaryň saklanma kanunlary ýoýulýar. Bu teoriýanyň çykarýan netijeleriniň biri protonyň durnuksyz bolmalydygydyr, ýagny onuň ortaça ömri, $P \rightarrow \pi^0 + e^+$ reaksiýa arkaly, $\tau_p^{teor} \approx 10^{30\pm3}$ *ýyla* barabardyr. Protonyň hakykatdan-da durnuksyzlygyny ýüze çykarmak teoriýanyň barlagy bolup hyzmat edip biler.

Häzirki döwürde protonyň ömrüniň aşak çägi kesgitlendi: $\tau_p^{tej} > 2 \cdot 10^{32}$ ýyl. Bu ugurda gözlegler güýçli depginde dowam edýär.

Seredip geçilen gyşgaça maglumatlar esasynda materiýanyň gurluş aslyýeti barada bitewi garaýyş kemala gelýär. Ähli material elementleriň düzüminde hoşboýlygy alty ysly we üç reňkdäki kwarklar hem-de alty ysly leptonlar bolup, olaryň arabaglanşygyny, täsirleşmesini kesgitleýän gluýuonlar, fotonlar, aralyk bozonlar we grawitonlar bardyr. Bularyň hemmesi materiýanyň fundamental bölejikleri hasap edilýär.

ESASY KANUNLAR WE FORMULALAR

Klassyky mehanikanyň fiziki esaslary

Orta tizlik

$$\langle \vec{\upsilon} \rangle = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}.$$

Pursatlaýyn tizlik

$$\vec{\upsilon} = \frac{d\vec{r}}{dt}.$$

Orta tizlenme

$$\langle \vec{a} \rangle = \frac{\Delta \vec{\upsilon}}{\Delta t}.$$

Pursatlaýyn tizlenme

$$\vec{a} = \frac{d\vec{\upsilon}}{dt}.$$

Tizlenmäniň tangensial düzüjisi

$$a_\tau = \frac{d\upsilon}{dt}.$$

Tizlenmäniň normal düzüjisi

$$a_n = \frac{\upsilon^2}{r}.$$

Doly tizlenme

$$\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n; \quad a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}.$$

Deňüýtgeýän öňe hereketiň kinematiki deňlemeleri

$$\begin{cases} \upsilon = \upsilon_0 \pm at, \\ S = \upsilon_0 t \pm \dfrac{at^2}{2}. \end{cases}$$

Burç tizligi

$$\vec{\omega} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt}.$$

Burç tizlenmesi

$$\vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}.$$

Deňüýtgeýän aýlaw hereketiň kinematiki deňlemeleri

$$\omega = \omega_0 \pm \varepsilon t,$$

$$\varphi = \omega_0 t \pm \frac{\varepsilon t^2}{2}.$$

Aýlow hereketde çyzyklaýyn we burçlaýyn ululyklaryň özara baglanyşygy

$$S = R\varphi; \quad \upsilon = R\omega;$$

$$a_\tau = R\varepsilon; \quad a_n = \omega^2 R.$$

Hereket mukdary (impuls)

$$\vec{P} = m\vec{\upsilon}.$$

Nýutonyň ikinji kanuny

$$\vec{F} = m\vec{a} = \frac{d\vec{P}}{dt}.$$

Typma sürtülme güýji

$$F_{sür} = fN.$$

Ýapyk sistema üçin hereket mukdarynyň saklanma kanuny

$$\vec{P} = \sum_{i=1}^{n} m_i \vec{\upsilon}_i = const.$$

S ýolda üýtgeýän güýjüň işi

$$A = \int_{(s)} FdS \cos\alpha.$$

Pursatlaýyn kuwwat

$$N = \frac{dA}{dt}.$$

Kinetik energiýa

$$E_k = \frac{m\upsilon^2}{2}.$$

Ýerden ýokary göterilen jisimiň potensial energiýasy

$$E_p = mgh.$$

Maýyşgak deformirlenen jisimiň potensial energiýasy

$$E_p = \frac{kx^2}{2}.$$

Ýapyk sistemanyň doly mehaniki energiýasy

$$E = E_k + E_p.$$

Ýapyk sistema üçin mehaniki energiýanyň saklanma kanuny

$$E_k + E_p = E = const.$$

Sistemanyň (jisimiň) inersiýa momenti

$$J = \sum_{i=1}^{n} m_i r_i^2.$$

Şteýneriň teoremasy

$$J = J_m + ma^2.$$

Aýlanýan jisimiň kinetik energiýasy

$$T_{aýl.} = \frac{J\omega^2}{2}.$$

Güýjüň momenti

$$\vec{M} = [\vec{r}\vec{F}].$$

Gaty jisimiň hereket mukdarynyň momenti

$$L = \sum_{i=1}^{n} m_i \upsilon_i r_i = J\omega.$$

Gaty jisimiň aýlanma hereketi üçin dinamikanyň deňlemesi

$$\vec{M} = J\vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{L}}{dt}.$$

Hereket mukdarynyň momentiniň saklanma kanuny

$$J\omega = const.$$

Bütindünýä dartyşma kanuny

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

Agyrlyk güýji

$$\vec{P} = m\vec{g}.$$

Dartyş meýdanynyň güýjenmesi

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m}.$$

Dartyş meýdanyň potensialy

$$\varphi = \frac{E_p}{m} = -G\frac{M}{R}.$$

Dartyş meýdanyň potensialy bilen, onuň güýjenmesiniň özara baglanyşygy

$$\vec{g} = -\,\mathrm{grad}\varphi.$$

Üznüksizligiň deňlemesi

$$S\upsilon = const.$$

Bernulliniň deňlemesi

$$\frac{p\upsilon^2}{2} + pgh + p = const.$$

Wagtyň relýatiwistik haýallamasy

$$\tau' = \frac{\tau}{\sqrt{1-(\upsilon/c)^2}}.$$

Sterženiň uzynlygynyň relýatiwistik gysgalmasy

$$l_0' = \frac{l}{\sqrt{1-(\upsilon/c)^2}}.$$

Tizlikleri goşmagyň relýatiwistik kanuny

$$u = \frac{u' + \upsilon}{1 + \frac{\upsilon u'}{c^2}}; \quad u' = \frac{u - \upsilon}{1 - \frac{\upsilon u}{c^2}}.$$

Relýatiwik massa

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-(\upsilon/c)^2}}.$$

Relýatiw dinamikanyň esasy kanuny

$$\vec{F} = \frac{d}{dt}\left(\frac{m_0}{\sqrt{1-\upsilon^2/c^2}}\vec{\upsilon}\right).$$

Relýatiw impuls

$$\vec{P} = m\vec{\upsilon} = \frac{m_0}{\sqrt{1-(\upsilon/c)^2}}\vec{\upsilon}.$$

Massa bilen energiýanyň özara baglanyşygy

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-(\upsilon/c)^2}}.$$

Relýatiwistik bölejikler üçin doly energiýa bilen impulsyň özara baglanyşygy

$$E = \sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2}.$$

Molekulýar fizikanyň we termodinamikanyň esaslary

Boýl-Mariottyň kanuny

$m, T = const$ bolanda $pV = const.$

Geý-Lýussagyň kanuny

$p, m = const$ bolanda $V = V_0(1 + \alpha t).$

$V, m = const$ bolanda $p = p_0(1 + \alpha t).$

Daltonyň kanuny

$$p = p_1 + p_2 + ... + p_n.$$

Islendik massaly gaz üçin Klapeýron-
-Mendeleýewiň deňlemesi

$$pV = \frac{m}{\mu}RT = \nu RT.$$

Molekulýar-kinetik teoriýanyň esasy deňlemesi

$$pV = \frac{1}{3}Nm_0\langle \upsilon_{kw}\rangle^2 = \frac{2}{3}E_k.$$

Molekulalaryň orta kwadrat tizligi

$$\langle \upsilon_{kw}\rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}.$$

Molekulalaryň orta arifmetik tizligi

$$\langle \upsilon\rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}.$$

Molekulalaryň iň ähtimal tizligi

$$\upsilon_{ä} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}}.$$

Barometrik formula

$$n = n_0 e^{-\frac{\mu gh}{(RT)}}.$$

Molekulanyň ylgaw ýolunyň orta uzynlygy

$$\langle l\rangle = \frac{\langle \upsilon\rangle}{\langle z\rangle} = \frac{1}{\sqrt{2}\,\pi d^2 n}.$$

Molekulalaryň 1 sekuntdaky çakyşmalarynyň sany

$$\langle z\rangle = \sqrt{2}\,\pi d^2 n\langle \upsilon\rangle.$$

Furýeniň ýylylykgeçirijilik kanuny

$$Q = -\lambda\frac{dT}{dx}St.$$

Diffuziýa hadysasy üçin Fikiň kanuny

$$m = -D\frac{d\rho}{dx}St.$$

Içki sürtülme (şepbeşiklik) üçin Nýutonyň kanuny

$$F = -\eta\frac{d\upsilon}{dx}S.$$

Molekulalaryň ortaça kinetik energiýasy

$$\langle \varepsilon\rangle = \frac{i}{2}kT.$$

Islendik massaly gaz üçin içki energiýa

$$U = \nu\frac{i}{2}RT = \frac{m}{\mu}\frac{i}{2}RT.$$

Termodinamikanyň birinji başlangyjy

$$dQ = dU + dA.$$

Hemişelik göwrümde gazyň molýar ýylylyk sygymy

$$C_V = \frac{i}{2}R.$$

Hemişelik basyşda gazyň molýar ýylylyk sygymy

$$C_p = \frac{i+2}{2}R.$$

Gazyň göwrümi giňelende edýän işi

$$dA = pdV.$$

Gaz izobar giňelende edýän işi

$$A = p(V_2 - V_1) = \frac{m}{\mu}R(T_2 - T_1).$$

Gaz izotermik giňelende edýän işi

$$A = Q = \frac{m}{\mu}RT\ln\frac{V_2}{V_1} = \frac{m}{\mu}RT\ln\frac{p_1}{p_2}.$$

Adiabatik prosesiň deňlemesi (Puassonyň deňlemesi)

$$pV^{\gamma} = const;\quad TV^{\gamma-1} = const;\quad Tp^{1-\gamma} = const.$$

Gaz adiabat giňelende edýän işi

$$A = \frac{m}{\mu}C_V(T_1 - T_2) = \frac{p_1V_1}{\gamma-1}\left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}\right].$$

Aýlaw proses üçin termiki peýdaly täsir koeffisiýenti

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}.$$

Karnonyň aýlawly prosesi üçin peýdaly täsir koeffisiýenti

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Bir mol hakyky gaz üçin Wan-der-Waalsyň deňlemesi

$$\left(p + \frac{a}{V_m^2}\right)(V_m - b) = RT.$$

Islendik mol real gaz üçin Wan-der-Waalsyň deňlemesi

$$\left(p + \frac{m^2}{\mu^2}\frac{a}{V^2}\right)\left(V - \frac{m}{\mu}b\right) = \frac{m}{\mu}RT.$$

Elektrik we elektromagnetizm

Kulonyň kanuny

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{\varepsilon r^2}.$$

Elektrik meýdanynyň güýjenmesi

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}.$$

Ýapyk üst üçin elektrik meýdanynyň güýjenme wektorynyň akymy

$$\vec{\Phi}_E = \oint_{(s)} \vec{E} d\vec{S} = \oint_{(s)} E_n dS.$$

Elektrik meýdanynyň superpozisiýa prinsipi

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^{n} \vec{E}_i.$$

Wakuumdaky elektrostatik meýdan üçin Gaussyň teoremasy

$$\oint_{(s)} \vec{E} d\vec{S} = \oint_{(s)} E_n dS = \frac{1}{\varepsilon_0}\sum_{i=1}^{n} q_i = \frac{1}{\varepsilon_0}\int_{(V)} \rho dV.$$

Ýapyk konturyň ugry boýunça elektrostatik meýdanyň güýjenme wektorynyň köwlenmesi

$$\oint_{(L)} \vec{E} d\vec{l} = \oint_{(L)} E_l dl = 0.$$

Elektrik meýdanynyň potensialy

$$\varphi = \frac{U}{q_0} = \frac{A_\infty}{q_0}.$$

Elektrik meýdanynyň potensialy bilen, onuň güýjenmesiniň özara baglanşygy

$$\vec{E} = -\,\mathrm{grad}\varphi; \quad \vec{E} = -\nabla\varphi.$$

Polýarlanma

$$\vec{P} = \frac{\sum_i \vec{P}_i}{V}.$$

$\vec{P}$ we $\vec{E}$ wektorlaryň özara baglanyşygy

$$\vec{P} = \chi\varepsilon_0\vec{E}.$$

Elektrik süýşme wektory bilen elektrostatik meýdanyň güýjenmesiniň arasyndaky baglanyşyk

$$\vec{D} = \varepsilon_0\varepsilon\vec{E}.$$

Dielektrikdäki elektrik meýdany üçin Gaussyň teoremasy

$$\vec{\Phi}_D = \oint_{(s)} \vec{D} d\vec{S} = \oint_{(s)} D_n dS = \sum_{i=1}^{n} q_i.$$

Ýalňyz geçirijiniň elektrik sygymy

$$C = \frac{q}{\varphi}.$$

Zarýadlanan ýalňyz geçirijiniň energiýasy

$$W = \frac{C\varphi^2}{2} = \frac{q\varphi}{2} = \frac{q^2}{2C}.$$

Elektrostatik meýdanynyň energiýasynyň göwrümleýin dykyzlygy

$$w = \frac{W}{V} = \frac{\varepsilon_0\varepsilon E^2}{2} = \frac{ED}{2}.$$

Toguň güýji

$$I = \frac{dq}{dt}.$$

Toguň dykyzlygy

$$j = \frac{I}{S}.$$

Zynjyra täsir edýän elektrik hereketlendiriji (EHG) güýç

$$\mathscr{E} = \frac{A}{Q}; \quad \mathscr{E} = \oint_{(l)} E_l dl.$$

Zynjyryň birhilli bölegi üçin Omuň kanuny

$$I = \frac{U}{R}.$$

Differensial görnüşdäki Omuň kanuny

$$\vec{j} = \gamma\vec{E}.$$

Toguň kuwwaty $$P = \frac{dA}{dt} = IU = I^2R = \frac{U^2}{R}.$$ Joul-Lensiň kanuny $$dQ = IUdt = I^2Rdt = \frac{U^2}{R}dt.$$ Joul-Lensiň differensial görnüşdäki kanuny $$w = jE = \gamma E^2.$$ Birhilli däl zynjyr bölegi üçin Omuň kanuny (Omuň umumylaşdyrylan kanuny) $$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \mathscr{E}_{12}}{R}.$$ Kirhgofyň düzgüni $$\sum_k I_k = 0; \quad \sum_i I_i R_i = \sum_k \mathscr{E}_k.$$ Elektronyň ikinji emmisiýasynyň koeffisiýenti $$\delta = \frac{n_2}{n_1}.$$ Tokly ramkanyň magnit momenti $$\vec{P}_m = IS\vec{n}.$$ Magnit meýdanyndaky tokly ramka täsir edýän aýlandyryjy güýjüň momenti $$\vec{M} = \left[\vec{P}_m \vec{B}\right].$$ Magnit induksiýasy bilen magnit meýdanynyň güýjenmesiniň baglanyşygy $$\vec{B} = \mu_0\mu\vec{H}.$$ Tokly geçirijiniň bölegi üçin Bio-Sawar-Laplasyň kanuny $$d\vec{B} = \frac{\mu_0\mu}{4\pi}\frac{I[d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3}.$$ Göni tokly geçirijiniň magnit induksiýasy $$B = \frac{\mu_0\mu}{4\pi}\frac{2I}{R}.$$	Halka görnüşli tokly geçirijiniň merkezindäki magnit meýdanynyň induksiýasy $$B = \mu_0\mu\frac{I}{2R}.$$ Amperiň kanuny $$d\vec{F} = I[d\vec{l}, \vec{B}].$$ Erkin hereket edýän zarýadyň magnit meýdanynyň induksiýasy $$\vec{B} = \frac{\mu_0\mu}{4\pi}\frac{q[\vec{\upsilon}\vec{r}]}{r^3}.$$ Lorensiň güýji $$\vec{F} = q[\vec{\upsilon}\vec{B}].$$ Wakuumdaky magnit meýdany üçin doly toguň kanuny $$\oint_{(L)} \vec{B}d\vec{l} = \oint_{(L)} B_l dl = \mu_0 \sum_{k=1} I_k.$$ n sarymly solenoidiň içinde magnit induksiýasy (wakuumda) $$B = \mu_0\frac{nI}{l}.$$ Islendik üst üçin magnit meýdanynyň akymy $$\vec{\Phi}_B = \int_{(s)} \vec{B}d\vec{S} = \int_{(s)} B_n dS.$$ $\vec{B}$ induksiýaly magnit meýdany üçin Gaussyň teoremasy $$\oint_{(s)} \vec{B}d\vec{S} = \oint_{(s)} B_n dS = 0.$$ Magnit meýdanyndaky tokly geçirijini süýşürmek üçin edilýän iş $$dA = Id\Phi.$$

Magnit meýdanynda tokly ýapyk kontury süýşürmek üçin edilýän iş

$$dA = Id\Phi'.$$

Faradeýiň induksiýa kanuny

$$\mathscr{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Öz-özünde induksiýanyň EHG-si

$$\mathscr{E}_{öz} = -L\frac{dI}{dt}.$$

n sarymly tükeniksiz uzyn solenoidiň induktiwligi

$$L = \mu_0\mu\frac{n^2 S}{l}.$$

Kontur bilen baglanyşykly magnit meýdanynyň energiýasy

$$W = \frac{LI^2}{2}.$$

Magnit meýdanynyň energiýasynyň göwrümleýin dykyzlygy

$$w = \frac{W}{V} = \frac{\mu_0\mu H^2}{2} = \frac{BH}{2}.$$

Magnitlenme

$$\vec{J} = \frac{\sum \vec{P_a}}{V}.$$

Magnit meýdanynyň $\vec{H}$ güýjenmesi bilen $\vec{J}$ magnitlenmäniň baglanyşygy

$$\vec{J} = \chi\vec{H}.$$

Maddadaky magnit meýdany üçin doly toguň kanuny ($\vec{B}$ wektoryň köwlenmesi üçin teorema)

$$\oint\limits_{(L)} \vec{B}d\vec{l} = \oint\limits_{(L)} B_l dl = \mu_0(I + I').$$

$\vec{H}$ wektoryň köwlenmesi üçin teorema

$$\oint\limits_{(L)} \vec{H}d\vec{l} = I.$$

Süýşme toguň dykyzlygy

$$j_{süý} = \frac{\partial\vec{D}}{\partial t} = \varepsilon_0\frac{\partial\vec{E}}{\partial t} + \frac{\partial\vec{P}}{\partial t}.$$

Makswelliň integral görnüşindäki deňlemeleri

$$\begin{cases} \oint\limits_{(L)} \vec{E}d\vec{l} = -\int\limits_{(s)} \frac{\partial\vec{B}}{\partial t}d\vec{S}; & \oint\limits_{(s)} \vec{D}d\vec{S} = \int\limits_{(V)} \rho dV; \\ \oint\limits_{(L)} \vec{H}d\vec{l} = \int\limits_{(s)} \left(\vec{j} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t}\right); & \oint\limits_{(s)} \vec{B}d\vec{S} = 0. \end{cases}$$

Makswelliň differensial görnüşindäki deňlemeleri

$$\begin{cases} \mathrm{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}; & \mathrm{div}\vec{D} = \rho; \\ \mathrm{rot}\vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t}; & \mathrm{div}\vec{B} = 0. \end{cases}$$

Yrgyldylar we tolkunlar

Garmoniki yrgyldynyň deňlemesi

$$S = A\cos(\omega_0 t + \varphi); \quad \omega_0 = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu.$$

S ululyk üçin, erkin garmoniki yrgyldynyň differensial deňlemesi:

$$\frac{d^2 S}{dt^2} + \omega_0^2 S = 0.$$

Fiziki maýatnigiň yrgyldylarynyň periody

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{mgl}} = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}.$$

Matematiki maýatnigiň yrgyldylarynyň periody

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Yrgyldyly kontur üçinTomsonyň formulasy

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

S ululyk üçin togtaýan yrgyldynyň differensial deňlemesi $$\frac{d^2S}{dt^2}+2\delta\frac{dS}{dt}+\omega_0^2S=0.$$ Pessaýlamanyň logarifmiki dekrementi $$\theta=\ln\frac{A(t)}{A(t+T)}=\delta T.$$ S ululyk üçin mejbury yrgyldynyň differensial deňlemesi $$\frac{d^2S}{dt^2}+2\delta\frac{dS}{dt}+\omega_0^2S=x_0\cos\omega t.$$ Tekiz tolkunyň deňlemesi $$\xi(x,t)=A\cos(\omega t-kx+\varphi_0).$$ Sferiki tolkunyň deňlemesi $$\xi(r,t)=\frac{A_0}{r}\cos(\omega t-kr+\varphi_0).$$ Faza tizligi $$\upsilon=\frac{\omega}{k}.$$ Tolkun deňlemesi $$\Delta\xi=\frac{1}{\upsilon^2}\frac{\partial^2\xi}{\partial t^2}.$$ Toparlaýyn tizlik $$u=\frac{d\omega}{dk}.$$ Durujy tolkunyň deňlemesi $$\xi=2A\cos\frac{2\pi x}{\lambda}\cos\omega t.$$ Sreda-da ýaýraýan elektromagnit tolkunlarynyň tizligi $$\upsilon=\frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}.$$	**Optika. Şöhlelenmäniň kwant tebigaty** Interferensiýa maksimumynyň şerti $$\Delta=\pm m\lambda_0,\quad (m=0,1,2...).$$ Interferensiýa minimumynyň şerti $$\Delta=\pm(2m+1)\frac{\lambda_0}{2},\quad (m=0,1,2...).$$ Bir yşda difraksiýa maksimumynyň şerti $$a\sin\varphi=\pm(2m+1)\frac{\lambda}{2};\quad (m=1,2,3...).$$ Bir yşda difraksiýa minimumynyň şerti $$a\sin\varphi=\pm 2m\frac{\lambda}{2},\quad (m=1,2,3...).$$ Difraksion gözenegiň esasy maksimumynyň şerti $$d\sin\varphi=\pm m\lambda,\quad (m=0,1,2...).$$ Difraksion gözenegiň goşmaça minimumynyň şerti $$d\sin\varphi=\pm\frac{m'\lambda}{N},$$ $$(m'=1,2,...N-1,N+1,...).$$ Wulf-Breggiň formulasy $$2d\sin\theta=m\lambda,\quad (m=1,2,3...).$$ Polýarlanmanyň derejesi $$P=\frac{I_{\max}-I_{\min}}{I_{\max}+I_{\min}}.$$ Malýusyň kanuny $$I=I_0\cos^2\alpha.$$ Brýusteriň kanuny $$\mathrm{tg}\,i_B=n_{21}.$$ Ýylylyk şöhlelenmesi üçin Kirhgofyň kanuny $$r_{v,T}=\frac{R_{v,T}}{A_{v,T}}.$$

Absolýut gara jisimiň energetiki şöhlelenmesi

$$R_e = \int_t^\infty r_{\nu,T} d\nu.$$

Stefan-Bolsmanyň kanuny

$$R_e = \sigma T^4.$$

Winiň süýşme kanuny

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}.$$

Releý-Jinsiň formulasy

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT.$$

Plankyň formulasy

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{(kT)}} - 1}.$$

Daşky fotoeffekt üçin Eýnşteýniň deňlemesi

$$h\nu = A + \frac{m\upsilon_{\max}^2}{2};$$

Üste normal düşýän ýagtylygyň basyşy

$$p = \frac{E_e}{c}(1+\rho) = w(1+\rho).$$

Molekulanyň, gaty jisimiň we atomyň, kwant fizikasynyň elementleri

Balmeriň jemlenen formulasy

$$\nu = R\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right).$$

Boruň birinji postulaty

$$m\upsilon r_n = n\hbar, \quad (n = 1, 2, 3...).$$

Boruň ikinji postulaty (ýygylyk düzgüni)

$$h\nu = E_n - E_m.$$

De Broýlyň tolkun uzynlygy

$$\lambda = \frac{h}{P} = \frac{h}{m\upsilon}.$$

dV göwrümiň elementinde bölejikleriň bolmagynyň ähtimallygy

$$dW = |\psi|^2\, dV.$$

Ähtimallygyň normalaşdyryş şerti

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi|^2 dV = 1.$$

Şredingeriň umumy deňlemesi

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\Delta\psi + U(x,y,z,t)\psi = i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t}.$$

Statsionar hal üçin Şredingeriň deňlemesi

$$\Delta\psi + \frac{2m}{\hbar^2}(E-U)\psi = 0.$$

Boze-Eýnşteýniň paýlanyşygy

$$\langle N_i \rangle = \frac{1}{e^{\frac{E_i - \mu}{kT}} - 1}.$$

Fermi-Dirakyň paýlanyşygy

$$\langle N_i \rangle = \frac{1}{e^{\frac{E_i - \mu}{kT}} + 1}.$$

UNIWERSAL FIZIKI HEMIŞELIKLER

№	Ululyk	Bellenişi	Bahasy	Otnositel ýalňyşlygy, 10^{-6}
1	2	3	4	5
1.	Massanyň atom birligi	$1m.a.b = 10^{-3}\dfrac{kg \cdot mol^{-1}}{N_A}$	$1{,}6605655(86)\cdot 10^{-27}\,kg$	5,1
2.	Elementar zarýad	e	$1{,}6021892(46)\cdot 10^{-19}\,Kl$	2,9
3.	Elektronyň udel zarýady	$-\dfrac{e}{m_e}$	$-1{,}7588047(49)\cdot 10^{11}\,\dfrac{Kl}{kg}$	2,8
4.	Neýtronyň kompton tolkun uzynlygy	$\lambda_{K,\,n} = h/(m_n c)$ $\lambda_{K,\,n}/(2\pi)$	$1{,}3195909(22)\cdot 10^{-15}\,m$ $2{,}1001941(35)\cdot 10^{-16}\,m$	1,7 1,7
5.	Protonyň kompton tolkun uzynlygy	$\lambda_{K,\,p} = h/(m_p c)$ $\lambda_{K,\,p}/(2\pi)$	$1{,}3214099(22)\cdot 10^{-15}\,m$ $2{,}1030892\ (36)\cdot 10^{-16}\,m$	1,7 1,7
6.	Elektronyň kompton tolkun uzynlygy	$\lambda_{K,\,e} = h/(m_e c)$ $\lambda_{K,\,e}/(2\pi)$	$2{,}4263089(40)\cdot 10^{-12}\,m$ $3{,}8615905(64)\cdot 10^{-13}\,m$	1,6 1,6
7.	Boruň magnetony	$\mu_B = e\hbar/(2m_e)$	$9{,}274078(36)\cdot 10^{-24}\,\dfrac{J}{Tl}$	3,9
8.	Ýadro magnetony	$\mu_{ýad} = 2\hbar/(2m_p)$	$5{,}050824(20)\cdot 10^{-27}\,\dfrac{J}{Tl}$	3,9
9.	Protonyň magnit momenti	μ_p μ_p/μ_B $\mu_p/\mu_{ýad.}$	$1{,}4106171(55)\cdot 10^{-26}\,\dfrac{J}{Tl}$ $1{,}521032209(16)\cdot 10^{-3}$ $2{,}7928456(11)$	3,9 0,011 0,38
10.	Elektronyň magnit momenti	μ_e μ_e/μ_p	$9{,}284832(36)\cdot 10^{-24}\,\dfrac{J}{Tl}$ $658{,}2106880(66)$	3,9 0,010
11.	Neýtronyň dynçlykdaky massasy	m_n	$1{,}6749543(86)\cdot 10^{-27}\,kg$ $1{,}008665012(37)\,m.a.b$	5,1 0,037
12.	Protonyň dynçlykdaky massasy	m_p	$1{,}6726485(86)\cdot 10^{-27}\,kg$ $1{,}007276470(11)\,m.a.b$	5,1 0,011

tablisanyň dowamy

1	2	3	4	5
13.	Elektronyň dynçlykdaky massasy	m_e	$0{,}9109534(47)\cdot 10^{-30}\ kg$ $5{,}4858026(21)\cdot 10^{-4}\ m.a.b$	5,1 0,38
14.	Normal şertde ideal gazyň molekulýar göwrümi (T_0 = 273,15K) (p_0 = 101325Pa)	$V_m = \frac{RT_0}{p_0}$	$0,02241383(70)\frac{m^3}{mol}$	31
15.	Awogadronyň sany	N_A	$6,0220943(61)\cdot 10^{23}\ \frac{1}{mol}$	5,1
16.	Bolsmanyň hemişeligi	$k = \frac{R}{N_A}$	$1,380662(44)\cdot 10^{-23}\ \frac{J}{K}$	32
17.	Uniwersal gaz hemişeligi	R	$8,31441(26)\frac{J}{mol\cdot K}$	31
18.	Grawitasiýa hemişeligi	G, γ	$6,67220(41)\cdot 10^{-11}\ \frac{N\cdot m^2}{kg^2}$	615
19.	Magnit hemişelik	μ_0	$12,5663706144\cdot 10^{-7}\ \frac{Gn}{m}$	—
20.	Plankyň hemişeligi	h $\hbar = h/2\pi$	$6,626176(36)\cdot 10^{-34}\ \frac{J}{Gs}$ $1,0545878(57)\cdot 10^{-34}\ \frac{J}{Gs}$	5,4 5,4
21.	Ridbergiň hemişeligi	$R_\infty = \frac{\mu_0^2 m_e c^3 e^4}{8h^3}$	$1,097373177(83)\cdot 10^{7}\ \frac{1}{m}$	0,08
22.	Stefan-Bolsmanyň hemişeligi	$\sigma = \frac{\pi^2 k^4}{60\hbar^3 c^2}$	$5,67032(71)\cdot 10^{-8}\ \frac{Wt}{m^2\cdot K^4}$	125
23.	Faradeýiň (sany) hemişeligi	$F = N_A e$	$9,648456(27)\cdot 10^{4}\ \frac{Kl}{mol}$	2,8
24.	Elektrik hemişeligi	$\varepsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2}$	$8,85418782(7)\cdot 10^{-12}\ \frac{F}{m}$	0,008
25.	Boruň radiusy	$a_0 = \frac{a}{4\pi R_\infty} = \frac{\hbar^2\cdot 4\pi\varepsilon_0}{me^2}$	$0{,}52917706(44)\cdot 10^{-10}\ m$	0,82

tablisanyň dowamy

1	2	3	4	5
26.	Ýagtylygyň wakuumdaky tizligi	c	$299792458\,\frac{m}{s}$	—
27.	Erkin gaçmanyň tizlenmesi	g	$9,80665\,\frac{m}{s^2}$	—
28.	Neýtronyň dynçlykdaky energiýasy	$m_n c^2$	939,5731(27) *MeW*	2,8
29.	Protonyň dynçlykdaky energiýasy	$m_p c^2$	938,2796(27) *MeW*	2,8
30.	Elektronyň dynçlykdaky energiýasy	$m_e c^2$	0,5110034(14) *MeW*	2,8

* Ýaýyň içindäki sanlar berlen ululygyň soňky sanlary boýunça standart ýalňyşlyk.

PREDMET GÖRKEZIJI

PEÝDALANYLAN EDEBIÝATLAR

1. Türkmenistanyň Prezidenti Gurbanguly Mälikgulyýewiç Berdimuhamedow. Gysga terjimehal, Aşgabat, TDNG. –A. 2007 ý.
2. *Gurbanguly Berdimuhamedow.* Garaşsyzlyga guwanmak, Watany, halky söýmek bagtdyr. –A. TDNG. 2007.
3. *Gurbanguly Berdimuhamedow.* Türkmenistanda saglygy goraýşy ösdürmegiň ylmy esaslary. –A. TDNG. 2007.
4. *Gurbanguly Berdimuhamedow.* Türkmenistan sagdynlygyň we ruhubelentligiň ýurdy. –A. TDNG. 2009.
5. *Gurbanguly Berdimuhamedow.* Ahalteke bedewi – biziň buýsanjymyz we şöhratymyz. –A. TDNG. 2008.
6. *Gurbanguly Berdimuhamedow.* Türkmenistanyň dermanlyk ösümlikleri. –A. TDNG. 2010.
7. *Gurbanguly Berdimuhamedow.* Türkmenistanyň ykdysady strategiýasy: halka daýanyp, halkyň hatyrasyna. “Türkmenistan” gazeti – 2010-njy ýylyň 14-nji maýy.
8. *Gurbanguly Berdimuhamedow.* Ösüşiň täze belentliklerine tarap. Saýlanan eserler. IV tom. –A. TDNG. 2010.
9. *И. В. Савельев.* Курс общей физики. Кн. I. Механика. М, 1998.
   Кн. II. Молекулярная физика и термодинамика. М, 998.
   Кн. III. Электричество и магнетизм. М, 1998.
   Кн. IV. Оптика. М,1998.
   Кн. V. Атомная физика. М.: ФТТ,1998.
10. *А. А. Детлаф, Б. М. Яворский.* Курс физики. М, 1989.
11. *Т. И. Трофимова.* Курс физики. М, 2004.
12. *А. Д. Ивлиев*. Физика. Санкт-Петербург–Москва–Красногор. 2009.
13. *G. Kelow, Ý. Kadyrow, A. Hojamgulyýew.* Umumy fizika kursy boýunça leksiýalar konspekti (Mehanika we molekulýar fizika). Aşgabat, 1991.
14. *A. Çaryýew.* Fizikanyň esasy kanunlary. Aşgabat, 2004.
15. *Ö. Allakow, Ç. Gurbangeldiýew.* Mehanika. Aşgabat, 2006.
16. *A. Nurgeldiýew, Ö. Bekmyradow, B. Akmyradow.* Molekulýar fizika we termodinamika Aşgabat, 2006.
17. *A. Gurbanmuhammedow.* Elektrik we magnit hadysalary. Aşgabat, 2006.
18. *A. Ataýew.* Atom we ýadro fizikasy. Aşgabat, 2006.

MAZMUNY

VI bap. Mehaniki yrgyldylar we tolkunlar

VII bap. Tutuş sredanyň mehanikasynyň elementleri

II BÖLÜM. MOLEKULÝAR FIZIKA WE TERMODINAMIKA

VIII bap. Molekulýar-kinetiki teoriýa

IX bap. Statistiki paýlanyşlar

X bap. Termodinamikanyň birinji başlangyjy

XI bap. Termodinamiki prosesler. Termodinamikanyň ikinji başlangyjy. Entropiýa

XII bap. Geçiriliş hadysalary

XIII bap. Hakyky gazlar, suwuklyklar we gaty jisimler

III BÖLÜM. ELEKTRIK WE MAGNIT HADYSALARY

XIV bap. Elektrik zarýady we elektrik meýdany

XV bap. Elektrostatik meýdanyň hasaby

XVI bap. Dielektrikler we geçirijiler elektrik meýdanynda

XVII bap. Elektrik sygymy. Zarýadlaryň potensial energiýasy

XVIII bap. Hemişelik elektrik togy

XIX bap. Metallarda, wakuumda we elektrolitlerde elektrik togy

XX bap. Gazlarda elektrik togy

XXI bap. Magnit meýdany

XXII bap. Elektromagnit induksiýasy

XXIII bap. Maddalaryň magnit häsiýetleri

XXXIV bap. Kwant mehanikasy barada düşünje

XXXV bap. Atomlaryň we molekulalaryň häzirki zaman fizikasyndan düşünjeler

VII BÖLÜM. KWANT STATISTIKASYNYŇ WE GATY JISIMIŇ FIZIKASYNYŇ ELEMENTLERI

XXXVI bap. Kwant statistikasy barada düşünjeler

XXXVII bap. Gaty jisimleriň zolaklar teoriýasy

VIII BÖLÜM. ATOM ÝADROSYNYŇ FIZIKASYNYŇ ESASY DÜŞÜNJELERI

XXXVIII bap. Ýadro fizikasynyň elementleri

XXXIX bap. Elementar bölejikler

Ýazmuhammet Kadyrow, Atageldi Hojamgulyýew,
Gurbangylyç Kelow

UMUMY FIZIKA

Ýokary okuw mekdepleri üçin synag okuw kitaby

Redaktor	*E. Berdiýewa*
Surat redaktory	*G. Orazmyradow*
Teh. redaktory	*O. Nurýagdyýewa*
Ýörite redaktor	*A. Çaryýew*

Ýygnamaga berildi 26.05.2010. Çap etmäge rugsat edildi 24.11.2011.
Möçberi 70x100$^{1}/_{16}$. Ofset kagyzy. Edebi garniturasy.
Ofset çap ediliş usuly. Şertli çap listi 33,54. Şertli-reňkli ottiski 101,87.
Hasap-neşir listi 29,91. Çap listi 26,0.
Sargyt 1246. Sany 1500.

Türkmen döwlet neşirýat gullugy.
744004. Aşgabat, 1995-nji köçe, 20.

Türkmen döwlet neşirýat gullugynyň Metbugat merkezi.
744004. Aşgabat, 1995-nji köçe, 20.