

**O'zbekstan Respublikasi Joqari ha'm orta arnawli  
bilim ministrliqi**

**Berdaq atindag'i Qaraqalpaq ma'mleketlik  
universiteti**

**Ulwma fizika kafedrası**

**B. Abdikamalov**

# **MOLEKULALIQ FIZIKA**

**pa'ni boyinsha lektsiyalar tekstleri**

**Fizika qa'nigeliginin' 1-kurs studentleri  
ushin du'zilgen**

Internettegi adresi [www.abdikamalov.narod.ru](http://www.abdikamalov.narod.ru)

**No'kis 2008**

## Mazmuni

Kirisiw	2
1-§. Ko'p bo'lekshelerden turatug'ın sistemalar dı u'yreniw usılları	7
2-§. Matematikalıq tu'sinikler	13
3-§. Sistemalardıń makroskopiyalıq ha'm mikroskopiyalıq halları.	25
4-§. Birdey itimallıqlar postuladı ha'm ergodik gipoteza.	27
5-§. Makrohallar itimallıg'ı.	32
6-§. Fluktuatsiyalar.	40
7-§. Maksvell bo'listiriliwi.	45
8-§. Basım	58
9-§. Temperatura	62
10-§. Boltsman bo'listiriliwi.	66
11-§. Energiyanıń erkinlik da'rejesi boyınsha bo'listiriliwi.	75
12-§. Broun qozg'alısınń ma'nisi.	76
13-§. Maksvell-Boltsman bo'listiriliwi.	82
14-§. Termodinamikanıń birinshi baslaması.	84
15-§. Differentsial formalar ha'm tolıq differentsiallar.	89
16-§. Qaytımlı ha'm qaytımsız protsessler.	91
17-§. Jıllılıq sıyımlıg'ı.	94
18-§. İdeal gazlerdegi protsessler.	101
19-§. İdeal gaz entropiyası.	109
20-§. Tsikllıq protsessler.	115
21-§. Temperaturalardıń absolyut termodinamikalıq shkalası.	120
22-§. Termodinamikanıń ekinshi baslaması.	123
23-§. Termodinamikanıń ekinshi baslamasına berilgen anıqlamalar.	129
24-§. Termodinamikalıq potentsiallar ha'm termodinamikalıq ornıqlılıq sha'rtleri.	131
25-§. Molekulalardag'ı baylanıs ku'shleri.	139
26-§. Fazalar ha'm fazalıq o'tiwler.	145
27-§. Gaz halınan suyıq halg'a o'tiw.	149
28-§. Klapeyron-Klauzius ten'lemesi.	150
29-§. Van-der-Vaals ten'lemesi.	153
30-§. Djoul-Tomson effekti.	158
31-§. Bet kerimi.	163
32-§. Suıqlılıqlardıń puwlanıwı ha'm qaynawı.	167
33-§. Osmoslıq basım.	169
34-§. Qattı denelerdin' simmetriyası.	172
35-§. Qattı denelerdin' jıllılıq sıyımlıg'ı.	179
36-§. Qattı denelerdin' jıllılıq ken'eyiwi.	188
37-§. Ko'shiw protsessleri.	191
Qosımshalar.	197
Oqıw programması, metodikalıq ko'rsetpeler, a'debiyatlar dizimi.	234

## KIRISIW

Usı semestrde o'tiletug'ın termodinamika da menen molekualıq fizika da denelerdegi og'ada ko'p sanlı atomlar menen molekularlar menen baylanıslı bolg'an makroskopiyaıq protsessler dep atalutug'ın tek bir qubılıslar toparın u'yretedi. Fizikanın' bul bo'limleri bir birinen tek u'yrenilip atırg'an qubılıslarg'a ha'r qıylı qatnası menen g'ana ayrıladı.

Termodinamika (termodinamikanı a'dette jıllılıqtın' ulıwmalıq teoriyası dep te ataymız) aksiomatikalıq ilim bolıp tabıladı. Bul ilim zatlardıń qurılısı ha'm jıllılıqtın' fizikalıq ta'biyatı haqqında hesh qanday arnawlı gipotezanı basshılıqqa almaydı. Onın' juwmaqları ta'jiriybede alıng'an faktlerdi ulıwmalastırıwı bolıp tabılutug'ın ulıwmalıq printsiplerge ha'm baslamalarg'a su'yenedi. Termodinamika jıllılıqtı ishki qozg'alıstın' qanday da bir tu'ri dep qaraydı, biraq bul qozg'alıstın' tu'rin ayqınlastırıwı a tırıspaydı.

Molekualıq fizika bolsa kerisinshe zatlardıń atomlıq-molekualıq ko'z-qarasın basshılıqqa aladı ha'm jıllılıqtı atomlar menen molekularlardın' ta'rtipsiz qozg'alısı dep qaraydı. Molekualıq fizika a'dette tek makroskopiyaıq qubılıslardı u'yreniw menen sheklenbeydi. Ol ayırım molekularlar menen atomlardın' qa'siyetlerin de qaraydı. Biraq bul ma'selelerdi biz bul jerde ta'riplep otırmaymız. Olar fizikanın' basqa bo'liminde, atap aytqanda atom fizikasında u'yreniledi. Molekualıq fizikanı zatlardıń qurılısının' molukualıq-kinetikalıq teoriyası dep te ataydı.

XIX a'sirde atomlar menen molekularlardın' bar ekenligi haqqındag'ı boljawlar anıq da'lilengen joq. Sonlıqtan sol waqıtları ko'pshilik arasında gu'ma'n tuwdırg'an molekualıq-kinetikalıq teoriyanın' gipotezalıq usılları fizikler arasında tolıq qollap-quwatlanbadı. Bunday jag'dayda termodinamika menen molekualıq fizika arasındag'ı anıq ayırmalardı atap ko'rsetiw mu'mkin edi (mısalı xaqıyqatılıqqa anıq sa'ykes keliwshi faktlerdi gipotezalardan ayırıp ko'rsetiw kerek boldı). Biraq jigirmalanshı a'sir atomlar menen molekularlardın' xaqıyqıy ekenligin tolıq da'lilledi. Na'tiyjede molekualıq-kinetikalıq teoriya o'zinin' gipotezalıq xarakterde ekenliginen tolıq qutıldı. Biraq qalay degen menen molekualıq-kinetikalıq teoriyada gipotezalıq element (boljawlar tiykarında jumıs islew) usı waqıtlarg'a shekem qollanılıp kiyatır. Sebebi biz ha'zirge shekem ideallastırılǵ'an molekualıq modellerden paydalanıp kiyatırmız. Al bul modeller bolsa haqıyqıy denelerdin' qa'siyetlerinin' barlıg'ın emes, al ayırımların g'ana beredi (mısalı materiallıq noqat modeli). Bunday modellerdi paydalanıw za'ru'rliǵı denelerdin' molekualıq qurılısı haqqındag'ı bizin' bilimlerden' jetkiliksizliginen yamasa ko'pshilik ma'selelerdi sheshkenimizde qubılıslardı a'piwayılastırıwdın' kerek bolatug'ınlıg'ınan kelip shıg'adı. Sonlıqtan bu'gingi ku'nleri termodinamika menen molekualıq fizikanı keskin tu'rde bir birinen ayırıw za'ru'rliǵı jog'aladı.

Termodinamika fizikanın' en' a'hmiyetli bo'limlerinin' biri bolıp tabıladı. Ol tiykarında turg'an onın' aksiomaları qanday da'rejede haqıyqatılıqqa sa'ykes keletug'ın bolsa onın' juwmaqları da tap sonday da'rejede xaqıyqatılıqqa sa'ykes keledi. Bul juwmaqlar makroskopiyaıq fizikanın' barlıq bo'limlerinde ppydalanıladı (gidrodinamikada, serpimlilik teoriyasında, aerodinamikada, elektr ha'm magnit qubılısları ta'limatında, optikada ha'm basqa da bo'limlerde). Shegaralıq pa'nler bolg'an fizikalıq ximiya ha'm ximiyaıq fizika ko'pshilik jag'daylarda termodinamikanı ximiyaıq qubılıslarg'a paydalanıw menen shug'ıllanadı.

Termodinamika XIX a'sirdin' birinshi yarımında sol waqıtları rawajlana baslag'an jıllılıq texnikasının' teoriyaıq tiykarı sıpatında rawajlana basladı. Onın' aldında turg'an en' da'slepki ma'sele jıllılıq dvigatellerindegi jıllılıqtın' mexanikalıq jumısqa aylanıwın ha'm usı aylanıstın' en' utımlı bolatug'ın sha'rtlerin izertlew edi. Frantsiyaı injener Sadi Karno (1796—1832) o'zinin' 1824-jılı jariq ko'rgen «Ottın' qozg'altıw ku'shi ha'm usı ku'shti rawajlandıra alatug'ın

mashinalar haqqında» («O dvijushey sile ognya i o mashinax, sposobnix razvivat etu silu») atlı kitabın tiykarınan usı ma'selelerdi sheshiwge arnadı. Bul kitapta jıllılıqtı payda etiwge de, joq qılıwǵa da bolmaytug'ın salmaq sıız zat dep qaraytug'ın go'ne ko'z-qaraslar saqlang'an bolsa da termodinamikanın' en' da'slepki baslamaları do'retildi. Waqıttın' o'tiwi menen termodinamika joqarıda atap o'tilgen texnikalıq ma'sele sheklerinen shıǵıp, a'dewir u'iken jetiskenliklerge eristi. Onın' salmaq orayı fizikalıq ma'selelerdi u'yreniw ta'repke qaray awdı. Ha'zirgi waqıttag'ı **fizikalıq termodinamikanın'** tiykarǵı mazmunı **materiya qozg'alısının' jıllılıq formasın** ha'm qozg'alıstın' usı forması menen baylanıslı bolg'an fizikalıq kubılıslardı u'yreniw bolıp tabıladı. Jıllılıq dvigatellerine, salqınlatqısh du'zilislerge ha'm jıllılıq texnikasının' basqa ma'selelerine ma'selelerine baylanıslı bolgan termodinamikanın' bo'limleri **texnikalıq termodinamika** dep atalatug'ın termodinamikanın' o'z aldına bo'limine aylandı. Biz to'mende texnikalıq termodinamikanın' ma'selelerin tek fizikalıq nızamlardı ko'rgizbeli etip tu'sindiriw ushın g'ana qollanamız.

Materiya qozg'alısınen' jıllılıq forması makroskopiyalıq denelerdin' atomları menen molekularının' xaotik qozg'alısı (xaotik degen so'zdi qaraqalpaq tiline pu'tkilley ta'rtipsiz dep awdaramız) bolıp tabıladı. Bunday qozg'alıstın' o'zine ta'n o'zgesheligi qa'legen makroskopiyalıq denede og'ada ko'p sanlı molekular menen atomlardın' bolatug'inlıǵı menen baylanıslı. Mısalı a'dettegi jag'daylarda hawanın' bir kub santimetrinde (ko'lemi  $1 \text{ sm}^3$  bolg'an hawada)  $2,7 \times 10^{19}$  dana molekula bar boladı. Jıllılıq qozg'alısları barısında molekular bir biri menen ha'm ıdıstın' diywalları menen soqlıǵısadı. Soqtıǵısıwlardın' akıbetinde molekularların' tezliklerinin' shaması ha'm bag'ıtları keskin tu'rde o'zgeredi. Na'tiyjede tolıǵı menen ta'rtipsiz qozg'alıs qa'liplesip, bul qozg'alısta molekularların' tezliklerinin' barlıq bag'ıtları birdey itimallıqqa iye boladı, al tezliklerdin' shamaları ju'da' kishi ma'nisten ju'da' u'iken ma'nislerge shekem ken' intervalda o'zgeredi.

Gaz molekularının' qozg'alıslarının' xarakteri haqqındag'ı baslang'ısh ko'z-karaslarg'a iye bolıw ushın gazlerdin' kinetikalıq teoriyasının' bazı bir na'tiyjelerin keltiremiz.

Gaz molekularının' jıllılıq qozg'alıslarının' ortasha tezliginin' shaması jetkilikli da'rejede u'iken. Hawa molekulası ushın o'jire temperaturalarında onın' ma'nisi 500 m/s a'tırıpında bolıp, temperaturanın' joqarılawı menen ortasha tezliktin' shaması o'sedi. Gaz molekuları arasındag'ı soqlıǵısıw ju'da' tez-tezden bolıp turadı. Mısalı a'dettegi tıǵ'ızlıqlarda hawa molekulası bir soqlıǵısıwdan ekinshi soqlıǵısıwǵa shekem ortasha tek  $10^{-5}$  sm aralıqtı g'ana o'tedi. Molekularların' ortasha tezligin bilip gaz molekulasının' o'jire temperaturalarında ha'm a'dettegi tıǵ'ızlıqlarda bir sekunda shama menen 5000 millionov ret soqlıǵısatug'inlıǵın an'sat esaplap shıǵarıwǵa boladı. Kala berse soqlıǵısıwlar sanı gazdin' temperaturası menen tıǵ'ızlıǵının' artıwı menen u'lkeyedi. Molekular suyıqlıqtın' ishinde onnan da jiyi soqlıǵısadı. Sebebi suyıqlıq ishinde molekular gazlerdege qarag'anda a'dewir tıǵ'ız tarqalg'an. Molekularların' ilgerilemeli qozg'alısı menen bir qatar ta'rtipsiz aylanbalı qozg'alısları da, molekularların' quramındag'ı atomlardın' bir birine salıstırg'andag'ı terbelmeli qozg'alısı da orın aladı. Bulardın' barlıǵı da og'ada xaotik bolg'an hal kartinasın payda etedi. Bul halda gazlerdin', sonın' menen birge suyıqlıqlardı ha'm qattı denelerdin' og'ada u'iken sandag'ı molekuları jaylasadı. Zatlardı molekularlıq-kinetikalıq teoriyası ko'z-qarası boyınsha jıllılıqtın' ta'biyatı usınnan ibarat.

Qarap atırılǵan fizikalıq sistema makroskopiyalıq bolg'an jag'dayda g'ana (og'ada ko'p sanlı bo'lekshelerden turatug'ın bolsa g'ana) jıllılıq qozg'alısı haqqında ga'p etiwge boladı. Eger sistema bir yamasa bir neshe atomnan turatug'ın bolsa jıllılıq qozg'alısı haqqındag'ı ga'p qanday da bir ma'niske iye bolmaydı (Yag'nıy az sandag'ı bo'lekshelerden turatug'ın sistemalarda jıllılıq qozg'alısı ga'p bolıwı mu'mkin emes).

Termodinamika tek denelerdin' *termodinamikalıq ten' salmaqlıq halların* ha'm *a'stelik penen ju'retug'in protsesslerdi* u'yrenedi. Bir birinen keyin payda bolatug'in a'meliy jaqtan ten' salmaqlıq hallar a'stelik penen ju'retug'in protsessler sıpatında qabıl etiledi. Termodinamika sistemalardın' termodinamikalıq *ten' salmaqlıqqa o'tiwinin'* ulıwmalıq nızamlıqların da u'yreledi. Molekulalıq-kinetikalıq teoriyanın' ma'seleleri a'dewir ken'. Ol denelerdin' tek termodinamikalıq ten' salmaqlıg'ın g'ana u'yrenip qoymastan *shekli tezlikler* menen ju'retug'in *denelerdegi protsesslerdi* de u'yrenedi. Ten' salmaqlıqta turg'an zatlardın' qa'siyetlerin u'yrenetug'in molekulalıq-kinetikalıq teoriyanın' bo'limin *statistikalıq termodinamika* yamasa *statistikalıq mexanika* dep ataymız. Shekli tezlikler menen denelerde ju'retug'in protsesslerdi u'yrenetug'in bo'limi *fizikalıq kinetika* dep ataladı. Aksiomalıq termodinamika *fenomenologiyalıq* yamasa *formal termodinamika* dep te ataladı. Termodinamikanın' artıqmashlıg'ı onın' juwmaqlarının' u'lken ulıwmalıq penen xarakterleniwinde. Sebebi sol juwmaqlar a'piwayılastırılğ'an modellerdi qollanbay-aq alınadı. Al molekulalıq-kinetikalıq teoriya bolsa sonday modellerdi qollanbay is ju'rgize almaydı. Biraq molekulalıq fizika printsipinde aksiomalıq termodinamika sheshe almaytug'in ma'selelerdi de, sonın' ishinde zatlardın' termik ha'm kalorik hal ten'lemelerin keltirip shıg'arıw ma'selelerin de sheshe aladı. Bunday ten'lemelerdi biliw termodinamikanın' ulıwmalıq juwmaqlarına juwmaqlang'an ayqın xarakter beriw ushın za'ru'rli. Aksiomalıq termodinamika bul ten'lemelerdi ta'jiriybeden aladı. Usının' menen bir qatar molekulalıq fizikanın' ha'r qıylı ma'selelerin sheshiw ushın o'tkerilgen ko'p sanlı ta'jiriybeler aksiomalıq termodinamikanın' printsiplerinin' onın' tiykarın salıwshılardıń oylag'anınday ju'da' bekkem ha'm universal emes ekenligin ko'rsetti. Fizikanın' nızamlarının' ko'pshiligi sıyaqlı olardıń qollanıw oblastarı sheklengen. Mısalı aksiomalıq termodinamika *termodinamikalıq ten' salmaqlıq hallardıń o'zinen-o'zi buzılıwı* qubılısın (Yag'nıy *fluktuatsiyalardı*) pu'tkilley qaramaydı. Al bunday o'z-o'zinen buzılıwlar sistemalardın' o'lsheimleri kanshama kishi bolsa, sonshama anıq ko'rinedi. Al statistikalıq termodinamika bolsa bul qubılıslardı da o'z ishine alıp, formal termodinamikanın' qallanıwıw shegaraların anıqlaydı.

Biz molekulalıq fizika kursın u'yreniwdi klassikalıq mexanikanı u'yrenip bolg'annan keyin baslap atırmız. Bul belgili bir da'rejedegi ilimiy-pedagogikalıq qıyınshılıqtı tuwdaradı. Molekulalıq fizika molekular menen atomlar bag'ınatug'in nızamlarg'a tiykarlanıwı kerek. Bul nızamlar *kvant mexanikasının' nızamları* bolıp, biz olardı keyinirek u'yrenemiz. Bul nızamlardı u'yrenbey turıp ha'zirgi ku'nlerdegi molekulalıq fizikanı tolıq ha'm qatan' tu'rde bayanlaw mu'mkin emes. Biraq usı jag'dayg'a qaramastan biz molekulalıq fizikanı u'yreniwdi klassikalıq mexanikanı u'yrengennen keyin da'rha'l baslamaqshımız. Ne sebepten? Makroskopiyalıq qubılıslardıń ko'pshiligi sol mikroskopiyalıq sistemalardag'ı atomlardın' *ha'dden tis ko'pligi* menen baylanıslı bolıp, sol atomlardın' qurılıslarının' o'zgesheliklerinen derlik g'a'rezli emes. Bunday qubılıslardı u'yreniwde kvant mexanikasın biliw ha'mme waqıt sha'rt emes. Sonın' menen birge klassikalıq mexanika tiykarında qurılğ'an molekulalıq fizika eksperimentte baqlang'an faktlerdin' ba'rshesin tu'sindire almaydı. Atomlar menen molekularlardın' kvant mexanikası erteli-kesh o'zinin' za'ru'rli ekenligin ayqın ko'rsetedi (mısalı absolyut nolge jaqın temperaturanın' ma'nislerinde jıllılıq sıyımlıg'ı ha'm basqa da qubılıslardı izertlegende). Biraq bul jag'daylarda en' tiykarıg'ı fizikalıq qubılıslardı tu'siniw ushın kvant mexanikası boyınsha en' baslang'ısh mag'lıwmatlardı biliw menen shekleniw mu'mkin. Al bunday mag'lıwmatlardı molekulalıq fizikanı bayanlaw barısında beriwge boladı. Kvant mexanikasın elementar formada bolsa da tikkeley klassikalıq fizikadan son' sistemalı tu'rde bayanlaw pedagogikalıq jaqtan maqsetke muwapıq kelmeydi.

Fenomenologiyalıq termodinamikanı bayanlamastan burın to'mendegidey eskertiwlerdi bergen maqsetke muwapıq boladı:

XVII a'sirdegi ha'm XIX a'sirdin' birinshi yarimindag'ı fizikler jillılıqtı denelerdegi ayırıqsha salmaqısqı zat dep kabil etti. Olardın' ko'z-karası boyınsha jillılıqtın' joqtan payda etiliwi ha'm joq qılınıwı mu'mkin emes. Usınday gipotezalıq zattı *teplorod* dep atadı<sup>1</sup>. Denelerdin' qızıwın olardın' ishindegi teplorodtın' ko'beyiwi, al salqınlawın teplorodtın' azayıwı menen tu'sinlirdi. Teplorod teoriiyası haqıyqatlıqqa tuwrı kelmeydi. Bul teoriya suykelistin' saldarınan denelerdin' qızıwı sıyaqlı a'piwayı qubılıslardı da tu'sindire almaydı. Sonlıqtan teplorod teoriiyasın qarap otırıwdın' hesh qanday za'ru'rıligi joq. Biraq tariyxıy jaqtan jılılıq haqqınlag'ı ha'zirgi zaman ta'limatındag'ı ko'p terminler teplorod teriyası ta'sirinde qa'liplesken. Misalı *jillılıq mug'darı* termini teplorod teoriiyasının' tiykarg'ı terminlerinin' biri edi. Bul teoriyanın' ko'z-qarasları boyınsha jillılıq mug'darı tu'sinigine anıqlama beriwidin' keregi de joq edi. Bul tu'sinikti fizikada ha'zirgi waqıtka shekem sa'tsiz tu'rde paydalanadı. Sebebi *jillılıq mug'darı* tu'siniginde jılılıqtın' ta'biyatı haqqındag'ı durıs emes ko'z-karas orın alg'an. Terminologiya bir birin almasıratug'ın fizikalıq ko'z-qaraslarg'a salıstırg'anda a'dewir ko'p jasaydı. Sonlıqtan fizikler ko'p jag'dayda tariyxıy jag'daylarg'a baylanıslı qa'liplesken, biraq haqıyqıy fizikalıq qubılısqı sa'ykes kelmeytug'ın terminologiya menen ju'da' jiyi paydalanadı. Bunnan aytarlıqtay baxıtsızlıq kelip shıqpaydı. Tek g'ana ha'r bir termindi og'an berilgen da'l anıqlama tiykarında tu'siniw kerek boladı. Sonlıqtan *«jillılıq mug'darı»* termini haqqında ga'p etkenimizde biz sol terminge berilgen da'l anıqlamanı biliwimiz sha'rt boladı. Usınday sa'tsiz terminler qatarına teplorod teoriiyasınan miyras bolıp qalg'an *«jillılıq sıymılg'ı»*, *«jisırın jillılıq»* ha'm basqa da ko'p sanlı terminler kiredi.

Joqarıda aytilg'anlar menen bir qatarda lektsiya tekstlerin tayarlawda son'g'ı waqıtları rawajlang'an eller joqarı oqıw orınları menen kolledjlerinde ken'nen tanıl'g'an a'debiyatlar da qollanıldı. Olardın' ishinde ekewin atap o'temiz:

1. David Halliday, Robert Resnick, Jearl Walker. Fundamentals of Physics. John Wiley & Sons, Inc. New York Chichester Brisbane Toronto Singapore. 1184 p.
2. Peter J. Nolan. Fundamentals of College Physics. WCB. Wm. C. Brown Publishers. Dubuque, Iowa. Melbourne, Australia. Oxford, England. 1070 p.

Joqarıda aytilg'anlar menen bir qatarda lektsiyalar kursın tayarlawda tiykarınan to'mendegi oqıw quralları menen sabaqlıqlar bassılıqqa alındı:

- A.N.Matveev. Mexanika i teoriya otnositelnosti. «Vısshaya shkola». Moskva. 1976. 416 s.  
 İ.V.Savelev. Kurs obshey fiziki. Kniga 1. Mexanika. Moskva. «Nauka». 1998. 328 s.  
 D.V.Sivuxin. Obshiy kurs fiziki. Tom 1. Mexanika. İzd. «Nauka». Moskva. 1974. 520 s.  
 S.P.Strelkov. Mexanika. İzd. «Nauka». Moskva. 1975. 560 s.  
 S.E.Xaykin. Fizisheskie osnovı mexaniki. İzd. «Nauka». Moskva. 1971. 752 s.  
 A.N.Matveev. Molekulyarnaya fizika. İzd. «Vısshaya shkola». M. 1987. 360 s.  
 D.V.Sivuxin. Obshiy kurs fiziki. Tom II. Termodinamika i molekulyarnaya fizika. İzd. «Nauka». M. 1975. 552 s.  
 D.V.Sivuxin. Umumiy fizika kursı. Termodinamika va molekulyar fizika. Toshkent. «Wqituvshi». 1984.  
 A.K.Kikoin, İ.K.Kikoin. Molekulyarnaya fizika. İzd. «Nauka». M. 1976. 480 s.  
 A.K.Kikoin, İ.K.Kikoin. Umumiy fizika kursı. Molekulyar fizika. Toshkent. «Wqituvshi». 1978.

<sup>1</sup> Biz «teplorod» so'zin karaqalpaq tiline awdarıwg'a talpınbaymız. Sebebi bul so'z ha'zirgi waqıtları fizika iliminde derlik qollanılmaydı.

## § 1. Ko'p bo'lekshelerden turatug'in sistemalar u'yreniw usılları

Ko'p bo'lekshelerden turatug'in sistemalar u'yreniw din' usılları. Materiallıq noqat penen absolyut qattı dene tu'siniginin' paydalanılıw shegi. Materiallıq dene modeli. Atomlar menen molekulalardın' massaları. Zattın' mug'darı. Zatlardın' agregat halları. Agregat hallardın' tiykarg'ı belgileri. İdeal gaz modeli. Dinamikalıq, statistikalıq ha'm termodinamikalıq usıllar.

**Materiallıq noqat ha'm absolyut qattı dene modellerin paydalanılıw shekleri.** Mexanikada qa'siyetleri materiallıq noqat ha'm absolyut qattı dene dep atalıwshı materiallıq deneler qozg'alısı qaraladı. Bul denelerdi u'yrengende, birinshiden, olardıń ishki qurılısı menen sırtqı o'lishemleri inabatqa alınbaydı. Ekinshiden ishki qurılıs penen o'lishemler esapqa alıng'an jag'daylarda bul tu'sinikler deneler iyelep turg'an ko'lemdegi inertliklin' bo'listiriliwin beriw ushin islendi. Sonın' menen birge bul bo'listiriliw waqıt boyınsha o'zgermeydi dep esaplandı. Demek, mexanikada materiallıq denelerdin' ishki qurılısı ha'm ishki qozg'alısı izertlenbeydi. Sonlıqtan materiallıq noqat penen absolyut qattı dene modelleri materiallıq denelerdin' ishki qa'siyetlerin u'yreniw ushin jaramaydı. Bul ishki qurılıs penen usı qurılıstı payda etetug'in bo'lekshelerdin' qozg'alısı payda etetug'in qa'siyetlerdi u'yrengende ayırıqsha a'hmiyetke iye.

**Materiallıq dene modeli.** Barlıq materiallıq denelerdin' atomlar menen molekulalardan turatug'inlig'ı ma'lim. Bul atomlar menen molekulalardın' qurılısı da belgili. Sonlıqtan bir biri menen bazı bir nızamlıq penen ta'sirlesetug'in, sog'an sa'ykes qozg'alatug'in atomlar menen molekulalardın' jıynag'ı materiallıq denenin' modeli bolıp tabıladı. Al denelerdi qurawshı atomlar menen molekulalardın' o'zleri de qarap atırılğ'an jag'daylarg'a sa'ykes modeller bolıp qabıl etiliwi mu'mkin. Bir jag'daylarda olardı materiallıq noqatlar, ekinshi jag'daylarda absolyut qattı materiallıq deneler, u'shinshi jag'daylarda olardıń ishki qurılısı menen ishki qozg'alısı esapqa alınıwı mu'mkin. Kvant mexanikası atomlar menen molekulalardın' ishki qurılısı menen qa'siyetlerin tolıq u'yreniwge mu'mkinshilik beredi. Sonlıqtan da olardıń qa'siyetleri bizge belgili dep esaplanadı.

Atomlar menen molekulalardın' bir biri menen ta'sirlesiwı ha'm qozg'alısı da bizge belgili. Bir jag'daylarda bul qozg'alılar klassikalıq fizika ko'z-qarasları tiykarında qaraladı. Basqa jag'daylarda mikrobo'leksheler ushin ta'n bolğ'an kvantlıq qa'siyetlerdi esapqa alıw za'ru'rligi payda boladı. Bul nızamlar da kvant mexanikasında belgili. Bul nızamlardın' mazmunı bul kursta a'hmiyetke iye emes. A'hmiyetlisi sol nızamlardın' belgili ekenliginde. Sonlıqtan *materiallıq denenin' modeli qozg'alıs nızamları ha'm o'z-ara ta'sirlesiwı belgili bolğ'an atomlar menen molekulalardan turadı.*

**Atomlar menen molekulalardın' massaları.** Molekulalıq fizikada ko'pshilik jag'daylarda atomlar menen molekulalardın' massaları absolyut ma'nisi menen emes, al salıstırmalı o'lishem birliği joq ma'nisi menen beriledi. Bul ma'nislerdi salıstırmalı atomlıq massa  $A_r$  ha'm salıstırmalı molekulalıq massa  $M_r$  dep ataladı.

Birlik atomlıq massa  $m_u$  sıpatında  $^{12}\text{C}$  uglerod izotopı massasının'  $\frac{1}{12}$  u'lesi qollanıladı.

$$m_u = \frac{^{12}\text{C uglerod izotopı massası}}{12} = 1.669 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1.669 \cdot 10^{-24} \text{ kg.} \quad (1-1)$$

Salıstırmalı molekulalıq massa yamasa molekulanın' salıstırmalı massası

$$M = \frac{m_{\text{mol}}}{m_u} = \frac{\text{molekula massasi}}{^{12}\text{C uglerod izotopi massasi}} * 12 \quad (1-2)$$

formulası menen aniqlanadı. Bul jerde  $m_{\text{mol}}$  molekula massasının' absolyut ma'nisi. Sa'ykes formula ja'rdeminde  $m_{\text{mol}}$  din' ornına atomlıq massanın' absolyut ma'nisi qoyılsa salıstırmalı atomlıq massa da aniqlanadı.

Atomlıq massalardın' absolyut ma'nisleri  $10^{-22}$ - $10^{-24}$  g, al salıstırmalı atomlıq massalar 1-100 shamasında boladı. Al salıstırmalı molekulaıq massalardın' shamasının' shekleri a'dewir u'lken boladı.

**Zattın' mug'darı.** Sİ esaplawlar sistemasında zattın' mug'darı onın' strukturalıq elementlerinin' sanı menen ta'riplenedi. Bul shama *mol* lerde beriledi.

*<sup>12</sup>C uglerod izotopının' 0.012 kilogramında (12 gramında) qansha strukturalıq element bolsa zattın' 1 molinde de sonday strukturalıq element boladı.* Solay etip aniqlama boyınsha *qa'legen zattın' 1 moli birdey sandag'ı strukturalıq elementke iye boladı. Bul san Avagadro sanı dep ataladı:*

$$N_A = \frac{0,012 \text{ kg}}{12 m_u} \frac{1}{\text{mol}} = 10^{-3} \frac{\text{kg}}{m_u} \frac{1}{\text{mol}} = 6,02 \times 10^{23} \frac{1}{\text{mol}}. \quad (1-3)$$

Demek

$$m_u N_A = 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}} = 1 \frac{\text{g}}{\text{mol}}. \quad (1-4)$$

Mısal retinde vodorod atomlarının' bir moli haqqında ga'p etiw mu'mkin. Ha'r bir vodorod atomının' massasının'  $1,66 \times 10^{-24}$  g ekenligin esapqa alıp, bul sandı Avagadro sanına ko'beytsek  $1 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$  shamasın alamız.

Mol tu'sinigi zattın' strukturalıq elementlerine qarata qollanıladı. Sonlıqtan da strukturalıq elementler haqqındag'ı mag'lıwmat barqulla keltiriliwi kerek, sebebi bunday bolmag'an jag'dayda mollerde zatların' mug'darın aniqlaw ma'nisin jog'altadı. Mısalı ıdista suwdın' 2 moli bar dep aytıw durıs emes. Al ıdista suw molekularının' 2 moli bar dep aytıw durıs boladı. Bul so'z ıdista  $296,02 \times 10^{23}$  dana  $\text{H}_2\text{O}$  molekulasının' bar ekenligin bildiredi. Ja'ne de, eger de bazı bir ko'lemde  $10^{24}$  erkin elektron bar bolatug'ın bolsa bul ko'lemde  $\frac{10^{24}}{6,02 \times 10^{23}} = 1,66$  mol elektron bar dep aytamız. Eger suwdın' bazı bir mug'darı 1 mol  $\text{H}_2\text{O}$  suw molekulasınan turatug'ın bolsa onda ol 2 mol vodorod atomlarınan ha'm 1 mol kislorod atomlarınan (Yag'nıy 10 mol protonlardan, 8 mol neytronlardan ha'm 10 mol elektronlardan) turadı.

Molekulaıq fizikada 1 mol zattın' massası bolg'an **mollik massa** tu'sinigi qollanıladı:

$$M = m_{\text{mol}} \times N_A. \quad (1-5)$$



Bul jerde  $m_{\text{mol}}$  molekula massası. Mollik massa 1 mol zattın' massasına sa'ykes keliwshi kilogramlarda an'latıladi (1-2) ha'm (1-4) formulaların esapqa alsaq (1-5) formulası

$$M = m_{\text{mol}} \times 10^{-3} m_u = 10^{-3} \times M_r \text{ kg/mol.} \quad (1-6)$$

tu'rine iye boladı. Bul formuladag'ı  $M_r$  shaması (1-2) menen anıqlang'an o'lsheem birligi joq salıstırmalı shama.

$^{12}\text{C}$  uglerod izotopınan turatug'in zattın' mollik massası  $12 \times 10^{-3}$  kg/mol ge ten'.

Salıstırmalı atomlıq massalar Mendeleev du'zgen elementlerdin' da'wirlik sistemasında keltirilgen.

Moller shaması  $v$  strukturalıq elementler sanı  $n$  menen bılay baylanısqa:

$$v = \frac{n}{N_A}. \quad (1-7)$$

$m_{\text{mol}} n = m$  zattın' massası ekenligi esapqa alıp (1-7) nin' alımın da, bo'limin de molekulanın' massasına bo'lsek

$$n = \frac{m}{M}$$

ekenligine iye bolamız.

**Zatlardın' agregat halları.** Atomlar menen molekulalardın' o'z-ara ta'sir etisiwin izertlewler olar arasında salıstırmalı u'lken qashıqlıqlarda tartısıwdın', al kishi qashıqlıqlarda iytterisiwdın' bolatug'inlig'in ko'rsetedi. O'zlerinin' ta'biyatı boyınsha bul ku'shler elektromagnit ku'shleri bolıp tabıladi. Kishi qashıqlıqlardag'ı iytterisiwdın' orın alıwı atomlar menen molekulalardın' ken'isliktin' belgili bir bo'limin iyeleytug'inlig'inın' saldarı bolıp tabıladi. Sonlıqtan olar sol ko'lemnin' basqa atomlar menen molekulalardın' iyelewine qarsılıq jasaydı.

Atomlar menen molekulalar barlıq waqıtta qozg'alısta boladı ha'm sonlıqtan kinetikalıq energiyag'a iye boladı. Tartılıs ku'shleri atomlar menen molekulalardı tutas bir deneye baylanıstırıwg'a bag'darlang'an, al kinetikalıq energiya bolsa sol baylanıstı u'ziwge qaray bag'darlang'an. Usı eki sebeptin' bir biri menen gu'resinin' na'tiyjesi sol ku'shlerdin' salıstırmalı intensivligine baylanıslı. Eger atomlar menen molekulalardı bir birinen ajratıp jiberiwshi tendentsiya intensivlirek bolsa zat gaz ta'rizli halda, al baylanıs jasawg'a bolg'an tendentsiya ku'shlirek bolsa zat qattı halda boladı. Al sol tendentsiyalar intensivligi shama menen o'z-ara ten' bolsa onda suyıqlıq hal ju'zege keledi. Usı aytlıg'anlardın' barlıg'ı da sapalıq xarakterge iye. «İntensivlilik» tu'sinigine sanlıq jaqtan o'lsheem berilgen joq. Usınday sanlıq o'lsheem molekulalardın' o'z ara tartısıw potentsiallıq energiyası menen kinetikalıq energiyası bolıp tabıladi. Eger barlıq molekulalardın' kinetikalıq energiyaların' qosındısı potentsial energiyalardın' on' belgi menen aling'an qosındısınan ko'p bolsa zat gaz ta'rizli halda turadı. Qarama-qalsı jag'dayda qattı dene, al o'z-ara bara bar jag'dayda suyıqlıq payda boladı.

Zatlar gaz ta'rizli halda formasın da, ko'lemnin de saqlamaydı. Gazdın' ko'lemi sol gaz jaylasqa ıdıtın' forması menen anıqlanadı. Bldıs bolmag'an jag'dayda barlıq zat pu'tkil ko'lemdi toltırıp turıwg'a umtıladı. Gazlerdegi molekulalar qozg'alısın ko'z aldıg'a bılay keltiremiz: Ko'pshilik

waqıtları molekula bir biri menen ta'sir etispey erkin qozg'aladı, keyin basqa bir molekula menen soqlıg'ısıwdın' aqıbetinde o'zinin' qozg'alıs bag'ıtın o'zgerledi. Molekulanın' bir soqlıg'ısıw menen ekinshi soqlıg'ısıw ortasındag'ı ju'rip o'tken ortasha jolının' shaması sol molekula diametrinen mın'lag'an ese u'lken. U'sh molekulanın' bir waqıtta soqlıg'ısıwı siyrek ushırasadı.

***Qattı halda molekulalar menen atomlar bir biri menen baylanısqan.*** Qattı halda dene formasın da, ko'lemin de saqlaydı. Deformatsiyanın' na'tiyjesinde qattı denenin' formasın da, ko'lemin de saqlawg'a qaratılğ'an ku'shler payda boladı. Qattı denelerdin' atomları menen molekulaları belgili bir orınlardı iyelep, ***kristallıq pa'njereni*** payda etedi. Olar ***kristallıq pa'njerenin' tu'yinleri*** dep atalatug'ın ten' salmaqlıq halları a'tirapında terbelmeli qozg'alıs jasaydı.

Suyıq halda zatlar formasın saqlamaydı, al ko'lemi turaqlı bolıp qaladı (salmaqsızlıq jag'dayındag'ı suyıqlıqtın' shar ta'rizli formanı iyelewi bug'an sa'ykes kelmeydi). Suyıqlıq molekulaları bir birine tiyisip jaqın jaylasadı. Biraq olardıń bir birine salıstırğ'andag'ı jaylasıwları belgilenbegen, olar bir birine salıstırğ'anda salıstırmalı tu'rde a'stelik penen orınlardıń o'zgerledi.

***İdeal gaz modeli.*** Ko'p bo'lekshelerden turatug'ın sistemalardıń en' a'piwayı tu'ri ***ideal gaz*** bolıp tabıladı. Anıqlama boyınsha ***bunday gaz shekli massag'a iye noqatlardan turıp, bul materiallıq noqatlar arasında sharlardın' soqlıg'ısıw nızamları boyınsha soqlıg'ısıw orın aladı ha'm o'z-ara ta'sirlesiw ku'shlerinin' basqa tu'rleri bolmaydı.*** İdeal gaz bo'leksheleri arasındag'ı sharlardın' soqlıg'ısıw nızamları boyınsha soqlıg'ısıwdın' orın alatug'ımlıg'ın ayırıqsha atap o'tiw gerek. Sebebi noqatlıq bo'leksheler tek qaptalı menen soqlıg'ısadı ha'm sonlıqtan soqlıg'ısıwda olardıń qozg'alıw bag'ıtı u'lken emes mu'yeshlerge o'zgeredi. İdeal gazdın' qa'siyetine jetkilikli da'rejede siyrekletilgen gazler sa'ykes keledi.

***Dinamikalıq usıl.*** Soqlıg'ısıwlar arasında bo'leksheler tuwrı sızıq boyınsha qozg'aladı. Gaz toltırılğ'an ıdstın' diywalları menen soqlıg'ısıw nızamları da belgili. Sonlıqtan belgili bir waqıt momentinde turg'an ornı ha'm tezligi belgili bolğ'an bo'lekshenin' bunnan keyingi qozg'alısın esaplawg'a boladı. Eger za'ru'rliğı bolsa barlıq bo'lekshelerdin' bunnan burıng'ı orınları menen tezliklerinde printsipinde esaplaw mu'mkin. Qa'legen waqıt momentindegi bo'lekshelerdin' iyelegen ornın ha'm tezliklerin biliw arqalı sol bo'lekshelerden turatug'ın sistema haqqında tolıq informatsiya alıw mu'mkinshiligin beredi.

***Biraq bul informatsiyanı bizin' oyımızda sıydırıw mu'mkin emes. Sonday-aq sa'ykes esaplawlar ju'rgiziwdin' o'zi de barlıq texnikalıq mu'mkinshiliklerge sa'ykes kelmeydi.***

Haqıyqatında a'dettegi jag'daylarda  $1 \text{ sm}^3$  gazde shama menen  $2,7 \times 10^{19}$  molekula jaylasadı. Demek bazı bir waqıt momentindegi barlıq molekulalardıń iyelegen orınlardıń (koordinatalardıń) ha'm tezliklerin jazıw ushın  $692,7 \times 10^{19}$  san gerek bolğ'an bolar edi. Eger qanday da bir esaplaw mashinası sekundına 1 mln. sandı esapqa alatug'ın bolsa, onda  $692,7 \times 10^{13} \gg 6$  mln. jıl talap etiledi. Tap usınday tezliklerde kinetikalıq energiyanı esaplaw gerek bolsa onda shama menen 21 mln. jıl gerek bolğ'an bolar edi. Ma'seleni bunday etip sheshiwidin' texnikalıq jaqtan mu'mkin emes ekenligi endi belgili boldı.

Tek g'ana bul jag'day dinamikalıq usıl menen ma'seleni qarawdın' gerek emes ekenligin ko'rsetip g'ana qoymay, basqa da a'hmiyetli jag'daydı esapqa alıwımız gerek. Ma'sele sonnan ibarat, ***tikkeley ha'r bir bo'lekshe haqqında informatsiya alıw teoriyalıq analiz jasaw ushın jaramaydı.***

Misalı 1  $\text{sm}^3$  ko'lemdegi 1 mlrd. molekula sanlıq qatnasta Jerde jasawshı barlıq adamg'a salıstırğ'andag'ı 1 adamg'a sa'ykes keledi. Sonlıqtan Jerdegi barlıq adamlar haqqında informatsiyag'a iye bolsaq, onda 1 adam haqqındag'ı ma'limlemeni jog'altıw biz qarap atırğ'an sistemadag'ı 1 mlrd. molekula haqqındag'ı ma'limlemelerdi jog'altqannan a'hmiyetlirek bolğ'an bolar edi. Sonın' menen birge ko'p sanlı bo'lekshelerden turatug'ın sistemalardı u'yreniw ushın onshama ko'p ma'limlemelerdin' bolıwı kerek emes ekenligi de tu'sinikli.

Solay etip juwmaqlap aytqanda *ko'p sanlı bo'lekshelerden turatug'ın sistemalardı ta'riplew ushın dinamikalıq ta'riplew texnikalıq jaqtan a'melge aspaydı, teoriyalıq jaqtan jaramaydı, a'meliy ko'z-qaras boyınsha paydası joq.*

**Statistikalıq usıl.** Joqarıda keltirilgen ko'p sandag'ı bo'lekshelerden turatug'ın sistemalardı ta'riplewdin' dinamikalıq usılı sonday sistemanı u'yreniw ushın informatsiyalar ulıwmalastırılğ'an xarakterge iye bolıwı ha'm olar ayırıp aling'an ayırım bo'lekshelerge emes, al ko'p sandag'ı bo'lekshelerdin' jıynag'ına tiyisli bolıwı kerek. Sa'ykes tu'sinikler ayırım bo'lekshelerge emes, al bo'lekshelerdin' u'lken jıynag'ına qarap ayılıwı tiyis. Bul tu'sinikler ma'seleni qarap shıg'ıwdın' basqa tu'rlerin talap etedi. Bul usıl *statistikalıq usıl* dep ataladı. Ko'p sanlı bo'lekshelerden turatug'ın sistemalardıń qa'siyetlerin statistikalıq usıllar menen izertlewden keltirilip shıg'arılğ'an nızamlar *statistikalıq nızamlar* dep ataladı.

*Fizikada statistikalıq usıllar dinamikalıq usıllarg'a qarag'anda ko'p qollanıladı. Sebebi dinamikalıq usıllar u'lken emes erkinlik da'rejesine iye sistemalar ushın qollanıladı. Al ko'pshilik fizikalıq sistemalar og'ada ko'p sandag'ı erkinlik da'rejelerine iye boladı ha'm sonlıqtan tek g'ana statistikalıq usıllar menen u'yreniliwi mu'mkin. Sonın' menen birge kvant-mexanikalıq nızamlar da o'zinin' ta'biyatı boyınsha statistikalıq nızamlar bolıp tabıladı.*

**Termodinamikalıq usıl.** Ko'p bo'lekshelerden turatug'ın sistemalardı onın' ishki qurılısın esapqa almay-aq izertlewge boladı. Bunday jag'dayda sistemanı tolıg'ı menen qamtıytug'ın tu'sinikler menen shamalardan paydalanıw kerek. Ma'selen ideal gaz modeli bunday qarawda ko'lem, basım ha'm temperatura menen ta'riplenedi. Eksperimentallıq izertlewler bunday shamalar arasındag'ı baylanıslarda tabıw ushın islenedi. Al teoriya bolsa bazı bir ulıwmalıq jag'daylar tiykarında (misalı energıyanın' saqlanıw nızamı) du'zilip, sol baylanıslardı tu'sindiriw ushın du'ziledi. Bunday teoriya o'zinin' o'zgesheligi boyınsha fenomenal teoriya bolıp tabıladı ha'm qarap atırılğ'an sistemanın' tolıq qa'siyetlerin anıqlaytug'ın protsesslerdin' ishki mexanizmleri menen qızıqpaydı. Ko'p sanlı bo'lekshelerden turatug'ın sistemalardı u'yreniwdin' bunday usılın *termodinamikalıq usıl* dep ataymız.

Ko'p sanlı bo'lekshelerden turatug'ın sistemalardı u'yreniwdin' statistikalıq ha'm termodinamikalıq usılları bir birin tolıqtıradı. Termodinamikalıq usıl o'zinin' ulıwmalıg'ı menen ta'riplenedi, qubılıslardı olardıń ishki mexanizmisiz u'yreniwge mu'mkinshilik beredi. Statistikalıq usıl qubılıslardıń ma'nisin tu'siniwge alıp keledi. Du'zilgen teoriya ulıwma sistemanın' qa'siyetleri menen ayırım bo'lekshelerdin' qa'siyetlerin baylanıstıradı.

**Zatlardıń agregat halı molekulalardıń ortasha kinetikalıq energiyası menen sol molekulalar arasındag'ı o'z-ara ta'sir etisiwge sa'ykes keletug'ın ortasha potentsial energıyanın' o'z-ara qatnasına baylanış:** gazlerde molekulalardıń ortasha kinetikalıq energiyası ortasha potentsial energıyasının' modulinen u'lken (tartılısqsa sa'ykes keliwshi potentsial energıyanın' teris belgige iye bolatug'ınıhğ'ın eske tu'siremez), suyuqlıqlarda energıyanın' sol eki tu'ri bir birine barabar (shama menen ten'). Qattı denelerde bolsa ta'sirlesidin' ortasha potentsial energiyası molekulalardıń ortasha kinetikalıq energıyasınan a'dewir (ko'p ese) ko'p.

**İdeal gaz tek g'ana oyımızdag'ı ideya bolıp tabıladı, al real du'nyada ideal gazdın' bolıwı mu'mkin emes: molekulalardı noqat ha'm olardı bir biri menen ta'sirlespeydi dep esaplaw molekulalardı ken'islik penen waqıttan tıs jasaydı (Yag'nıy jasmaydı) dep esaplaw menen ekvivalent.**

**Ko'p bo'lekshelerden turatug'm sistemanı dinamikalıq ta'riplewdi texnikalıq jaqtan a'melge asırıw mu'mkin emes, bunday ta'riplew teoriyalıq ko'z-qarastan jaramsız, al a'meliy jaqtan paydasız bolıp tabıladı.**

**Ko'p bo'lekshelerden turatug'm sistemanı statistikalıq ha'm termodinamikalıq usıllar bir birin tolıqtıradı.**

**Sorawlar:** Molekulalıq fizikadag'ı zatlardıń modelinin' tiykarg'ı elementlerin aytıp berin'iz.

Zatlardıń ha'r qıylı agregat hallarının' belgileri nelerden ibarat?

Qanday sebeplerge baylanıslı ko'p bo'lekshelerden turatug'm sistemanı dinamikalıq ta'riplewdi texnikalıq jaqtan a'melge asırıw mu'mkin emes, bunday ta'riplew teoriyalıq ko'z-qarastan jaramsız, al a'meliy jaqtan paydasız bolıp tabıladı?

Ko'p bo'lekshelerden turatug'm sistemanı termodinamikalıq ta'riplewdin' tiykarg'ı o'zgeshelikleri nelerden ibarat?

## **2-§. Matematikalıq tu'sinikler**

Tosattan bolatug'ın qubılıslar ha'm shamalar. İtimallıq. İtimallıqtı jiyiligi boyınsha anıqlaw. İtimallıq tıg'ızlıg'ı. İtimallıqlardı ulıwma jag'daylarda qosıw. İtimallıqlardıń normirovkası. SHa'rtli tu'rdegi itimallıq. Bir birinen g'a'rebsiz waqıyalar. Ko'p waqıyalar ushın itimallıqlardı ko'beytiw. Tosattan bolatug'ın diskret shamanın' ortasha ma'nisi. Dispersiya. İtimallıqlardıń tarqalıw funktsiyası. Gauss bo'listiriliwi.

Bul paragrafta itimallıqlar teoriyasınan en' minimal bolg'an mag'lıwmatlar keltiriledi. Matematikalıq tu'siniklerdin' fizikalıq ayqınlastırılıwı tiykarınan ideal gaz misalında a'melge asırıladı.

**Tosattan bolatug'm waqıyalar.** Qozg'alıstı dinamikalıq jaqtan ta'riplewden bas tartıwdın' na'tiyjesinde ma'seleni qoyıwı o'zgeriwge alıp keledi. Eger ishinde ideal gaz bar ıdıs ishinde bazı bir ko'lemge iye aymaq bo'linip alınıp berilgen bo'lekshe qashan usı aymaqta boladı dep ma'sele qoyılğ'anda anıq juwap beriwdin' mu'mkinshiligi bolmaydı. Qarap atırılğ'an aymaqta berilgen bo'lekshe bazı bir waqıt aralıg'ında bola ma? degen sorawg'a da juwap beriwdin' mu'mkinshiligi joq. Sonlıqtan ken'isliktin' bazı bir aymag'ında bo'leksheni tabıw tosattan bolatug'm waqıya bolıp sanaladı.

*Turmıstag'ı geypara waqıyaların' qashan bolatug'ınlğı'n bilmewimizdin' sebebinen solardıń tosattan ju'z beriwı subʼektiv jag'day bolıp tabıladı. Biraq ko'pshilik jag'daylarda olardıń tosattan bolıwı obʼektiv ha'm printsiptiallıq jag'day bolıp tabıladı. Sonlıqtan tosattan ju'z beretug'ın waqıyanı da'l boljaw haqqındag'ı ma'selenin' qoyılıwı fizikalıq ma'niske iye emes.*

Tosattan bolatug'ın waqıyalar ushın arnawlı tu'sinikler ha'm sa'ykes matematikalıq apparat bar. Bul ma'seleler menen matematikanın' bir bo'limi bolg'an *itimallıqlar teoriyası* shug'ıllanadı.

**Tosattan bolatug'ın shamalar.** İdeal gazde belgili bir waqıt momentindegi ayırım molekullardıń koordinataları menen tezlikleri aldın ala belgili bolatug'ın shamalar sıpatında qaralmaydı. Olar tosattan bolatug'ın shamalar bolıp tabıladı. Usınday tosattan bolatug'ın sanlarga baylanıslı nızamlıqlar *itimallıqlar teoriyasında* ha'm *matematikalıq statistikada* u'yreniledi.

**İtimallıq.** İlim menen praktikada tosattan bolatug'ın og'ada ko'p waqıyalar u'yreniledi. Usınday waqıyalarg'a baylanıslı bolg'an ulıwmalıq na'tiyje barlıq waqıtta da birdey tu'rde ayıladı: waqıya bolıp o'tti yamasa waqıya bolmadı. Tosattan bolatug'ın qubılıslar teoriyasının' wazıypası sol waqıyanın' bolatug'ınlag'ına yamasa bolmaytug'ınlag'ına sanlıq ma'nis beriw bolıp tabıladı. Bul «*itimallıq*» tu'sinigi ja'rdeminde a'melge asırıladı.

**İtimallıqtı jiyilik boyınsha anıqlaw.** İdeal gaz toltırılğ'an ko'lemde eki birdey bo'limge bo'lemiz. Meyli biz ha'r bir bo'leksheni baqlaw mu'mkinshiligine iye bolg'an bolayıq (bo'lekshelerge sezilerliktey ta'sir etpey bir birinen ayıra alıw ha'm ha'r bir bo'lekshenin' keyninen gu'zetiw mu'mkinshiligi). Sistemanı qorshap turg'an ortalıq o'zgermeytug'ın bolsın. Gu'zetilip atırg'an bo'lekshenin' ko'lemnin' bir bo'liminde bolıw waqıyasın qaraymız. Na'tiyje tek g'ana bo'lekshe sol bo'limde «boldı» yamasa «bolmadı» degen so'zlerden turadı. Meyli N arqalı baqlawlardıń (sınap ko'riwlerdin') ulıwma sanı belgilengen bolsın.  $N_A$  waqıya «bolg'an» jag'daylar sanı. A arqalı waqıyanın' o'zi belgilengen. A waqıyasının' bolıw itimallıg'ı

$$P(A) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_A}{N} \quad (2.1)$$

formulası ja'rdeminde anıqlanadı.

Bul jerde o'zgerissiz qalatug'ın sırtqı jag'daylardag'ı sınap ko'riwler sanı  $N \in \mathbb{N}$  sha'rti u'lken a'hmiyetke iye. Bir sistema u'stinen ju'rgizilgen ko'p sanlı sınap ko'riwler ornına ko'p sandag'ı birdey sistemalar u'stinen ju'rgizilgen ayırım sınap ko'riwler haqqında aytıwıg'a boladı. Ko'p sanlı birdey bolg'an sistemalar *ansambli* dep ataladı. Sonlıqtan (2.1) degi  $N_A$  sanı bo'lekshe ıdıstın' berilgen yarımında jaylasqan jag'dayına sa'ykes keletug'ın ansambldegi sistemalar sanı bolıp tabıladı. N ansambldegi sistemalardıń ulıwma sanı. A'llette, eki anıqlama da durıs bolıp tabıladı. Biraq ayqın jag'daylar ushın ju'rgizilgen teoriyalıq esaplawlarda eki anıqlamanın' biri ekinshisine qarag'anda qolaylıraq bolıp shıg'ıwı mu'mkin.

**İtimallıq tıg'ızlıg'ı.** Eger waqıya u'zliksiz o'zgeretug'ın shamalar menen ta'riplenetug'ın bolsa (2.1) formula menen itimallıqtı anıqlaw ma'niske iye bolmay qaladı. Mısalı bo'lekshenin' tezligi 10 m/s qa ten' bolıwının' itimallıg'ı nege ten' dep soraw ma'niske iye emes. Bunday jag'dayda itimallıq ornına *itimallıq tıg'ızlıg'ı* tu'sinigenen paydalanamız.

Endi gaz toltırılğ'an ıdıstı  $\Delta V_i$  ko'lemlerine bo'lemiz ( $i = 1, 2, \mathbf{K}$ ). Bunday ko'lemler sanı sheksiz ko'p. Baqlawlar (sınap ko'riwler) sanın N arqalı belgileyemiz. Ha'r bir baqlaw aktinde molekula qanday da bir  $\Delta V_i$  ko'leminde tabıladı. Meyli N ret baqlaw ju'rgizilgende ( $N \in \mathbb{N}$ ) molekula N ret  $\Delta V_i$  ko'leminde tabılsın. (2.1) anıqlamasına muwapıq kelesi baqlawdı molekulanı  $\Delta V_i$  ko'leminde tabıwdın' itimallıg'ı

$$P(\Delta V_i) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_i}{N}.$$

Eger salmaq ku'shi bar bolatug'in bolsa molekulanı ıdıtın' to'meninde tabıwdın' itimallıg'ı joqarısında tabıwdın' itimallıg'man u'lken boladı. Bul itimallıq ko'lem  $\Delta V_i$  ge de baylanışlı. Sonlıqtan

$$f(x, y, z) = \lim_{\Delta V_i \rightarrow 0} \frac{P(\Delta V_i)}{\Delta V_i} = \lim_{\substack{\Delta V_i \rightarrow 0 \\ N \rightarrow \infty}} \frac{N_i}{\Delta V_i N}. \quad (2.2a)$$

Bul jerde  $\Delta V_i$  sheksiz kishireyip kelip tireletug'in noqattın' koordinatalar  $x, y, z$  penen belgilengen. Solay etip itimallıq tıg'ızlıg'ı dep molekulanı sheksiz kishi ko'lemde tabıw itimallıg'ının' sol ko'lemge qatnasın aytağı ekenbiz.

$dV$  ko'lemindegi  $x, y, z$  noqatının' a'tirapında  $N_0$  baqlaw ju'rgizilgende (2.2a) an'latpasınan molekula

$$dN = N_0 f(x, y, z) dV$$

ret tabılatug'inlıg'ı kelip shıg'adı.  $V_1$  ko'leminde molekula

$$N(V_1) = N_0 \oint_{V_1} f(x, y, z) dx dy dz$$

ret tabıladı. Bul jerden  $V_1$  ko'leminde molekulanın' tabılw itimallıg'ı  $P(V_1)$  shamasının' bılay esaplanatug'inlıg'ı kelip shıg'adı:

$$P(V_1) = \frac{N(V_1)}{N_0} \oint_{V_1} f(x, y, z) dx dy dz.$$

Solay etip itimallıq tıg'ızlıg'ın bile otırıp tıg'ızlıq anıqlang'an qa'legen oblasttag'ı itimallıqtı esaplawg'a boladı. Bıdıs ishindegi gaz ushın ıdıtın' sırtında itimallıq tıg'ızlıg'ı nolge ten'.

Eger  $V_1$  ken'isligi retinde pu'tkil ken'islikti ( $V_1 \text{ ® } \mathbb{V}$ ) alinatug'in bolsa, onda usı ko'lemdegi baqlawlar sanı sinap ko'riwler sanına ten', Yag'nıy  $N(V_1 \text{ ® } \mathbb{V}) = N_0$ .  $V_1 \text{ ® } \mathbb{V}$  ko'leminde bo'leksheni tabıw itimallıg'ı

$$P(V_1 \text{ ® } \mathbb{V}) = \frac{N(V_1 \text{ ® } \mathbb{V})}{N_0} = 1 = \oint_{V_1 \text{ ® } \mathbb{V}} f(x, y, z) dx dy dz$$

shamasına ten', al

$$\oint_{V_1 \text{ ® } \mathbb{V}} f(x, y, z) dx dy dz = 1$$

sha'rti *itimallıq tıg'ızlıg'ının' normirovkası* dep ataladı. Normirovka sha'rti ha'r bir baqlawda molekulanın' ken'isliktin' qanday da bir noqatında tabılatug'ınlg'ın (basqa so'z benen aytqanda molekulanın' bar ekenligin) bildiredi.

Eger molekula diywallar menen qorshalg'an V ko'leminde jaylasatug'ın bolsa normirovka sha'rti to'mendegidey tu'rge iye boladı:

$$\int_V f dV = 1.$$

**Qoyıl'g'an eksperimentte nelikten ten'ley itimallıqqa iye eki waqıyanın' birewi ju'zege keldi, al sonın' ornına ekinshisi ju'zege kelgen joq degen soraw qoyıw ma'niske iye emes. Orta a'sirlerde bunday sorawlar ko'plep talqılang'an. Eshekten ten'dey qashıqlıqqa eshek jeytug'ın eki portsiya sho'p ornalastırıl'g'an jag'dayda eshektin' qaysı portsiyanı saylap alatug'ınlg'ı diskussiya qılın'g'an. Bunday jag'dayda eshek ne qıladı yamasa ol ashtan o'le me? A'llette eshek bunday logikanı maqullamaydı. İlim de bunday logikanı maqullamaydı.**

**Waqıyalardıń tosınnan bolatug'ınlg'ın moyınlaw sol waqıyalar arasındag'ı sebeplik qatnaslardın' bar ekenligin biykarlamaydı<sup>2</sup>. Waqıyalar arasındag'ı sebeplilik baylanıs universal ma'niske iye, al usı sebeptin' xarakteri ha'r qıylı bolıwı mu'mkin. Mısalı sebepliliktin' tek statistikalıq jaqtan ju'zege keliwi orın ala aladı. Waqıyalardıń tosınnan bolıwı bul waqıyalardı basqarıw'g'a bolmaytug'ınlg'ın, olardıń qadag'alawdan tıs ekenligin an'g'artpaydı. Mısalı lotoreyadan utıw mu'mkinshiligin joqarılatıw ushın ko'birek bilet satıp alıw kerek.**

**Bir birin biykarlaytug'ın waqıyalar itimallıqların qosıw.** Meyli bir birin biykarlaytug'ın eki waqıya bar bolsın. Mısalı V ko'leminde eki bir biri menen kesispeytug'ın eki  $V_1$  ha'm  $V_2$  ko'lemleri bar bolatug'ın bolsa (2.1 su'wrette ko'rsetilgen), onda bo'leksheni  $V_1$  ko'leminde tabıw  $V_2$  ko'leminde tabıwdı biykarlaydı. Solay etip eger bo'lekshe  $V_1$  ko'leminde tabıl'g'an bolsa, bul waqıya sol bo'leksheni  $V_2$  ko'leminde tabıwdı biykarlaydı.

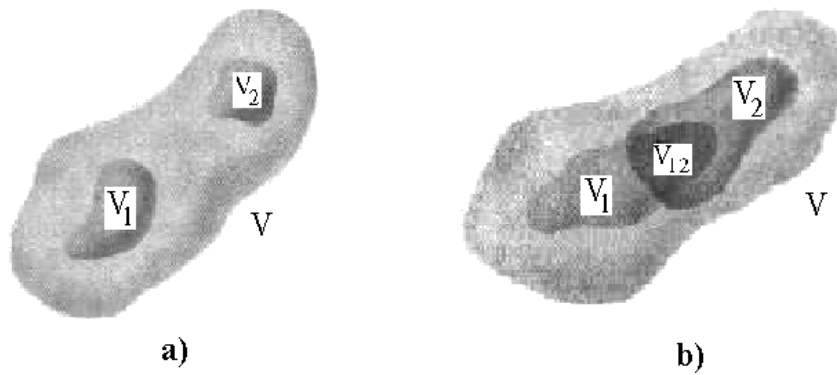
Bo'lekshenin'  $V_1$  yamasa  $V_2$  ko'leminde tabıw waqıyasın qaraymız. Bul waqıyanın' itimallıg'ı

$$P(V_1 + V_2) = \frac{V_1 + V_2}{V} = \frac{V_1}{V} + \frac{V_2}{V} = P(V_1) + P(V_2), \quad (2.3)$$

Yag'nıy bo'leksheni  $V_1$  ha'm  $V_2$  ko'lemlerinde tabıwdın' itimallıqlarının' qosındısı bolıp tabıladı. Bul formula bir birin biykarlaytug'ın waqıyalardıń itimallıqların qosıw qag'ıydasın beredi.

---

<sup>2</sup> Sebeplilik qatnasları dep ga'p etkenimizde biz mınanı tu'sinemiz: qa'legen waqıyanın' ju'z beriwi ushın sebeptin' bolıwı kerek. Sebepsiz hesh na'rse de ju'zege kelmeydi. Sonlıqtan filosofiyada (a'dettegi turmista da) sebep dep waqıyalar dizbegindegi o'zinen son'g'ı waqıyanı keltirip shıg'aratug'ın waqıyanı aytadı. Al ju'zege kelgen waqıyanı na'tiyje dep ataydı. Sonlıqtan sebep degenimiz de, na'tiyje degenimiz de qanday da bir waqıyalar bolıp tabıladı. Sebep na'tiyjeni boldıradı, al ju'zege kelgen na'tiyje sebep sıpatında o'zinen son'g'ı na'tiyjelerdi ju'zege keltiredi.



2-1 su'wret.

- a). İtimallıqlardı  
kontinual  
interpretatsiyalaw;  
b). İtimallıqlar menen  
sha'rtli itimallıqtı qosıw  
ushın arnalg'an su'wret.

Meyli, bir ta'repine 1, ekinshi ta'repine 2 sanları jazılg'an juqa do'n'gelek plastinkanı (tıyındı) taslawdı baqlaytug'ın bolayıq. Plastinka jerge tu'skende joqarı jag'ına 1 yamasa 2 nin' shıg'ıw waqıyasının' itimallıg'ı

$$P(1 + 2) = P(1) + P(2).$$

Bunday waqıya ushın ulıwma formulanı bilay jazamız

$$P(A + B) = P(A) + P(B). \quad (2.4)$$

Bul formulada A yamasa B waqıyasının' ju'zege keliw itimallıg'ı  $P(A + B)$  arqalı belgilengen. A ha'm B waqıyalarının' bir waqıtta ju'zege keliwi bolmaydı, al sonın' menen birge usı eki waqıyanın' bir waqıtta ju'zege kelmewi orın aladı dep esaplanadı.

Bazı bir birin biykarlaytug'ın ha'r qanday waqıyalardıń jıynag'ınan turatug'ın berilgen sistemadag'ı birdey mu'mkinshiliklerde orınlag'an sınavlardın' sanı berilgen bolsın. Bul waqıyalardı 1, 2, **K**, n indeksleri menen belgileymiz. i belgisi menen belgilengen waqıyanın' ju'zege keliwler sanın  $N_i$  menen belgileymiz. Bunday jag'dayda

$$N_1 + N_2 + \mathbf{K} + N_n = \sum_{i=1}^n N_i = N. \quad (2.5)$$

Demek

$$\sum_{i=1}^n \frac{N_i}{N} = \sum_{i=1}^n P_i = 1.$$

Bul formuladag'ı  $P_i$  arqalı i - waqıyanın' itimallıg'ı belgilengen.

$$\sum_{i=1}^n P_i = 1 \quad (2.6)$$

formulası itimallıqlardı normirovkalaw sha'rti dep ataladı. ***Bul formula qarap atırılğ'an bir birin biykarlawshı waqıyalar jıynag'ının' tolıq esapqa alıng'anlıg'ın bildiredi.***

**İtimallıqlardı ulıwma jag'dayda qosıw.** Eger eki waqıya da bir waqıtta ju'zege keletug'ın bolsa (2.4) formula g'a o'zgeris kirgiziwimiz kerek. Meyli sınap ko'riwlerdin' ulıwma sanı N bolsın. Usınday sınaqlardıń na'tiyjesinde A waqıyası  $N_A$  ret, al B waqıyası  $N_B$  ret baqlansın.



Basqa sinaqlarda A waqiyasi da, B waqiyasi da baqlanbag'an bolsin. Biraq  $N_A$  menen  $N_B$  waqiyalarinin' arasında A waqiyasinin' da, B waqiyasinin' da ju'zege bir waqıtta kelgen jag'dayları da bar. Usınday waqiyalardin' sanın  $N_{AB}$  dep belgileyik. Bul na'tiyje eki ret esapqa aling'an (A waqiyasi menen de, B waqiyasi menen de). Sonlıqtan A ha'm B waqiyalarinin' ulıwma sanı

$$N_{A+B} = N_A + N_B - N_{AB}.$$

Bul an'latpadag'ı ten'liktin' eki ta'repin de N ge bo'lsek

$$P(A + B) = P(A) + P(B) - P(AB). \quad (2.7)$$

Bul jerde

$$P(AB) = \frac{N_{AB}}{N} \quad (2.8)$$

arqalı A ha'm B waqiyalarinin' bir waqıtta ju'zege keliw itimallıg'ı belgilengen. Eger  $P(AB) = 0$  sha'rti orınlansa (2.7) an'latpası (2.4) ke o'tedi.

İtimallıqtı kontinuallıq interpretatsiya qılğ'anda (2.7) formula a'piwayı tu'rge keledi. Meyli  $V_1$  ha'm  $V_2$  ko'lemleri kesilisetug'ın bolsın. Kesilisiwden payda bolg'an ko'lemdi  $V_{12}$  dep belgileyik. Onda  $V_1$  ha'm  $V_2$  ko'lemlerin qosıwdan alinatug'ın ko'lem  $V_1 + V_2 - V_{12}$ . Usı ko'lemde bo'leksheni tabıwdın' itimallıg'ı

$$P(V_1 + V_2) = \frac{V_1 + V_2 - V_{12}}{V} = \frac{V_1}{V} + \frac{V_2}{V} - \frac{V_{12}}{V} = P(V_1) + P(V_2) - P(V_{12}).$$

Bul formulada  $P(V_{12})$  arqalı eki ko'lem kesilisen ko'lemdegi bo'leksheni tabıwdın' itimallıg'ı belgilengen.

**SHa'rtli itimallıq.** B waqiyasınan keyin A waqiyasının' sha'rtli tu'rde ju'zege keliw itimallıg'ı *A waqiyasının' ju'zege keliwinin' sha'rtli itimallıg'ı dep ataladı.*

$N_B$  shaması B waqiyası ju'zege kelgen sinaqlar na'tiyjesi sanı bolsın. Bul san ishinde  $N_{AB}$  ret A waqiyası ju'zege kelsin. Onda

$$P_{\frac{A}{B}}^{\frac{\emptyset}{\emptyset}} = \frac{N_{AB}}{N_B}. \quad (2.9)$$

İtimallıqtı kontinual anıqlag'anda

$$P_{\frac{V_1}{V_2}}^{\frac{\emptyset}{\emptyset}} = \frac{V_{12}}{V_2}$$

an'latpasına iye bolgan bolar edik. (2.9) formulasındag'ı ten'liktin' on' jag'ının' alımı menen bo'limin N ge bo'lsek

$$P_{\frac{A}{B}}^{\frac{A}{B}} = \frac{N_{AB}}{N} / \frac{N_B}{N} = \frac{P(AB)}{P(B)}. \quad (2.10)$$

Bul an'latpadag'ı  $P(AB)$  shaması (2.8) ja'rdeminde anıqlang'an  $A$  ha'm  $B$  waqıyalarının' bir waqıtta ju'zege keliw itimallıg'ı bolıp tabıladı.

$$P(AB) = P(B) \times P_{\frac{A}{B}}^{\frac{A}{B}} = P(A) \times P_{\frac{B}{A}}^{\frac{B}{A}} \quad (2.11)$$

tu'rinde ko'shirip jazılğ'an (2.10) formulası *itimallıqlardı ko'beytiw formulası* dep ataladı.

**G'a'rezsiz waqıyalar.** Eger bir waqıyanın' ju'zege keliwi ekinshi waqıyanın' ju'zege keliwine baylanıssız bolsa bunday waqıyalardı g'a'rezsiz waqıyalar dep ataymız. Mısalı  $A$  waqıyası  $B$  waqıyasınan g'a'rezsiz bolsa  $P_{\frac{A}{B}}^{\frac{A}{B}} = P(A)$ . G'a'rezsiz waqıyalar ushın (2.11)

$$P(AB) = P(A) \times P(B) \quad (2.12)$$

tu'rine iye boladı.

**Ko'p waqıyalar ushın itimallıqlardı ko'beytiw formulası.** Bul formula (2.11) formulasınan tikkeley alınadı. Mısalı  $A$ ,  $B$  ha'm  $C$  waqıyalarının' bir waqıtta ju'zege keliw itimallıg'ı

$$P(ABC) = P(AB) \times P_{\frac{C}{AB}}^{\frac{C}{AB}} = P(A) \times P_{\frac{B}{A}}^{\frac{B}{A}} \times P_{\frac{C}{AB}}^{\frac{C}{AB}}. \quad (2.13)$$

Eger waqıyalar g'a'rezsiz bolsa

$$P(ABC) = P(A) \times P(B) \times P(C). \quad (2.14)$$

ten'ligine iye bolamız. Bul ten'lik *u'sh waqıyanın' g'a'rezsizliginin' za'ru'r ha'm jetkilikli sha'rti* bolıp tabıladı.

**Diskret tosattan bolatug'm shamanın' ortasha ma'nisi.** Eger tosattan bolatug'm  $X$  sanı  $x_1, x_2, \dots, x_N$  ma'nislerin qabıl etetug'm bolsa, onda bul shamanın' ortasha ma'nisi

$$\langle x \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i. \quad (2.15)$$

ten'ligi ja'rdeminde anıqlanadı.  $x_i$  shamalarınin' arasında o'z ara ten' keletug'ınları bolıwı mu'mkin. Sonlıqtan (2.15) qosındısının' on' ta'repin tek g'ana ha'r qıylı bolğ'an  $x_i$  shamalarınin' kiriwi ushın toparlarg'a bo'liw kerek.

$$\langle x \rangle = \sum_j \frac{N_j}{N} x_j. \quad (2.16)$$

Bul formuladag'ı  $N = \sum_j N_j$ , sonin' menen birge  $N_j$  shamaları (2.15) tegi birdey  $x_i$  ler sanı.

$P_j = \frac{N_j}{N}$  shaması  $X$  tın'  $x_i$  ma'niske iye bolıw itimallıg'ı bolg'anlıqtan ortasha ma'nisti esaplaw (2.16) formulasın bilayınsha jazamız:

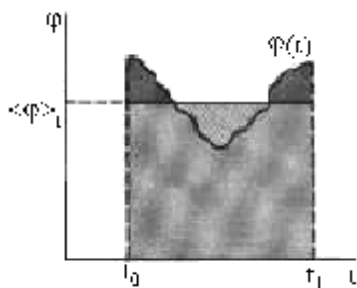
$$\langle x \rangle = \sum_j P_j x_j. \quad (2.17)$$

Bul formula *itimallıqtı esapqa alıp tosattan bolatug'ın shamanı matematikalıq ku'tiwdi* anıqlaydı.

**U'zliksiz o'zgeriwshi shamanın' ortasha ma'nisi.** Ortasha ma'nis (2.15) sa'ykes keliwshi formula tiykarında esaplanıwı kerek. Meyli  $\varphi(t)$  waqıt  $t$  nın' funktsiyası bolsın. Bunday jag'dayda  $t_0$  den  $t_1$  ge shekemgi intervaldag'ı ortasha ma'nis

$$\langle \varphi \rangle = \frac{1}{t_1 - t_0} \int_{t_0}^{t_1} \varphi(t) dt$$

formulası ja'rdeminde anıqlanadı.  $\langle \varphi \rangle$  shamasının' geometriyalıq interpretatsiyası 2-2 su'wrette berilgen.



2-2 su'wret.

Ortasha ma'nistin' geometriyalıq ma'nisi:  $\langle \varphi \rangle$  astındag'ı ha'm  $t_0$  menen  $t_1$  ler arasındag'ı maydan  $\varphi(t)$  arasındag'ı maydang'a ten'.

(2.17) an'latpası tosattan bolatug'ın u'zliksiz o'zgeretug'ın shama ushın bilayınsha ulıwmalaştırıladi:

$$\langle x \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx. \quad (2.18)$$

Bul jerde  $x$  shamasının' tarqalıwının' itimallıg'ının' tıg'ızlıg'ı  $f(x)$  arqalı belgilengen.

**Dispersiya.** SHamanın' ortasha ma'nisi a'tirapındag'ı shashılıwı *dispersiya* menen ta'riplenedi. Dispersiya qarap atırılğ'an shamanın' ortasha ma'nisinen awısıwının' kvadratı menen anıqlanadı ha'm to'mendegi formula menen beriledi:

$$\sigma^2 = \langle (x - \langle x \rangle)^2 \rangle = \langle [x^2 - 2x\langle x \rangle + (\langle x \rangle)^2] \rangle = \langle x^2 \rangle - (\langle x \rangle)^2. \quad (2.19a)$$

Dispersiyadan aling'an kvadrat koren *standart* yamasa *ortasha kvadratlıq awısıw* dep ataladı.

(2.17) ha'm (2.18) formulalar ja'rdeminde (2.19a) an'lapasi birqansha toliq jazilwı mu'mkin. Solardın' ishinde

a) diskret tosattan bolatug'in shama ushın

$$\sigma^2 = \dot{\mathbf{a}}_j (x_j - \langle x \rangle)^2 P_j ; \quad (2.19b)$$

b) u'zliksiz o'zgeretug'in tosattan bolatug'in shama ushın:

$$\sigma^2 = \dot{\mathbf{0}}_{-Y}^{+Y} (x_j - \langle x \rangle)^2 f(x) dx . \quad (2.19b)$$

**İtimallıqtın' bo'listiriliw formulası.** Tosattan bolatug'in  $x$  shamasının' bazı bir  $x_0$  shamasınan kishi bolıw itimallıg'ı (Yag'nıy  $x < x_0$ ):

$$P(x < x_0) = F(x_0) = \dot{\mathbf{a}}_{x_j < x_0} P_j . \quad (2.20)$$

(2.20) ja'rdeminde anıqlang'an  $F(x_0)$  funktsiyası itimallıqtın' bo'listiriliw funktsiyası dep ataladı. U'zliksiz o'zgeretug'in shama ushın  $F(x_0)$  itimallıq tıg'ızlıg'ı menen to'mendegidey formula boyınsha baylanısqa:

$$F(x_0) = \dot{\mathbf{a}}_{-Y}^{x_0} f(x) dx . \quad (2.21)$$

(2.21) den

$$f(x) = dF(x) / dx \quad (2.22)$$

ekenligi kelip shıg'adı. Bul formulannın' ja'rdeminde  $f(x) dx$  kiretug'in an'latpalar  $dF(x) = f(x) dx$  ten'ligin esapqa alg'an halda basqasha ko'shirilip jazılwı mu'mkin. Mısalı (2.18)-formula bılay ko'rsetiledi:

$$\langle x \rangle = \dot{\mathbf{0}}_{-Y}^{+Y} x dF(x) . \quad (2.23)$$

Sunday-aq (2.20) menen (2.21) di esapqa alıp tosattan bolatug'in  $x$  shamasının'  $x_1 < x < x_2$  intervalında bolıw itimallıg'ı

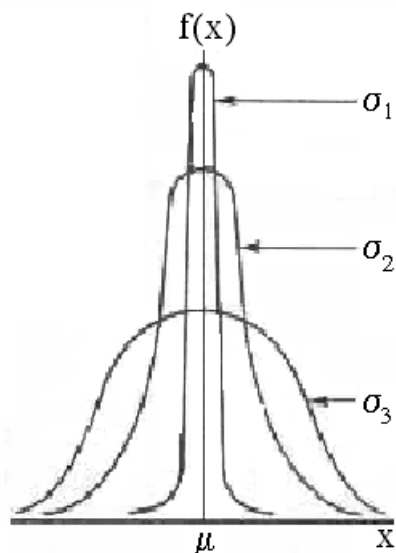
$$P(x_1 < x < x_2) = \dot{\mathbf{0}}_{x_1}^{x_2} f(x) dx = \dot{\mathbf{0}}_{x_1}^{x_2} dF(x) = F(x_2) - F(x_1) \quad (2.24)$$

formulası menen esaplanadı.

**Gauss bo'listiriliwi.** Meyli dekart koordinatalar sistemasında  $O$  noqatınan adımlap noqat shıqsın. Ha'r bir adım barlıq bag'ıtlar boyınsha ten'dey itimallıqta, al adımnın' shaması ıqtıyarlı

nızam boyınsha bo'listirilgen bolsın. Adımlar bir birine g'a'rezli emes. Jetkilikli da'rejede u'lken sandag'ı adımlardan keyin noqatlardıń koordinatalarınıń bo'listiriliwi qanday boladı dep soraw beriledi.

Barlıq bag'ıtlardıń ekvivalent ekenligi tu'sinikli, al noqattıń  $X$  ha'm  $Y$  ko'sherleri bag'ıtındag'ı awısıwları bir birinen g'a'rezsiz. Noqattıń  $X$  ko'sherinin' on' ha'm teris bag'ıtları boyınsha birdey itimallıqta ekenligine baylanışlı noqat tıń  $x$  koordinatasın iyelew itimallıg'ının' tıg'ızlıg'ı  $x^2$  qa baylanışlı boladı, Yag'niy  $\varphi(x^2)$  qa ten'. Usıg'an sa'ykes  $Y$  koordinatası ushın  $\varphi(y^2)$ . Al  $(x, y)$  koordinatalarına iye  $dS = dx dy$  maydanı elementinde jaylasıw itimallıg'ı:



2-3-su'wret. Gauss bo'listiriliwinin' tu'rinin' dispersiyag'a baylanışlı o'zgeriwi

$$dP = \varphi(x^2) \varphi(y^2) dS \quad (2.25)$$

Endi koordinata sistemasın  $X'$  ko'sheri usı maydansha arqalı o'tetug'ınday etip buramız. Bul koordinatalar sistemasında

$$dP = \varphi(x'^2) dS. \quad (2.26)$$

Bul shamanın' (2.25) tegi shama menen bir ekenligi tu'sinikli. Sonlıqtan

$$\varphi(x^2) \varphi(y^2) = \varphi(x'^2) = \varphi(x^2 + y^2)$$

$\varphi$  funksiya'sının' tu'rin anıqlaw ushın kerek bolg'an funktsionallıq ten'leme. Bul ten'leme  $x$  penen  $y$  tin' qa'legen ıqtıyarlı o'zgerisleri ushın durıs bolıwı kerek. An'latpanın' eki ta'repin de logarifmleymiz ha'm olardıń differentsialların tabamız:

$$\frac{\varphi'(x^2)}{\varphi(x^2)} 2x dx + \frac{\varphi'(y^2)}{\varphi(y^2)} 2y dy = \frac{\varphi'(x^2 + y^2)}{\varphi(x^2 + y^2)} (2x dx + 2y dy)$$

yamasa

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{\varphi'(x^2)}{\varphi(x^2)} - \frac{\varphi'(x^2 + y^2)}{\varphi(x^2 + y^2)} \right) dx + \frac{d}{dy} \left( \frac{\varphi'(y^2)}{\varphi(y^2)} - \frac{\varphi'(x^2 + y^2)}{\varphi(x^2 + y^2)} \right) dy = 0.$$

Bunnan differentsiallardın' bir birinen g'a'rezsizliginen

$$\frac{\varphi'(x^2)}{\varphi(x^2)} - \frac{\varphi'(x^2 + y^2)}{\varphi(x^2 + y^2)} = 0,$$

$$\frac{\varphi'(y^2)}{\varphi(y^2)} - \frac{\varphi'(x^2 + y^2)}{\varphi(x^2 + y^2)} = 0$$

ekenligi kelip shıg'adı. Onda

$$\frac{\varphi'(x^2)}{\varphi(x^2)} = \frac{\varphi'(y^2)}{\varphi(y^2)}$$

ten'ligi orınlanadı eken. Olay bolsa

$$\frac{\varphi'(x^2)}{\varphi(x^2)} = \frac{\varphi'(y^2)}{\varphi(y^2)} = \pm \alpha. \quad (2.27)$$

Bul ten'lemeni integrallap

$$\varphi(x^2) = A \times e^{\pm \alpha x^2}, \quad \varphi(y^2) = A \times e^{\pm \alpha y^2} \quad (2.28)$$

ekenligine isenemiz.

«+» belgige iye funksiya biz qarap atırǵ'an jag'daylar ushın durıs kelmeydi, sebebi bul jag'dayda eksponentanın' sheksiz o'siwi (oraydan qashıqlag'an sayın itimallıq tıǵ'ızlıǵ'ının' o'siwi) orın aladı.

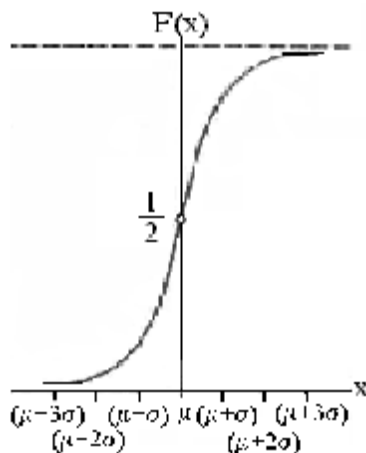
İtimallıqlar tıǵ'ızlıǵ'ının' bo'listiriliwi bolǵ'an  $\varphi(x^2) = A \times e^{\pm \alpha x^2}$  funksiya **Gauss bo'listiriliwi** dep ataladı.

x boyınsha bo'listiriliwdi qaraymız. (2.28) boyınsha bo'listiriw maksimumı  $x = 0$  noqatına tuwrı keledi. Eger bul maksimum  $x = \mu$  noqatına tuwrı keletug'ın bolsa, onda

$$f(x) = B e^{-\alpha(x-\mu)^2}. \quad (2.29)$$

formulasına iye bolamız.  $\int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-x^2) dx = \sqrt{\pi}$  ekenligin esapqa alıp, normirovka sha'rtinen

$$1 = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = B \int_{-\infty}^{+\infty} \exp[-\alpha(x-\mu)^2] dx = \frac{B}{\sqrt{\alpha}} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-\xi^2) d\xi = B \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}}.$$



2-4-su'wret.

Gauss itimallıqlar funktsiyasının' bo'listiriliwi

Demek  $B = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}}$ . Sonliqtan

$$f(x) = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \exp\left[-\alpha(x - \mu)^2\right].$$

Endi x shamasının' ortasha ma'nisi menen  $\sigma^2$  dispersiyani esaplaymiz:

$$\langle x \rangle = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} x \exp\left[-\alpha(x - \mu)^2\right] dx = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} (\xi + \mu) \exp(-\alpha\xi^2) d\xi = \mu.$$

$$\sigma^2 = \langle (x - \mu)^2 \rangle = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} (\xi - \mu) \exp\left[-\alpha(\xi - \mu)^2\right] dx = \frac{1}{2\alpha}.$$

Demek  $\alpha = \frac{1}{2\sigma^2}$  ha'm itimallıqtın' bo'listiriliwinin' tıg'izlig'ı standart formada bilay jazıladı:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(x - \mu)^2}{\sigma^2}\right] \quad (2.30)$$

(2.21) ge sa'ykes itimallıqtın' bo'listiriliw funktsiyası [(2.21) ge sa'ykes]

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(x - \mu)^2}{\sigma^2}\right] dx. \quad (2.31)$$

tu'rine iye boladı. Bul funktsiya bo'listiriliwdin' **Gauss** yamasa **normal nızamı** dep ataladı.

$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$  dep belgilep

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp\left(-z^2/2\right) dz \quad (2.32)$$

**bo'listiriliwdin' standart normal nızamı formulasın** alamız.

Ko'p bo'lekshelerden turatug'in sistemani dinamikaliq ta'riplewdin' mu'mkin emes ekenligi sebepli onin' mikrohalin baqlaw mu'mkin emes. Qala berse mikrohallardin' o'zgerisin baqlap barıw da mu'mkin emes. Usı mikrohallardin' bar ekenligin ha'm olardin' o'zgeretug'inlig'in qalay da'lillewge boladı? Biz ayırım bo'lekshenin' halin ta'ripleytug'in ha'rqiylı parametrlerdi o'lsheymiz ha'm usı bo'lekshenin' sistema menen ta'sirlesiwın baqlay alamız. Usınnan bo'leksheler sistemasının' mikrohalı ha'm bul mikrorhaldın' o'zgeriwi haqqında juwmaq shıg'aramız.

Sorawlar:

İtimallıqtın' anıqlamasın berin'iz.

Waqıyalar jıynag'ının' qanday qa'siyti itimallıqtı normiravkalaw mu'mkinshiligin beredi?

Ulıwma jag'daylarda itimallıqlardı qosıw formulası menen bir birin biykarlaytug'in waqıyalar formulasınan ayıratug'in shamanın' ma'nisi neden ibarat?

SHamanın' ortasha ma'nisi ortashalaw alınıp atırg'an o'zgeriwshinin' ma'nisine g'a'rezli me? Usı juwaptı tastıyıqlaytug'in misallar keltirin'iz.

### 3-§. Sistemalardıń makroskopiyalıq ha'm mikroskopiyalıq halları

Sistemalardıń makroskopiyalıq ha'm mikroskopiyalıq halları. Ten' salmaqlıq hal.  
Sistemalardıń statistikalıq ansamblı. Mikrokanonik ansambl.

**Anıqlamalar.** *Ken'isliktin' sheklengen oblastına jaylasqan izertlenetug'in fizikalıq ob'ektlerdin' jıynag'ı sistema* dep ataladı. Sistema shegarası materiallıq dene (misalı ıdıstın' diywalı) bolıwı da, sonın' menen birge oylap tabılǵ'an ken'islikte ju'rgizilgen shegaralar bolıwı da mu'mkin. SHegara qozg'almaytug'in da, qozg'alatug'in da boladı. Sonın' menen birge shegara zatlardı yaki energıyanı o'tkizetug'in yamasa o'tkizbeytug'in da boladı.

Sistema shegarası menen birge usı sistemag'a kiriwshi zatlardın' fizikalıq ha'm ximiyalıq qa'siyetlerine de ta'riplenedi. U'yreniw baslanatug'in en' birinshi sistema ideal gaz bolıp tabıladı (ideal gaz ushın anıqlama 1-paragrafta berilgen).

**Makroskopiyalıq hal.** Meyli bazı bir V ko'leminde ideal gaz bolsın (salıp qoyılsın). Gaz molekularının' ıdıǵı diywalına urılıwı absolyut serpimli bolsın, al urılıwdın' saldarınan ıdıstın' diywalları o'zgeriske ushıramaydı dep esaplayıq (ıdıstın' massası u'lken bolǵ'an jag'day). Solay etip V ko'lemindegi ideal gaz usı ko'lemnin' sırtındag'ı materiallıq deneler menen energiya almaspaydı, Yag'niy izolyatsiyalang'an bolıp tabılardı. Usınday sha'rtler orınlang'anda ıdıstıg'ı gaz sırttan bolatug'in ta'sirlerden izolyatsiyalang'an bolıp esaplanadı. Al ıdıstın' ishinde ne bolsa da, ishki sebeplerdin' na'tiyjesinde a'melge asadı.

Jetkilikli waqıt o'tkennen keyin gazdın' halı statsionar halg'a keledi ha'm bul hal waqıttın' o'tiwi menen o'zgermeydi. Bul tastıyıqlawda «jetkilikli waqıt o'tkennen keyin» ha'm «gazdın' halı statsionar boladı» so'zleri ele anıq emes aytlıg'an. Da'l anıqlama keyinirek beriledi.

«Jetkilikli waqıt o'tkennen keyin» waqıtı degenimizde basımlar menen temperaturalar ten'lesetug'in waqıttı tu'sinemiz. Bul waqıt ko'shiw qubılısların u'yreniwdin' na'tiyjesinde



bahalanıwı mu'mkin. Ha'zirshe ten'lesiw ses tezligi  $v_{\text{ses}}$  menen boladı dep qabıl etemiz. Eger  $l$  ıdın' sızıqlı o'lishemleri bolatug'ın bolg'an jag'dayda basımlardıń ten'lesetug'ın waqtı shama menen  $\frac{l}{v_{\text{ses}}}$  ke ten'. Uzunlıg'ı 1 m ge ten' ıdıs ushın  $3 \cdot 10^{-3}$  sekundtı quraydı. Eger u'yrenshikli makroskopiyalıq sezimler tiykarında aytsaq bul waqt ju'da' kishi waqt. Al mikroskopiyalıq qubılıslar ko'z-qarasınan bul u'lken waqt. Mısalı, normal jag'daylarda 1 molekula 1 sekund waqt ishinde shama menen  $10^9$  ret basqa molekular menen soqlıg'ısadı. Demek  $3 \cdot 10^{-3}$  sekund ishinde molekula millionlag'an ret soqlıg'ısıwılarg'a ushıraydı. ***Basım, temperaturası ha'm ko'lemi menen ta'riplenetug'ın gazdın' halı makroskopiyalıq hal dep ataladı.***

***Basım, temperatura ha'm ko'lem sistemanın' makroskopiyalıq halın ta'ripleytug'ın makroskopiyalıq parametrlerge mısallar bolıp tabıladı. Bunday parametrlar ishki ha'm sırtqı parametrlar bolıwı mu'mkin. Ishki parametrlar dep sistemanın' fizikalıq ob'ektleri ta'repinen anıqlanatug'ın parametrlerge aytamız. Al sırtqı parametrlar sistema quramına kirmeytug'ın fizikalıq ob'ektler ta'repinen anıqlanadı.***

Bir shama jag'daylarg'a baylanıslı bir waqıtta ha'm ishki ha'm sırtqı parametr bolıwı mu'mkin.

**Mikroskopiyalıq hal.** Gazdı qurawshı bo'lekshelerdi  $i = 1, 2, \dots, n$  dep belgileyik. Demek gaz  $n$  dana bo'leksheden turadı. Bul san ju'da' u'lken. Eger ko'lem  $l^3 = 1 \text{ sm}^3$  bolsa  $n = 2,7 \cdot 10^{19}$  bo'lekshige iye bolamız. ***Barlıq bo'lekshelerinin' iyelegen orınları (koordinataları) ha'm tezlikleri menen ta'riplenetug'ın gazdın' halı mikroskopiyalıq hal dep ataladı.***

***Demek gazdın' mikroskopiyalıq halı  $6n$  san menen ta'riplenedi: barlıq bo'lekshelerdin'  $fn$  dana  $(x_i, y_i, z_i)$  koordinataları ha'm olardıń tezliklerinin'  $3n$  proektsiyaları  $(v_{xi}, v_{yi}, v_{zi})$ . bul sanlardı tosattan bolatug'ın sanlar dep qaraw kerek.***

Joqarıda ayılğ'anlar gazdın' mikroskopiyalıq halın tek statistikalıq jaqtan ta'riplewdin' kerek ekenligin bildiredi.

**Ten'salmaqlıq hal.** Sırtqı ortalıqtan bo'lip alıng'an (izolyatsiyalang'an) ko'lemi  $V$  bolg'an gazdın' statsionar makroskopiyalıq halı ten'salmaqlıq hal dep ataladı. Usınday halda onın' makroskopiyalıq ta'riplemeleri - basım, temperatura, ko'lem waqtın' o'tiwi menen o'zlerinin' ma'nislerin turaqlı etip saqlaydı. Sonın' menen birge ko'lemnin' barlıq noqatlarında basım menen temperaturı turaqlı ma'nislerine iye boladı.

***Ten'salmaqlıq halg'a anıqlama bergende sistemanın' izolyatsiyalang'anlıg'ı a'hmiyetke iye. Eger sistema izolyatsiyalang'an bolmasa ten'salmaqlıq emes statsionar hallardıń bolıwı mu'mkin.***

Mısalı gaz jaylasqan ıdıs diywalınnın' ha'r qıylı bo'limleri sırtqı dereklerin' ja'rdeminde ha'r qıylı, biraq turaqlı temperaturalarda uslap turılıwı mu'mkin. Bunday jag'dayda gazde waqtqa baylanıslı o'zgermeytug'ın statsionar hal payda qaliplesedi. Biraq bul hal ten' salmaqlı emes: ıdıs ishinin' barlıq noqatlarında basım birdey, biraq temperaturanın' ma'nisi ha'r qıylı.

**Sistemalardıń statistikalıq ansambli.**

***Ishindegi bo'leksheleri menen birge ıdıs statistikalıq sistema dep ataladı.***

***Birdey bolg'an statistikalıq sistemalardıń jıynag'ı statistikalıq ansambl dep***

*ataladı.*

*Bir makroskopiyaq hal ansambldin' ha'r qıylı mikroskopiyaq hallarında turg'an ko'p sanlı sistemalarında ju'z beredi.*

**Mikrokanonik ansambl.** *Birdey energiyag'a iye izolyatsiyalang'an ha'm o'z-ara birdey bolg'an sistemalar mikrokanonik ansambl dep ataladı.* Statistikalıq fizikada mikrokanonik ansamblden basqa kanonik ansambller de u'yreniledi. Ansambller usılı statistikalıq fizikag'a 1902-jılı Amerika fizigi Gibbs (1839-1903) ta'repinen kirgizildi.

**Sistema izolyatsiyalang'an bolmasa ten' salmaqlıq emes bolg'an statsionar hallardın' bolıwı mu'mkin.**

**Mikrokanonik ansambl dep birdey energiyag'a iye bolg'an izolyatsiyalang'an sistemaların' birdey jıynag'ına aytamız.**

Sorawlar: Gazdegi basımın' ten'lesiwi ushın kerek bolatug'ın waqıttın' shamasın qalay anıqlawg'a boladı?

Gazdin' makroskopiyaq ha'm mikroskopiyaq halları qanday shamalar menen ta'riplenedi?

Makro- ha'm mikrohallar arasında qanday ulıwmalıq qatnaslar bar?

#### **4-§. Birdey itimallıqlar postuladı ha'm ergodik gipoteza**

Ten'dey itimallıqlar postuladı. Ansambl boyınsha ortasha ma'nislerdi esaplaw. Ergodik gipoteza.

**Mikrohollar arasındag'ı ayırma.** Bir makrohalda turıp sistema o'zinin' mikroholların o'zgerledi. Mikrohollar bo'lekshelerdin' u'zliksiz o'zgeretug'ın koordinataları menen tezlikleri ja'rdeminde ta'riplenitug'ın bolg'anlıqtan soraw payda boladı: mikroholların' o'zgermey qalıwı ushın bul shamalar qanshag'a o'zgeriwi kerek? «Sistema berilgen halda turıptı» so'zi tek bir waqıt momentine tiyisli, waqıt boyınsha uzınlıqqa iye bolmasa, o'tken ma'ha'l menen kelesi ma'ha'ldi ayırıp turatug'ın «Sistema berilgen halda turıptı» so'zi neni an'g'artıwı mu'mkin?

Atomlar menen molekulların' belgili bir o'lshemlerge iye bolatug'ınlig'ı jaqsı belgili. Olardıń diametri  $\sim 10^{-8} \text{ sm} = 10^{-10} \text{ m}$ . Demek molekula yamasa atom  $d^3 \sim 10^{-24} \text{ sm}^3$  ko'lemde iyeleydi. «Ko'lemde iyeleydi» so'zi eger usı ko'lem bir molekula menen iyelengen bolsa, onda basqa molekula menen iyeleniwi mu'mkin emesligin an'g'artadı. Demek bo'lekshe o'zinin' **ko'lemdegi awhalın** o'zgertti degen so'z bo'lekshenin' iyelegen bir ko'lemde taslap, ekinshi ko'lemge o'tkenliginen derek beredi. Usınday ko'z-qarasta barlıq ko'lem bo'leksheler menen iyelengen ko'lemi  $d^3$  bolg'an ko'lemlerge bo'lingen tu'rinde qabıl etiliwi kerek. Bo'lekshelerdin' qozg'alısı bir qutışadan ekinshi qutışig'a sekiriw menen o'tiwlerden turadı. Ha'r bir qutışada bo'lekshe shama menen  $d/v$  waqıt intervalı dawamında turadı ( $v$  arqalı bo'lekshenin' tezligi belgilengen).

Endi mikroholları bo'lekshelerdin' awhalları arqalı ayırıwg'a boladı. Ko'lemdegi awhal boyınsha mikrohal pu'tkil ko'lemde bo'liwden payda bolg'an qutışılar boyınsha bo'lekshelerdin' bo'listiriliwi menen ta'riplenedi. bo'lekshenin' bir qutıdan ekinshi qutıg'a

o'tiwleri sistemanın' mikrohollarının' o'zgeriwinin' ma'nisin beredi. Usınday ko'z-qarastan paydalanıw ushın gazdin' bo'lekshesi haqıyqatında da d o'lshe mine iye dep qaraw talap etilmeydi. Buring'ısınsha ideal gazdin' molekulları nollik geometriyalıq o'lshe mlerge iye, biraq qozg'alis nızamları boyınsha ha'r bir qutışhada tek bir bo'lekshe bola aladı dep esaplaw mu'mkin. Endigiden bılay ideal gaz boyınsha tap usınday pikirde bolamız.

Joqarıda aytilg'anınday  $1 \text{ sm}^3$  ko'lemde barlıg'ı bolıp  $N = 1/d^3 \approx 10^{24}$  qutışha bolıwı kerek. Normal atmosfera basımında  $1 \text{ sm}^3$  ko'lemde  $n = 2.7 \cdot 10^{19}$  bo'lekshe jaylasadı. Sonlıqtan a'dettegi jag'daylarda bir bo'lekshenge  $N/n \approx 4 \cdot 10^4$  qutışha sa'ykes keledi. Demek qutışhalardın' basım ko'pshiligi bos, tek ayırım qutışhalar g'ana bo'leksheler menen iyelengen bolıp shıg'adı. Eger qutışhalardı kublarg'a jıynaytug'ın bolsaq  $1$  bo'lekshe  $40\,000$  qutışha jaylasqan kubta jaylasadı. Usınday kubtın' qabirg'ası boyınsha  $30$  qutışha jaylasadı. Bul aling'an sanlar iyelengen qutışhalar arasındag'ı ortasha qashıqlıq qutışhanın' sıızıqlı o'lshe mlerinen  $30$  ese ko'p degendi bildiredi.

Endi mikroholları bir birinen tezlikler boyınsha ayırıwdın' usılın tabıwımız kerek.

Bo'lekshenin' qozg'alis halı o'zgerdi dep esaplawg'a bolatug'ın tezliktin' o'zgerisin tabıw ma'selesine kelip sog'amız. Basqa so'z benen aytqanda koordinata sıyaqlı tezlikler ushın da «tezlikler» qutışhaların payda etiwimiz kerek. Klassikalıq teoriya bul ma'seleni sheshe almadı. Ma'sele tek kvant mexanikasının' payda bolıwı menen sheshildi.

Kvant mexanikası en' aldı menen bo'lekshenin' ken'islikte qanday da bir ko'lemde, sonday-aq tezlikler boyınsha da «ko'lem» di iyelemeytug'inlıg'ı ko'rsetti. Bo'lekshenin' ken'islik boyınsha ha'm tezlikler boyınsha ta'riplemeleri o'z-ara baylanısqan ha'm olardı bir birinen ayırıw mu'mkin emes. Bo'lekshenin' qozg'alis onın' tezligi  $v$  menen emes, al impulsı  $r$  ja'rdeminde anıqlanadı. Bir bo'lekshe ta'repinen iyeleniwi mu'mkin bolg'an qutışha koordinatalar yamasa impulsar ken'isliginde emes, al fazalıq ken'islik dep atalatug'ın koordinatalar-impulsar ken'isliginde anıqlanadı. Bir bo'lekshe ta'repinen iyelenetug'ın fazalıq ken'isliktegi qutışhanın' ko'lemi

$$(\Delta x \Delta y \Delta z)_0 (\Delta p_x \Delta p_y \Delta p_z)_0 = (2\pi\hbar)^3. \quad (4-1)$$

Bul jerde  $\hbar = 1,0545887(57) \times 10^{-34}$  Dj\*s Plank turaqlısı bolıp tabıladı.

**Ten'dey itimallıqlar postuladı.** Mirokanonik ansambldin' ha'r bir sistemasına kiriwshi bo'leksheler nomerlengen dep esaplanadı. Sonday-aq bo'leksheler jaylasatug'ın qutışhalar da nomerlengen bolıwı mu'mkin. Bazı bir waqıt momentinde bazı bir bo'lekshe ansambldin' ha'rqanday sistemalarında, ha'r qıylı qutışhalarda boladı. Eger baslang'ış waqıt momentinen baslap bir qansha waqıt o'tse, sistemalar o'zlerinin' da'slepki halların «umıtqan» bolsa, berilgen waqıt momentindegi bo'lekshe jaylasqan qutışha tosattan bolg'an qutışha bolıp tabıladı. Qarap atırılğ'an bo'lekshe ushın qanday da bir ayqın qutışhada jaylasıwg'a tiykar joq. Barlıq qutışhalar da birdey bahag'a iye ha'm bo'lekshenin' alg'an orınları birdey huqıqlı. Eger ansambl ju'da' u'lken  $N_a$  sistemalarğa iye bolsa, qarap atırılğ'an bo'lekshe 1-qutışhada bolatug'ın sistemalar sanı bo'lekshe 2-qutışhada bolatug'ın sistemalar sanına ten' ha'm tag'ı so'z benen aytqanda berilgen bo'lekshe ushın barlıq awhallar birdey itimallıqqa iye. Mikrohal sistemag'a kiriwshi barlıq  $n$  bo'lekshenin' jaylasıwları menen ta'riplenedi (Yag'niy ko'lem bo'lingen barlıq qutışhalar boyınsha bo'lekshelerdin' jaylasıwları menen ta'riplenedi).

*Ha'r bir bo'lekshe ushin ba'rshe qutishalar birdey mu'mkin bolg'anliqtan bo'lekshelerdin' qutishalar boyinsha barliq bo'listiriwleri birdey mu'mkinlikke iye. Bul barliq mikrohallardin' birdey itimal ekenligin bildiredi. Bul ten'dey itimallıqlar postulati dep ataladi.*

Jogarida keltirilgen misallar ten'dey itimallıqlar postulatinın' da'lili bola almaydı. Sonlıqtan bul tek postulat bolıp tabıladı.

**Ansambl boyinsha ortasha ma'nislerdi esaplaw.** Ayqın bo'lekshe menen baylanısqa bazı bir shama bolg'an onın' koordinatasın' kvadratin alayıq. Koordinatalar sistemasın' jaylasıwı ıqtıyarlı bolıwı mu'mkin. Biraq sistema ansambldin' barlıq sistemalarına salıstırğ'anda birdey bolıwı kerek. Statistikalıq ansambldin' i - sistemasındag'ı bo'lekshenin' koordinataların i indeksi menen nomerleyemiz. Bunday jag'dayda shamanın' ortasha ma'nisinin' anıqlaması boyınsha iye bolamız:

$$\langle x^2 \rangle_a = \frac{1}{N_a} \dot{\mathbf{a}} \sum_{i=1}^{N_a} x_i^2. \quad (4-2)$$

Bul ten'likte a indeksi esaplanıp atırğ'an shamanın' ma'nisin ansambl boyinsha ortasha ma'nis ekenligin bildiredi.  $N_a$  arqalı ansambldegi sistemalar sanı,  $x_i$  arqalı i - sistemadag'ı bo'lekshenin' koordinatası belgilengen. Ansambldin' ha'r bir sistemasındag'ı qutishalar sanı  $N \sim 10^{24}$ , al ansambldegi sistemalar sanı  $N_a$  bul sannan a'dewir u'lken dep esaplanadı ( $N_a \gg N$ ). Sonlıqtan bo'lekshe j - qutishada jaylasatug'ın sistemalar sanı ko'p dep esaplaw mu'mkin. Meyli bul san  $N_{aj}$  bolsın. Onda (2.1) ge sa'ykes bo'leksheni j - qutishada tabıwdın' itimallıg'ı

$$P_j = \frac{N_{aj}}{N_a}. \quad (4-3)$$

Ha'r qanday sistemalarda turg'an bir qutishag'a tiyisli ag'zalarđı toparlastırw maqsetinde (4-2) an'latpasın tu'rlendiremiz. Ansambldin'  $N_{aj}$  sistemasındag'ı j - qutishada bo'lekshe jaylasatug'ın bolg'anlıqtan

$$\dot{\mathbf{a}} \sum_{i=1}^{N_a} x_i^2 = \dot{\mathbf{a}} \sum_{j=1}^N N_{aj} x_j^2. \quad (4-4)$$

Bul jerde  $x_j$  arqalı j - qutishanın' x koordinatası,  $N_{aj}$  arqalı j - qutisha bo'lekshe menen iyelengen ansambldegi sistemalar sanı, N arqalı statistikalıq ansambldin' ha'r bir sistemasındag'ı qutishalar sanı belgilengen.

(4-4) penen (4-3) ti esapqa alg'anda (4-2) an'latpası

$$\langle x^2 \rangle_a = \frac{1}{N_a} \dot{\mathbf{a}} \sum_{j=1}^N N_{aj} x_j^2 = \dot{\mathbf{a}} \sum_{j=1}^N P_j x_j^2 \quad (4-5)$$

tu'rine keledi. Bul jerde de  $x_j$  arqalı j - qutishanın' x koordinatası,  $P_j$  arqalı bo'lekshenin' usı qutishada jaylasıw itimallıg'ı belgilengen. Bul formula tosattan bolatug'ın shamanın'

matematikalıq ku'tiliwin ta'ripleytug'ın (2.17)-formulag'a sa'ykes keledi. Onın' on' ta'repinde sistemalar ansambli haqqında tikkeley hesh na'rse joq.

**Waqıt boyınsha ortasha shamalardı esaplaw.** Anıqlama boyınsha waqıt boyınsha ortasha ma'nis

$$\langle x^2 \rangle_t = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \dot{\mathbf{0}} x^2(t) dt. \quad (4-6)$$

Bo'lekshenin' bir qutishadan ekinshi qutishag'a izbe-iz sekiriwlerin i indeksi ja'rdeminde belgileyimiz. i - sekiriwden keyin bo'lekshe o'tetug'ın qutishanın' koordinatasın  $x_i$  arqalı belgileyik.  $\Delta t_i$  arqalı usı qutishada bo'lekshenin' turıw waqtı belgilengen bolsın. Usı ayılğ'anlardan (4-6) integralın bılay tu'rlandiriw mu'mkin:

$$\int_0^T \dot{\mathbf{0}} x^2(t) dt = \sum_{i=1}^m \dot{\mathbf{a}} x_i^2 \Delta t_i. \quad (4-7a)$$

Bul an'latpada T waqtı ishindegi sekiriwler sanı m arqalı belgilengen.

$$\sum_{i=1}^m \dot{\mathbf{a}} \Delta t_i = T. \quad (4-7b)$$

$T \in \mathbb{Y}$  de bo'lekshe ha'r bir qutishag'a ko'p ret tap boladı. Sonlıqtan T waqtı ishinde j - qutishada

$$T_j = \dot{\mathbf{a}} \Delta t_i \quad (4-8)$$

waqıt dawamında boladı. Bul jerde summa sa'ykes j - qutishadag'ı barlıq i boyınsha esaplanadı.

(4-8) di esapqa alg'anda (4-7b) to'mendegidey tu'rge iye boladı:

$$T = \sum_{j=1}^N \dot{\mathbf{a}} T_j. \quad (4-9)$$

(4-6) nı (4-7a.b) menen (4-8) di esapqa alıp bılayınsha ko'shirip jazamız:

$$\langle x^2 \rangle_t = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{j=1}^N \dot{\mathbf{a}} T_j x_j^2 = \sum_j \dot{\mathbf{a}} \tilde{P}_j x_j^2. \quad (4-10)$$

Bul formulada

$$\tilde{P}_j = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{T_j}{T}. \quad (4-11)$$

Bul an'latpa barlıq waqıtqa salıstırǵ'andag'ı bo'lekshenin'  $j$  - qutıshada turıw waqtın beredi. (2.2v) dag'ı itimallıqqa berilgen anıqlama boyınsha  $\tilde{P}_j$  arqalı bo'lekshenin'  $j$  - qutıshada bolıw itimallıǵ'ı belgilengen.

**Ergodik gipoteza.** (4-11) itimallıǵ'ı (4-3) itimallıǵ'ına ten' be degen soraw beriledi. Joqarıda keltirilgen talqılawlar bul sorawǵ'a juwap bere almaydı. Biraq intuitsiya ja'rdeminde «ten'» dep juwap beriwge boladı. Demek

$$\tilde{P}_j = P_j$$

dep tastıyıqlaw *ergodik gipoteza* dep ataladı. (4-10), (4-5) ha'm (4-12) tiykarında

$$\langle x^2 \rangle_a = \langle x^2 \rangle_t \quad (4-13)$$

dep ergodik gipotezanı basqasha jazamız.

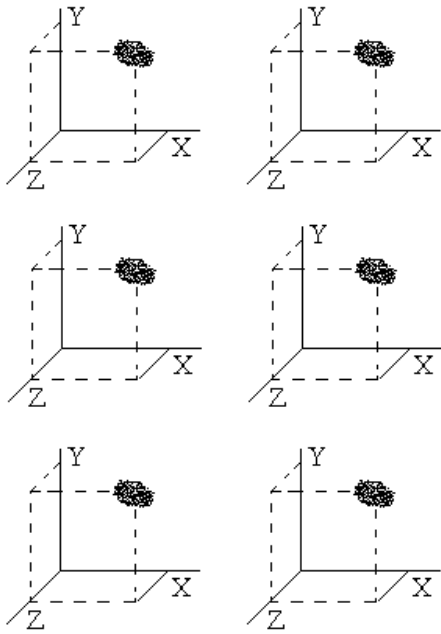
*Demek ansambl boyınsha ortasha (shama) waqt boyınsha ortashag'a (shamag'a) ten'. Ulıwma jag'day ushın bul jag'day usı waqıtlarg'a shekem da'llilenbegen. Bul gipoteza statistikalıq fizikanın' en' tiykarg'ı boljawlarının' biri bolıp sanaladı.*

Bul gipoteza birinshi ret 1871-jılı L.Boltsman (1844-1906) ta'repinen usınıldı. Keyin Dj.Maksvell 1879-jılı waqt boyınsha ortasha shamalardıń ansambl boyınsha ortasha shamalar menen almasırıwdı talqıladı.

Barlıq bo'leksheler o'zlerinin' ishki xarakteristikaları boyınsha birdey bolsa da bo'leksheler sistemasında waqıttın' ha'r bir momentinde belgili bir «ierarxiya» (mısal retinde ierarxiya dep to'mengi da'rejelilerdin' joqarı da'rejililerge bag'ınıw ta'rtibine aytamız) orın aladı. Biraq jetkilikli u'lken waqt ishinde barlıq bo'leksheler sol «irarxiyalıq baspaldaqtın' barlıq tekshelerinde» bolıp shıǵ'adı. Qala berse ha'r barlıq bo'leksheler de sol tekshelerdin' ha'r birinde ortasha birdey waqt aralıǵ'ında boladı.

Ten' itimallıqlar postuladı dep ha'r qıylı mikrohollar birdey itimallıqqa iye boladı dep tastıyıqlawǵ'a aytamız. Ha'r qıylı makroholların' itimallıǵ'ı bir birinen keskin tu'rde ayrılardı.

**Ergodik gipoteza ten' salmaqlıq halda ansambl boyınsha ortasha shama waqt boyınsha alıng'an ortasha shamag'a ten' dep tastıyıqlaydı.**



2-5 su'wret.

Statistikalıq ansambl

## § 5. Makrohalar itimallıg'ı

Makrohalar itimallıg'ı. Elementar kombinatorika formulaları. Makrohallardın' itimallıg'ın esaplaw. Stirling formulası. Makrohal itimallıg'ı formulası. Bo'leksheler sanının' en' itimal ma'nisi. Binomiallıq bo'listiriliw ha'm onın' shekli ma'nislerinin' formulası. Puasson bo'listiriliwi.

**Makrohalar itimallıg'ı.** Makrohal u'lken sandag'ı mikrohallar tiykarında ju'zege keledi. Eger berilgen makrohalın' belgileri belgili bolsa, onda printsipinde usı makrohalg'a sa'ykes keliwshi barlıq mikrohallardı tabıwg'a boladı.  $\Gamma_\alpha$  arqalı mikrohallar sanın belgileymiz.  $\alpha$  makrohalı ta'ripleydi. Makrohalın' belgisin  $\Gamma(\alpha)$  arqalı belgileyik.  $\Gamma_0$  arqalı ergodik gipoteza tiykarında alınıwı mu'mkin bolg'an hallardın' ulıwma sanı. Bunday jag'dayda qarap atırıl'g'an makrohal itimallıg'ı

$$P_\alpha = \frac{\Gamma_\alpha}{\Gamma}. \quad (5-1)$$

Mikrohalar sanı  $\Gamma_\alpha$  makroskopiyaalıq haldın' **termodinamikalıq itimallıg'ı** dep te ataladı. Matematikalıq ma'niste  $P_\alpha$  itimallıq bolıp tabılamaydı. Sebebi ol birge ya ten', yamasa kishi ma'niske iye, al  $\Gamma_\alpha$  u'lken san. Biraq sog'an qaramastan (5-1) (termodinamikalıq) itimallıq atın aldı. Sebebi (5-1) din' ja'rdeminde sa'ykes makrohal itimallıg'ı esaplanadı.

**Teoriya aldında turg'an ma'sele (5-1) formulag'a kiriwshi hallardın' sanın tabıwdan ibarat boladı. A'llette tikkeley hallar sanın esaplaw tek ayırım jag'daylarda a'melge asırıladı. Sonlıqtan ko'pshilik jag'daylarda teoriyanın' aldına birim-birim esaplamay-aq hallar sanın yamasa  $P_\alpha$  nin' ma'nisin anıqlawdan ibarat ma'sele qoyıladı.**

İdeal gaz jag'dayında mikrohallar sanı salıstırmalı jen'il esaplanadı.

**Elementar kombinatorika formulaları.** Mikrohollar sanın tuwrıdan-tuwrı esaplaw ushın jaylastırıwlar teoriyasının' birqansha formulaları kerek boladı.

Meyli  $n$  dana orın ha'm  $n$  dana zat bar bolsın.  $n$  dana zatta  $n$  orın boyınsha qalay jaylastıramız sorawı qoyılsın. Usı  $n$  dana zattın' birewin alıp  $n$  orında  $n$  usıl menen jaylastırıp shıg'amız. Ekinshi zat tap sonday jol menen  $n - 1$  orında jaylastırılıwı mu'mkin. Demek eki zat  $n$  orında ha'r qanday  $n(n - 1)$  usıl menen jaylastırılıp shıg'ıwı mu'mkin. Ha'r bir  $n(n - 1)$  jaylastırıwda u'shinshi zat  $n - 2$  orında jaylastırıladı. Sonlıqtan u'sh zat  $n$  orında  $n(n - 1)(n - 2)$  usıl menen jayg'asadı. Demek  $n$  zat  $n$  orında

$$n(n - 1)(n - 2) \dots 1 = n! \quad (5-2)$$

dana ( $n$  faktorial) ha'r qıylı usıl menen jaylasıwı mu'mkin.

(5-2) an'latpasınan barlıq orınlardıń birdeyligi, biraq zatlardıń ha'r qıylılıg'ı basshılıqqa alındı. Mısalı u'sh adam (g'arrı, kempir ha'm bala) u'sh stulda  $3! = 6$  usıl menen jaylasıwı mu'mkin.

Meyli endi  $m$  dana ha'r qıylı zat berilgen bolsın. Usı zatlardı  $n$  orın boyınsha qansha usıl menen jaylastırıp mu'mkin dep soraw qoyıladı. Ha'r bir jaylastırıwda  $n - m$  orın bos qaladı. Bunday jag'dayda  $m$  dana zattı  $n$  dana orıng'a jaylastırıwlar sanı

$$P(n, n - m) = \frac{n!}{(n - m)!} \quad (5-3)$$

Mısal retinde u'sh stulda eki adamnıń  $\frac{3!}{(3 - 2)!} = \frac{6}{1} = 6$  usıl menen jaylasıwı mu'mkin ekenligin ko'rsetiwge boladı.

Endi barlıq zatlardıń bir birinen parqı bolmaytug'ın jag'daydı qarayıq. Eki zat orın almasırg'an jag'daydag'ı jaylasıwlar birdey dep esaplanadı. Bunday jag'dayda  $m$  dana zattı jaylastırıp anda  $m!$  ret orınlardı almasırwımız mu'mkin. Bul jaylastırıwları o'zgeretpeydi. Sonlıqtan (5-3) tiykarında izlenip atırılğ'an usıllar sanı

$$C(n, m) = \frac{n!}{m!(n - m)!} \quad (5-4)$$

Mısalı birdey eki adamdı ( $m = 2$ ) u'sh otırğ'ışta  $\frac{3!}{2!(3 - 2)!} = 3$  usıl menen jaylastırıp mu'mkin.

Ja'ne de bir ma'selege kewil bo'lemiz. Meyli  $n$  dana ha'r qıylı zat bar bolsın. Soraw beriledi: bir birinen zatlardıń quramı boyınsha ayırılutug'ın qansha usıl menen  $m$  dana zattan turatug'ın bir birinen o'zgeshe toparlar du'ziwge boladı? Topardag'ı zatlardıń izbe-izligi a'hmiyetke iye emes. Bul ma'seleni to'mendegidey etip sheshemiz. Eger toparg'a bir zat kiretug'ın bolsa  $n$  zattan  $n$  dana ha'r qıylı topar du'ziwge boladı. Eki zattan turatug'ın ha'r qıylı toparlar bılay du'ziledi:  $n$  zattın' ha'r biri qalg'an  $n - 1$  zattın' ha'r biri menen toparg'a biriktiriledi. Bul jag'dayda kombinatsiyalardıń ulıwma sanı  $n(n - 1)$ . Aqırında

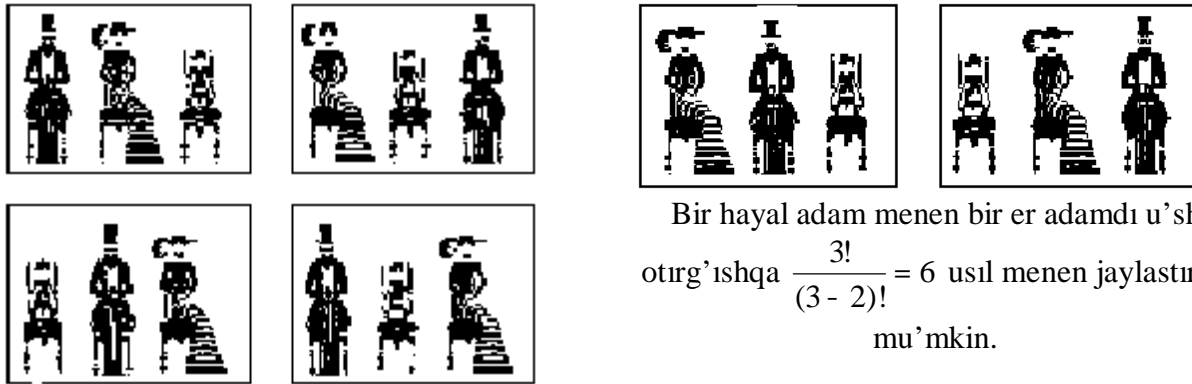
$$C(n, m) = \frac{n(n - 1)(n - 2) \dots [n - (m - 1)]}{m!} = \frac{n!}{m!(n - m)!} \quad (5-5)$$



formulasın alamız.

**Makrohallar itimallıg'ın esaplaw.** İdeal gaz iyelegen ko'lem  $V$ , bul ko'lemdegi bo'leksheler sanı  $n$  bolsın. Bo'lekshe iyelewi mu'mkin bolg'an qutishalar sanı  $N = \frac{V}{d^3} \gg 10^{24} \text{ sm}^3$  bolsın. Bul san ju'da' u'lken ha'm barlıq waqıtta  $N \gg n$  sha'rti orınlanadı.  $V$  ko'lemi ishinde alıng'an  $V_1$  ko'leminde  $m$  bo'lekshe turıwın' itimallıg'ın esaplaymız. Ma'selenin' sha'rti boyınsha  $V_1 < V$ ,  $n^3 m$ . Sonın' menen birge  $V_1$  ju'da' kishi bolmawı ha'm sol  $m$  dana bo'leksheni o'z ishine sıydıra alıwı kerek.  $V_1$  ko'lemindegi qutishalar sanı  $N_1 = \frac{V_1}{d^3}$ . Sonlıqtan  $N_1^3 m$ .

Mikrohاللardın' ulıwma sanı  $n$  bo'leksheni  $N$  qutishag'a jaylastırıwlar sanına ten'. Bo'leksheler bir birinen ayrıladı dep boljaymız (mısalı nomerlengen). Bul bo'leksheler orınları menen almasqandag'ı payda bolg'an mikrohاللar bir birinen ayrıladı degendi an'latadı. Sonın' menen birge qarap atırıl'g'an bo'leksheler qa'siyetleri boyınsha birdey. Sonlıqtan bo'leksheler orın almasırg'anda payda bolg'an mikrohاللar qa'siyetleri boyınsha birdey bolıwı sha'rt. Biraq sol sha'rtlerge qaramastan mikrohاللar birdey emes dep esaplaymız.



Bul jag'day tolıg'ı menen anıq fizikalıq ma'niske iye. Sistemag'a sol birdey mikrohاللar arqalı o'tiw ushın belgili bir waqıt kerek boladı. Sonlıqtan (5-3) ke sa'ykes sistemanın' mikrohاللarın' tolıq sanı ushın

$$\Gamma_0 = \frac{N!}{(N-n)!} \quad (5-6)$$

an'latpasın alamız.  $V_1$  ko'leminde  $m$  bo'lekshe bolg'an jag'daydag'ı qarap atırıl'g'an makrohalg'a sa'ykes keliwshi mikrohاللardın' sanın esaplayıq. Bul sandı  $\Gamma(V_1, m)$  dep belgileyik. Eger  $V_1$  ko'leminde qanday da bir  $m$  dana bo'lekshe bolatug'ın bolsa olar ushın mikrohاللardın' tolıq sanı

$$\gamma(V_1, m) = \frac{N_1!}{(N_1 - m)!} \quad (5-7)$$

Ko'lemnin' basqa bo'limi  $V - V_1$  de qalg'an  $n - m$  dana bo'lekshe boladı. Olar ushın mikrohاللar sanı

$$\lambda(V - V_1, n - m) = \frac{(N - N_1)!}{[N - N_1 - (n - m)]!}. \quad (5-8)$$

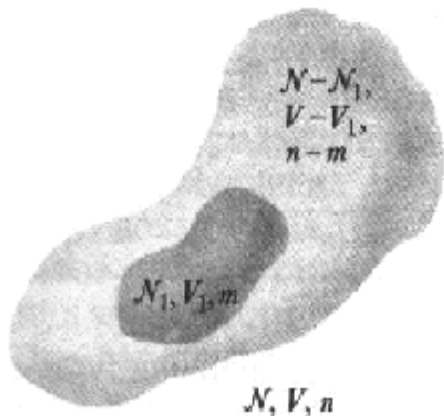
Solay etip  $V_1$  ko'lemindegi  $m$  ayqın bo'lekshe ushın makrohaldı qa'liplestiretug'ın mikrohollar sanı  $\gamma(V_1, m)\gamma(V - V_1, n - m)$  ge ten'. Biraq bul ko'beyme makrohaldı payda etiwshi barlıq mikrohollardı bermeydi. Bul  $V_1$  ko'lemindegi  $m$  dana ayqın bo'leksheler jıynag'ına tiyisli mikrohollar. Biraq  $n$  bo'lekshenin' ishindegi  $m$  bo'leksheni  $\frac{n!}{m!(n - m)!}$  usıl menen saylap alıwg'a boladı [(5-4) an'latpasın qaraw kerek]. Sonlıqtan makrohaldı payda etiwshi mikrohollar sanı

$$\Gamma(V_1, m) = \frac{n!}{m!(n - m)!} \gamma(V_1, m) \gamma(V - V_1, n - m). \quad (5-9)$$

Solay etip (5-1) an'latpası tiykarında makrohaldın' itimallıg'ı ushın

$$P(V_1, m) = \frac{\Gamma(V_1, m)}{\Gamma_0} = \frac{n!}{m!(n - m)!} \frac{N_1!(N - N_1)!(N - n)!}{(N_1 - n)![N - N_1 - (n - m)]!N!} \quad (5-10)$$

formulasın alamız. Solay etip makrohaldın' itimallıg'ın tabıw boyınsha ma'sele sheshilgen. (5-10) nın' on' ta'repindegi barlıq shamalar belgili. Biraq bul shamalar ju'da' u'lken sanlardan turadı ha'm barlıq waqıtları da  $N_1 \gg m$  sha'rti orınlanadı. Sonlıqtan bul formulanı a'piwayıraq tu'rge keltiriw mu'mkin.



2-6 su'wret.

Mikrohollardın' itimallıg'ın esaplaw ushın arnalg'an su'wret.

$n$  shamasının' ma'nisi ju'da' u'lken bolg'anda biz ıqshamlı tu'rdegi

$$n! \gg \frac{n!}{e^n} \quad (5-11)$$

formulasın alamız. Bul *Stirling formulası* bolıp tabıladı ha'm bılay da'lillenedi:

$$\ln n = \ln 1 + \ln 2 + \dots + \ln n = \sum_{k=1}^n \ln k \Delta n, \quad \Delta n = 1. \quad (5-12)$$

U'lken  $n$  larde  $\Delta n$  kishi shama dep esaplanadı. Sonlıqtan (5-12) summasınan integralg'a o'temiz

$$\ln n \gg \int_1^n \ln n \, dn = n \ln n - n. \quad (5-13)$$

On' ta'repindegi  $n$  ge salıstırğ'anda kishi bolğ'anlıqtan 1 qaldırılıp ketken. (5-13) ti potentsiallap (5-11) ge kelemiz.

**Makrohaldın' itimallıg'ı ushın formula.** (5-10) dag'ı barlıq faktoriallardı (5-11) boyınsha da'reje tu'rinde ko'rsetiw za'ru'r. Stirling formulasın paydalang'anda  $N_1 \gg m$ ,  $N - N_1 \gg n - m$ ,  $N \gg n$  ekenligi dıqqatqa alınıwı kerek. Mısalı

$$(N_1 - m)! = \frac{\pi^{N_1 - m} \frac{1}{e}}{\frac{1}{e}} = \frac{\pi^{N_1} \frac{1}{e}}{\frac{1}{e}} \frac{\pi^{N_1 - m} \frac{1}{e}}{\frac{1}{e}} = \frac{\pi^{N_1} \frac{1}{e}}{\frac{1}{e}} e^{-m}.$$

Bul an'latpada  $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{x}{n}\right)^n = e^x$ .

Basqa faktoriallar da usınday jollar ja'rdeminde esaplanadı. Na'tiyjede

$$P(V_1, m) = \frac{n!}{m!(n-m)!} \frac{N_1^m (N - N_1)^{n-m}}{N^n} = \frac{n!}{m!(n-m)!} \frac{\pi^{N_1} \frac{1}{e}}{\frac{1}{e}} \frac{\pi^{N_1 - m} \frac{1}{e}}{\frac{1}{e}} \quad (5-14)$$

ten'liklerin alamız. Olar a'piwayı ma'niske iye:  $p = \frac{N_1}{N} = \frac{V_1}{V}$  bo'leksheni  $V_1$  ko'leminde

tabıwdın' itimallıg'ı,  $q = 1 - \frac{N_1}{N} = 1 - p$  ja'rdeminde bo'leksheni ko'lemnin' basqa bo'limi

bolğ'an  $V - V_1$  da tabıwdın' itimallıg'ı belgilengen. Anıqlama boyınsha  $p + q = 1$  bolıwı kerek.

(5-14) ti  $p$  ha'm  $q$  arqalı basqasha jazamız

$$P(V_1, m) = \frac{n!}{m!(n-m)!} p^m q^{n-m}. \quad (5-15a)$$

Bul bo'listiriliw **binomial bo'listiriliw** dep ataladı. (5-15a) ten'liginde ko'lem  $V_1$  ko'leminin' ma'nisi hesh qanday a'hmiyetke iye bolmaydı. Bul bo'listiriwdi basqasha da jaza alamız:

$$P(V_1, m) = \frac{n!}{m!(n-m)!} p^m (1-p)^{n-m}. \quad (5-15b)$$

**Bo'lekshelerdin' en' itimal sanı.**  $m$  nin' ju'da' kishi  $m \in 0$  ha'm ju'da' u'lken  $m \in \infty$  ma'nislerinde

$$P(V_1, m \otimes 0) \gg q^n \otimes 0, \quad P(V_1, m \otimes n) \gg p^n \otimes 0.$$

$m$  nin' bazı bir aralıqtag'ı ma'nisinde  $P(V_1, m)$  funktsiyası maksimumg'a jetedi. Bul jag'daydı tabıw ushın  $\frac{P(V_1, m)}{dm} = 0$  ten'lemesin sheshiwimiz kerek.

Bul tuwındını  $V_1$  ha'm  $p$  jetkilikli da'rejede kishi, al  $q$  birge jaqın bolg'an jag'day ushın sheshemiz. Biraq  $V_1$  dım kishi bolmawı kerek. Bul jag'dayda  $p^m$  shaması dım kishi boladı. Usınday jag'daylarda  $m$  nin' jetkilikli da'rejede u'lken ma'nislerinde maksimum alınadı. (5-15a,b) dag'ı faktoriallardı bolsa (5-11) tiykarında tu'rlandırıw mu'mkin. Biraq sonın' menen qatar barlıq waqıtları da  $m$  di  $n$  ge salıstırıp alıp taslay beriwge bolmaydı. Onday jag'dayda

$$\frac{n!}{m!(n-m)!} \gg \frac{(n/e)^m}{(m/e)^m [(n-m)/e]^{n-m}} \gg \frac{\frac{n}{e} \frac{\ddot{o}}{m} (1-m/n)^m}{\frac{n}{e} \frac{\ddot{o}}{m} (1-m/n)^n}. \quad (5-16)$$

$n \otimes \mathbb{N}$  bolg'anda  $\lim_{n \otimes \mathbb{N}} \frac{\frac{n}{e} \frac{\ddot{o}}{m}}{n \frac{\ddot{o}}{m}} = e^{-m}$ . Sonlıqtan (5-15a)

$$R(V_1, m) \approx P(V_1, m) \gg \frac{\frac{n}{e} \frac{\ddot{o}}{m} (1-m/n)^m}{\frac{n}{e} \frac{\ddot{o}}{m} (1-m/n)^n} p^m q^{n-m} = \frac{\frac{n}{e} \frac{\ddot{o}}{m} (1-m/n)^m}{\frac{n}{e} \frac{\ddot{o}}{m} (1-m/n)^n} q^n \quad (5-17)$$

tu'rine enedi. Bul an'latpanı  $m$  boyınsha differentsiallap, tuwındını nolge ten'lesele maksimumg'a sa'ykes keliwshi  $m_0$  din' ma'nisin alamız:

$$\ln \frac{\frac{n}{e} \frac{\ddot{o}}{m} (1-m/n)^m}{\frac{n}{e} \frac{\ddot{o}}{m} (1-m/n)^n} - 1 = 0. \quad (5-18)$$

$q \gg 1$  bolg'anlıqtan

$$m_0 \gg \frac{np}{q} \gg np. \quad (5-19)$$

Esaplawlardın' barlıg'ı da juwıq tu'rde islendi. Sonlıqtan (5-19) tek juwıq ma'nisti beredi. Da'lirek bahalawlar  $V$  ko'lemindegi  $n$  nin' u'lken ma'nislerinde ha'm  $V_1$  din' ju'da' kishi bolmag'an ma'nislerinde u'lken da'llikke iye bolatug'ınlıg'ın ko'rsetedi. Bul na'tiyjenin' ma'nisi a'piwayı.  $\frac{n}{V} = n_0$  shaması ko'lemindegi bo'leksheler kontsentratsiyası (eger bo'leksheler

ko'lemde ten' o'lsheqli tarqalg'an bolsa) bolıp tabıladı,  $n_{\max} = \frac{m_0}{V_1}$  shaması bolsa

ko'lemindegi en' itimal kontsentratsiya.  $p = \frac{V_1}{V}$  ekenligin esapqa alıp (5-19) dı bılay jazamız

$$n_{\max} = n_0. \quad (5-20)$$

Demek  $V_1$  ko'lemindegi en' itimal kontsentratsiya bo'lekshelerdin' barlıq ko'lem boyınsha ten' o'lsheмли bo'listiriliwine sa'ykes keledi.  $V_1$  ko'lemin  $V$  ko'lemi ishinde saylap alıw ıqtıyarlı bolg'anlıqtan bo'lekshelerdin' kontsentratsiyasının' en' itimal bo'listiriliwi ten' o'lsheмли bo'listiriliw bolıp tabıladı. Tuyıq sistemanın' usınday halı statsionar ha'm ten' salmaqlı bolıp tabıladı. Sonın' ushın alıng'an juwmaqtı bilayınsha jazamız: ***Sistemanın' ten' salmaqlıq halı onın' en' itimal halı bolıp tabıladı.***

**Binomial bo'listiriw.** Nyuton binomı formulasına muwapıq (5-15a) binomial bo'listiriliw dep ataladı. Elementar matematika kursınan bergili bolgan Nyuton binomı bilay jazıladı:

$$(q + n)^n = q^n + \frac{n}{1!} p q^{n-1} + \frac{n(n-1)}{2!} p^2 q^{n-2} + \dots + \frac{n(n-1)\dots[n-(m-1)]}{m!} p^m q^{n-m} + \dots + p^n \quad (5-21)$$

$p + q = 1$  bolg'anlıqtan (5-21) itimallıqtın' normirovkası sha'rtine aylanadı:

$$\sum_{m=0}^n P(V_1, m) = 1.$$

$P(V_1, m)$  nin'  $m$  nen g'a'rezliligi 2-7 su'wrette ko'rsetilgen. İymeklik  $m_{\max} = \frac{m}{V}$  shamasında maksimumg'a iye. Piktin' biyikligi menen ken'ligi normirovka sha'rti menen baylanısқан

$$\Delta m P(V_1, m_{\max}) \gg 1. \quad (5-22)$$

Bul an'latpadag'ı  $\Delta m$  shaması piktin' ken'ligine sa'ykes keledi.

Demek,  $V_1$  ko'lemindegi bo'leksheler sanı  $m_{\max}$  nan awısıwı ju'da' az shama boladı. Usı awısıwı menen  $P$  nin' ma'nisi tez kemeyedi. Biraq sog'an qaramastan barlıq waqıtta  $m_{\max}$  shamasına ten' emes, al usı shama do'gereginde terbeledi. Bul awıtqıwlar ***fluktuatsiyalar*** dep ataladı.

**Binomial bo'listiriwdin' ha'r qıylı sheklerdegi formaları.** SHEksiz ko'p sanlı sınaqlarda  $(n \in \mathbb{N})$  (5-15b) shektegi tu'rine umtıladı. Sonın' ishinde eki a'hmiyetli jag'daydı qarap o'temiz:

1)  $n \in \mathbb{N}$  ha'm  $p = \text{const}$  sha'rtleri orınlang'anda normal bo'listiriliwge iye bolamız.

2)  $n \in \mathbb{N}$  ha'm  $np = \text{const}$  bolg'anda Puasson bo'listiriliwin alamız.

**Puasson bo'listiriliwi.**  $\langle m \rangle$  arqalı  $V_1$  ko'lemindegi bo'lekshelerdin' ortasha sanı belgilengen bolsın [bunday ko'lem (15.15a) an'latpasın keltirip shıg'arıw ushın paydalanıldı].  $\frac{n}{V}$  qatnası

barlıq ko'lemdegi bo'lekshelerdin' ortasha kontsentratsiyası bolg'anlıqtan  $\frac{\langle m \rangle}{V_1} = \frac{n}{V}$  yamasa

$\frac{V_1}{V} = \frac{\langle m \rangle}{n}$  qatnasları orınlı boladı. Bul ma'nislerdi bir birinen g'a'rezsiz bolg'an waqıyalar ushın jazılğan

$$P_n(m_1, m_2, \mathbf{K}) = \frac{n!}{m_1! m_2! \mathbf{K}} p_1^{m_1} p_2^{m_2} p_3^{m_3} \mathbf{K}$$

formulasına qoysaq biz

$$P_n(m) = \frac{n!}{m!(n-m)!} \left( \frac{\langle m \rangle}{n} \right)^m \left( 1 - \frac{\langle m \rangle}{n} \right)^{n-m}$$

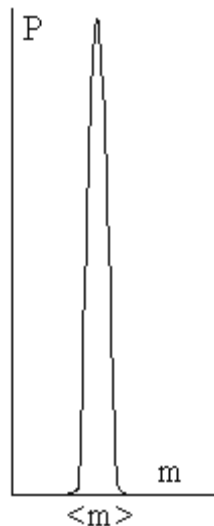
an'latpasın alamız. Bul an'latpanın' on' ta'repin tu'rlendiremiz:

$$\begin{aligned} P_n(m) &= \frac{n(n-1)\mathbf{K}(n-m+1)}{m!} \left( \frac{\langle m \rangle}{n} \right)^m \left( 1 - \frac{\langle m \rangle}{n} \right)^{n-m} = \\ &= \left( \frac{\langle m \rangle}{n} \right)^m \left( 1 - \frac{\langle m \rangle}{n} \right)^{n-m} = \left( \frac{\langle m \rangle}{n} \right)^m \left( 1 - \frac{\langle m \rangle}{n} \right)^m. \end{aligned}$$

Bul an'latpadan sheklik  $n \rightarrow \infty$  ma'nisi ushın

$$P(m) = \lim_{n \rightarrow \infty} P_n(m) = \frac{(\langle m \rangle)^m}{m!} e^{-\langle m \rangle} \quad (5-23)$$

formulası alınadı. Bul formula bo'listiriliw formulası bolıp tabıladı ha'm Puasson bo'listiriliwi dep ataladı.



2-7 su'wret.

$n$  menen  $\langle m \rangle$  nin' u'lken ma'nislerindegi binomliq bo'listiriliw.

## 6-§. Fluktuatsiyalar

**Ko'lemdegi bo'leksheler saninin' ortasha ma'nisi.** Joqarida aytilg'aninday ko'lemdegi bo'lekshelerdin' ortasha ma'nisi turaqli bolip qalmaydi, u'lken emes sheklerde o'zgeriske ushraydi. Printsipinde u'lken awisiwlar da mu'mkin, biraq itimallig'ı kem ha'm sonliqtan ju'da' siyrek boladı.  $V_1$  ko'lemindegi bo'leksheler saninin' waqıtqa baylanislılıg'ı su'wrette ko'rsetilgen. Anıqlama boyınsha  $V_1$  ko'lemindegi bo'lekshelerdin' ortasha sanı  $T \otimes \mathbb{Y}$  bolg'anda:

$$\langle m \rangle_t = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \dot{m}(t) dt \quad (6.1)$$

shamasına ten'. Biraq sonin' menen birge (4-13) ergodik gipotezadan paydalanıp waqıt boyınsha ortashanı ansambl boyınsha ortashag'a alıp keliwge ha'm (4-5) formulasınan paydalanıwg'a boladı. Onday jag'dayda

$$\langle m \rangle_t = \langle m \rangle_a = \dot{\sum}_{m=0}^n m P(V_1, m) = \dot{\sum}_{m=0}^n \frac{n!}{m!(n-m)!} p^m q^{n-m} . \quad (6.2)$$

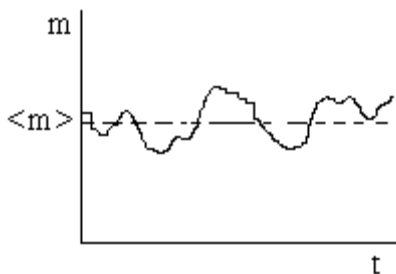
Bul shamani bilay esaplawg'a boladı:

$$\dot{\sum}_{m=0}^n \frac{n!}{m!(n-m)!} p^m q^{n-m} = p \frac{\mathbb{I}}{\mathbb{I}p} \dot{\sum}_{m=0}^n \frac{n!}{m!(n-m)!} p^m q^{n-m} = p \frac{\mathbb{I}}{\mathbb{I}p} (p+q)^n = np(p+q)^{n-1} . \quad (6.3)$$

$p+q=1$  bolg'anlıqtan

$$\langle m \rangle_t = \langle m \rangle_a = pn. \quad (6.4)$$

Demek  $V_1$  ko'lemindegi ortasha tıg'ızlıq barlıq  $V$  ko'lemindegi ortasha tıg'ızlıqqa ten' boladı eken. Bunnan bilay qaysı ortalaw boyınsha ga'p etilip atırg'anlıg'ına itibar berilmeydi. Sebebi ergodikalıq gipotezadan paydalanamız.



2-8 su'wret.

Bo'leksheler sanı fluktuatsiyaları.

**Fluktuatsiyalar.** Ortasha ma'nis a'tirapında terbeletug'in shamani fluktuatsiyalanadı dep esaplaydı. Uliwma ma'nisi boyınsha fluktuatsiya tu'sinigi matematikalıq tu'sinik bolip tabıladı. Biraq molekualıq fizikada termodinamikalıq ten' salmaqlıqtag'ı ishki parametrlerdin' fluktuatsiyası na'zerde tutıladı. Fluktuatsiyalardın' o'lishemi (2.19) ja'rdeminde anıqlang'an shamanin' ortasha ma'nisinen standart awisiw bolip tabıladı. Bul shamani esaplag'anda waqıt boyınsha ortalawdı ansambl boyınsha ortashalaw menen almastırıw kerek. (2.19) standart

awısıwdı esaplaw ushın  $\langle m \rangle$  menen bir qatarda  $\langle m^2 \rangle$  shamasın da esaplaw kerekligin ko'rsatedi:

$$\langle m^2 \rangle = \sum_{m=0}^n \frac{n! m^2}{m!(n-m)!} p^m q^{n-m}. \quad (6.5)$$

(6.3) ti esaplag'andag'ı usıldan paydalanamız:

$$\begin{aligned} \sum_{m=0}^n \frac{n! m^2}{m!(n-m)!} p^m q^{n-m} &= p \frac{1}{1-p} p \frac{1}{1-p} \sum_{m=0}^n \frac{n!}{m!(n-m)!} p^m q^{n-m} = \\ &= p \frac{1}{1-p} p \frac{1}{1-p} (p+q)^n = p[n(p+q)^{n-1} + pn(n-1)(p+q)^{n-2}]. \end{aligned} \quad (6.6)$$

$p+q=1$  ekenligin esapqa alıp

$$\langle m^2 \rangle_a = npq + n^2 p^2. \quad (6.7)$$

ten'liginin' orınlanatug'inlıg'ına isenemiz. (2.19a) formuladan dispersiya ushın

$$\langle (\Delta m)^2 \rangle = \langle m^2 \rangle - \langle m \rangle^2 = npq. \quad (6.8)$$

ekenligin tabamız. Demek standart awısıw ushın:

$$\sigma = \sqrt{\langle (\Delta m)^2 \rangle} = \sqrt{npq}. \quad (6.9)$$

an'latpasın alamız. Bul ten'lik sistemadag'ı bo'lekshelerdin' ulıwma sanına qarag'anda standart awısıwdın' a'stelik penen o'setug'inlıg'ın ko'rsatedi. Al sonın' menen bir qatarda ortasha (6.4) sistemadag'ı bo'leksheler sanına proporsional o'sedi. Demek **salıstırmalı standart awısıw sistemadag'ı bo'leksheler sanının' o'siwi menen kemeyedi**:

$$\frac{\sqrt{\langle (\Delta m)^2 \rangle}}{\langle m \rangle} = \sqrt{\frac{q}{p}} \frac{1}{\sqrt{n}}. \quad (6.10)$$

Bul formulanın' fizikalıq ma'nisi a'hmiyetke iye. Biz karap atırg'an jag'day ushın onı bılayınsha ko'shirip jazayıq:

$$\frac{\sqrt{\langle (\Delta m)^2 \rangle}}{\langle m \rangle} = \sqrt{\frac{V}{V_1} - 1} \frac{1}{\sqrt{n}}. \quad (6.11)$$

$V \gg V_1$  sheginde fluktuatsiyanın' salıstırmalı ma'nisi nolge umtıladı, al  $V = V_1$  sha'rti orınlang'anda da fluktuatsiyanın' salıstırmalı ma'nisi nolge ten' boladı. Sebebi barlıq ko'lemde bo'leksheler sanı anıq  $n$  shamasına ten' ha'm bo'leksheler sanının' hesh qanday fluktuatsiyası bolmaydı (biz fluktuatsiyalardıń bo'lekshelerge emes, al olardı ta'ripleytug'ın fizikalıq shamalarg'a tiyisli ekenligin an'g'aramız).  $V_1$  din' kishireyiwi menen fluktuatsiyalardıń



salıstırmalı ma'nisi o'sedi.  $V_1 \ll V$  ten'sizligi orınlang'anda (6.11) an'latpasındag'ı 1 di esapqa almay ketiwge boladı (sebebi  $V_1 / V \gg 1$ ) ha'm formulanı bilay jazamız:

$$\frac{\sqrt{\langle (\Delta m)^2 \rangle}}{\langle m \rangle} = \sqrt{\frac{V}{V_1}} \frac{1}{\sqrt{n}} = \frac{1}{\sqrt{\langle m \rangle}}. \quad (6.12)$$

Bul jerde  $n = \langle m \rangle \frac{V}{V_1}$ . (6.12) den *fluktuatsiyanın' salıstırmalı tutqan ornı usı fluktuatsiya*

*qarap atırılğ'an oblasttın' kemeyiwi menen artatug'ınlıg'ı ko'rinedi.* Mısalı eger bir neshe bo'leksheden turatug'ın ko'lem alınsa fluktuatsiyalardıń shaması bo'leksheler sanının' sezilerliktey u'lesindey boladı. Ortasha 10 bo'leksheden turatug'ın ko'lemde standart awısıw shama menen u'shten birdi quraydı. Normal atmosferada (a'ddetegidey jag'daylardag'ı hawada) 1 mm<sup>3</sup> ko'lemde ortasha  $\langle m \rangle = 2,7 \times 10^{16}$  bo'lekshe boladı, al standart awısıw  $10^{-8}$  di quraydı (Yag'nıy ju'da' kishi shama boladı). Sonlıqtan makroskopiyaq sistemalarda statistikaq fluktuatsiyalar a'hmiyetke iye emes. U'lken da'llik penen bul shamalardı olardıń ortasha ma'nisine ten' dep aytıwg'a boladı.

Puasson bo'listiriliwinin' ja'rdeminde fluktuatsiyanın' salıstırmalı ma'nisin esaplaymız:

$$\begin{aligned} \langle m^2 \rangle &= \sum_{m=0}^{\infty} \frac{m^2 (\langle m \rangle)^m}{m!} e^{-\langle m \rangle} = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{[m(m-1) + m] (\langle m \rangle)^m}{m!} e^{-\langle m \rangle} = \\ &= \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(\langle m \rangle)^m}{(m-2)!} e^{-\langle m \rangle} + \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(\langle m \rangle)^m}{(m-1)!} e^{-\langle m \rangle} = (\langle m \rangle)^2 + \langle m \rangle \end{aligned}$$

ha'm usıg'an sa'ykes  $\langle (\Delta m)^2 \rangle = \langle m^2 \rangle - (\langle m \rangle)^2 = \langle m \rangle$ . Bunnan

$$\frac{\sqrt{\langle (\Delta m)^2 \rangle}}{\langle m \rangle} = \frac{1}{\sqrt{\langle m \rangle}}$$

an'latpasın alamız [haqıyqatında da (6.12) an'latpasının' tiykarında usı an'latpag'a iye bolıwımız kerek edi].

Biz joqarıda ideal gaz sistemasındag'ı fluktuatsiyalar haqqında ga'p etti. Biraq ayılğ'an ga'plerdin' barlıg'ının' da bir biri menen ta'sir etispeytug'ın yamasa a'zzi ta'sir etisetug'ın bo'leksheler sistemaları ushın da durıs ekenligin atap o'temiz.

**Fluktuatsiyalardıń' salıstırmalı ma'nisi.** Meyli  $F$  shaması  $n$  bo'leksheden turatug'ın sistemanı ta'ripleytug'ın bolsın ha'm bo'lekshelerge tiyisli sa'ykes shamalardıń' qosındısınan turatug'ın bolsın:

$$F = \sum_{i=1}^n f_i. \quad (6.13)$$

$\langle f_i \rangle$  arqalı  $i$ -bo'lekshe ushın  $f$  shamasının' ma'nisi belgilengen. Mısalı, eger  $F$  arqalı sistemanın' barlıq bo'lekshelerinin' kinetikaq energiyası belgilengen bolsa, onda  $\langle f_i \rangle$  shaması  $i$ -bo'lekshenin' kinetikaq energiyası bolıp tabıladı.

(6.13)-formulag'a kiriwshi shamalardin' ortasha ma'nisin waqıt boyınsha da, ansambl boyınsha da ortasha ma'nis sıpatında esplawg'a boladı. Ergodikalıq gipotezaga sa'ykes eki shama da birdey ma'niske iye boladı. Sonlıqtan ortashalawlı  $\langle \rangle$  belgisi menen an'latıp ortashalaw ju'rgiziletug'ın o'zgeriwshini indeks tu'rinde jazbaymız. Bunday jag'daylarda (6.13) ten

$$\langle F \rangle = \dot{\bar{a}} \sum_{i=1}^n \langle f_i \rangle. \quad (6.14)$$

ekenligi kelip shıg'adı.  $\langle F \rangle$  shamasının' berilgen waqıt momentindegi barlıq bo'lekshelerdin' kinetikalıq energiyasının' barlıq bo'leksheler sanına qatnası emes ekenligin an'law kerek. Bul shama sistemanın' barlıq bo'leksheleri ushın kinetikalıq energiyanın' qosındısının' waqıt boyınsha ortashası yamasa bo'leksheler sistemaları ansambli boyınsha ortasha ma'niske ten'. Tap usınday eskertiw  $\langle f_i \rangle$  ushın da durıs boladı.

Sistemadag'ı barlıq bo'leksheler birdey huqıqqa iye. Sonlıqtan

$$\langle f_i \rangle = \langle f_j \rangle = \dots \langle f \rangle. \quad (6.15)$$

Al (6.14) mına tu'rde jazıladı:

$$\langle F \rangle = n \langle f \rangle. \quad (6.16)$$

F shamasının' onın' ortasha ma'nisi bolg'an  $\langle F \rangle$  ten ortasha kvadratlıq awısıwın tabamız. Anıqlama boyınsha

$$\Delta F = F - \langle F \rangle = \sum_{i=1}^n (f_i - \langle f \rangle) = \sum_{i=1}^n \Delta f_i. \quad (6.17)$$

Bul an'latpanın' eki ta'repin de kvadratqa ko'terip, alıng'an na'tiyjene ortalasaq

$$\langle (\Delta F)^2 \rangle = \dot{\bar{a}} \sum_{i,j=1}^n \langle \Delta f_i \Delta f_j \rangle = \dot{\bar{a}} \sum_{i=1}^n \langle (\Delta f_i)^2 \rangle + \dot{\bar{a}} \sum_{i \neq j} \langle \Delta f_i \Delta f_j \rangle \quad (6.18)$$

an'latpasına iye bolamız. Bul an'latpanın' on' ta'repindegi qosındı eki bo'limge bo'lingen. Birinshi summa birdey indekske iye, al ekinshisi ha'r qıylı indeksli ag'zalardı birlestiredi.  $\Delta f_i$  ha'm  $\Delta f_j$   $i \neq j$  bolg'an jag'daylarda bir biri menen korrelyatsiyag'a iye emes dep boljap  $\langle \Delta f_i \Delta f_j \rangle = 0$  ekenligine iye bolamız. Ba'rshe bo'leksheler ten'dey huqıqqa iye bolg'anlıqtan birinshi summadag'ı  $\langle (\Delta f_i)^2 \rangle$  barlıq bo'lekshelerde birdey. Sonlıqtan

$$\langle (\Delta F)^2 \rangle = n \langle (\Delta f_i)^2 \rangle. \quad (6.19)$$

(6.16) menen (6.19) dan salıstırmalı standart awısıw ushın alamız:

$$\frac{\sqrt{\langle (\Delta F)^2 \rangle}}{\langle F \rangle} = \frac{\sqrt{\langle (\Delta f)^2 \rangle}}{\langle f \rangle} \frac{1}{\sqrt{n}}. \quad (6.20)$$

(6.20) uliwma jag'dayda bo'leksheler sistemasina tiyisli shamanin' salistirmali standart awisiwinin' bo'leksheler saninin' kvadrat korenine kerri proporsional kemeyetug'inlig'in da'lilleydi, al bo'leksheler sani u'lken bolg'anda salistirmali standart awisiw ju'da' kishi boladi. **Ten' salmaqlıq halda turıp sistema bir mikrohaldan basqa mikrohاللarg'a o'tip turaqlı tu'rde o'zgerip turadı.** Uliwma tu'rde aytqanda usınday o'tiwlerdin' na'tiyjesinde sistemani ta'ripleytug'in makroskopiyaqlıq parametrler de o'zgeriske ushiraydı. Ten' salmaqlıq hal usı makroskopiyaqlıq parametrlerdin' ortasha ma'nisi menen ta'riplenedi. Bunnan ten' salmaqlıq halda sistemanın' makroskopiyaqlıq parametrleri olardin' ortasha ten' salmaqlıq ma'nislerine ten' turaqlı shamalar bolıp qalmaydı degen juwmaq kelip shıg'adı. Bul parametrler ortasha ma'nisleri a'tirapında o'zgeriske ushiraydı. Bunday o'zgerisler haqqında ga'p etilgende ortasha shamalar fluktuatsiyag'a ushiraydı dep aytadı.

Fluktuatsiyalardin' salistirmali tu'rde tutqan ornı sistemadag'ı bo'leksheler saninin' artıwı menen kemeyedi. Sonlıqtan makroskopiyaqlıq sistemalarda fluktuatsiyalardin' salistirmali shaması esapqa alarlıqtay u'lken emes ha'm sistemanın' barlıq makroskopiyaqlıq parametrleri u'lken da'llikte olardin' waqıt boyınsha ortashasına ten'.

Sorawlar:

Fluktuatsiyalardı qanday sebeplerge baylanisli ortasha ma'nisten awisiwdın' ortasha shaması menen ta'riplewge bolmaydı?

## 7-§. Maksvell bo'listiriliwi

Maksvell bo'listiriliwi keltirilip shıg'arılıwı ha'm onnı o'zgesheliklerinin' talqılanıwı.  
Maksvell bo'listiriliwin eksperimentte tekserip ko'riw.

**Molekulalardin' tezlikler boyınsha bo'listiriliwi.** Ha'r bir soqlıg'ısıw akti na'tiyjesinde molekulanın' tezligi tosattan o'zgeredi. Og'ada ko'p sanlı soqlıg'ısıwlar aqıbetinde tezlikleri berilgen intervalındag'ı tezliktin' ma'nisine ten' bolg'an bo'leksheler sani saqlanatug'in statsionar ten' salmaqlıq hal ornaydı. Bunday jag'dayda tezliklerdin' berilgen intervalındag'ı bo'leksheler sani (fluktuatsiyalar da'lliginde) turaqlı tu'rde saqlanadı. Tezlikler boyınsha molekulalardin' bo'listiriliwi birinshi ret Angliyalı ullı fizik Djeyms Klerk Maksvell (klassikalıq elektrodinamikanın' do'retiwshisi, 1831-jılı tuwılıp 1879-jılı 48 jasında qaytıw bolg'an) ta'repinen tabıldı ha'm onnı atı menen ataladı.

**Molekulalardin' ortasha kinetikalıq energiyası.** Molekulalardin' ortasha kinetikalıq energiyası olardin' tezlikler boyınsha bo'listiriliwin ta'ripleytug'in a'hmiyetli makroskopiyaqlıq parametr bolıp tabıladı. Molekulalardin' tezlikler boryınsha bo'listiriliwindegi onnı fundamentallıg'ın anıqlawshı bas qa'siyet mınadan ibarat: ***izolyatsiyalang'an ko'lemdegi ha'r qıylı sorttag'ı molekulalardin' barlıg'ı da birdey ortasha kinetikalıq energiyag'a iye boladı.*** Bul ha'r qıylı sorttag'ı ha'r qıylı kinetikalıq energiyag'a iye molekulalar bir biri menen ta'sir etiskende olardin' kinetikalıq energiyalardin' ortasha ten'lesetug'inlig'in bildiredi.

Da'lillew ushın eki sorttag'ı molekulalardan turatug'in gaz aralaspasın qaraymız. Birinshi ha'm ekinshi sortqa tiyisli bolgan shamalardı 1 ha'm 2 indeksleri menen belgileyemiz. Barlıq mu'mkin bolg'an molekulalar jupların alıp qaraymız ha'm olardin' salistirmali tezlikleri  $v_2 - v_1$  menen olardin' massa oraylarınin' tezliklerin' ( $v_{m.o.}$ ) esaplaymız (vektorlıq shamalardı biz juwan ha'ripler menen jazdıq, biraq eger sol vektorlardin' tek san shaması a'hmiyetli bolg'an jag'daylarda biz a'dettegidey ha'riplerden paydalanamız):

$$\mathbf{v}_{m.o.} = \frac{m_1 \mathbf{v}_1 + m_2 \mathbf{v}_2}{m_1 + m_2}. \quad (7.1)$$

Soqlıǵ'ısıw protsessinin' ta'rtipsiz ekenligine baylanıslı massa orayların' tezlikleri menen molekulaların' bir birine salıstırǵ'andag'ı tezlikleri arasında koorelyatsiyanın' bolıwı mu'mkin emes. Sonlıqtan barlıq molekulalar jupları boyınsha alıng'an salıstırmalı tezlikler menen massa orayları tezliklerinin' skalyar ko'beymesi nolge ten' boladı (Yag'nıy  $\langle [\mathbf{v}_{m.o.}(\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1)] \rangle = 0$ ). Onda

$$\langle [\mathbf{v}_{m.o.}(\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1)] \rangle = \frac{1}{m_1 + m_2} \left[ (m_1 - m_2) \langle \mathbf{v}_1 \mathbf{v}_2 \rangle + m_2 \langle \mathbf{v}_2^2 \rangle - m_1 \langle \mathbf{v}_1^2 \rangle \right] = 0.$$

Eki sorttag'ı molekulalar tezlikleri o'z-ara korrelyatsiyanı bag'anlıqtan  $\langle \mathbf{v}_1 \mathbf{v}_2 \rangle = 0$ . Sonlıqtan  $m_2 \langle \mathbf{v}_2^2 \rangle = m_1 \langle \mathbf{v}_1^2 \rangle$ . Basqa so'z benen aytqanda og'ada a'hmiyetli ha'm sulıw bolǵ'an

$$\left\langle \frac{m_1 \mathbf{v}_1^2}{2} \right\rangle = \left\langle \frac{m_2 \mathbf{v}_2^2}{2} \right\rangle \quad (7.2)$$

formulasın alamız. Bul *gazdin' kuramındag'ı barlıq sorttag'ı molekulaların' ortasha kinetikalıq energiyaların' bir birine ten' ekenligi haqqındag'ı juwmaq og'ada a'hmiyetli fizikalıq juwmaq bolıp tabıladı.*

Endi sol ha'r qıylı sorttag'ı molekulalar bir biri menen energiyanın' almasıwına mu'mkinshilik beretug'ın diywal menen ayrılǵ'an bolsın dep esaplayıq. Bul diywal tek energiya almasıwdag'ı ortalıq (da'lda'lıshı) bolıp g'ana xızmet etedi, al energiya almasıwdın' tiykarg'ı na'tiyjesine ta'sirin tiygizbeydi – diywaldın' eki ta'repindegi molekulaların' ortasha kinetikalıq energiyaları birdey boladı. Bunday tastıyıqlawdın' diywal arkalı energiya almasıp atırǵ'an birdey sorttag'ı molekulalar ushın da durıs ekenligi tu'sinikli. Diywal arqalı kinetikalıq energiya almasıw diywaldın' molekulalarına energiya beriwden ha'm bunnan keyin diywaldın' usı molekulaların' ekinshi ta'reptegi molekulalarg'a kinetikalıq energiyanı beriwden ibarat boladı. Diywaldın' ha'r bir ta'repindegi energiya almasıwdın' eki bag'ıt boyınsha bolatug'ınlıǵ'ı tu'sinikli. Bunnan energiya almasıwların' na'tiyjesinde diywaldın' molekulaların' da ortasha kinetikalıq energiyasın' gaz molekulaların' ortasha energiyasına ten' bolatug'ınlıǵ'ı ko'rinip tur. *Demek molekulalar sistemasındag'ı energiya almasıwı orın alatug'ın barlıq molekularadın' ortasha kinetikalıq energiyaları, sonday-aq sistemanın' barlıq ken'isliklik bo'limlerindegi (molekulaların') ortasha kinetikalıq energiyalar birdey boladı.*

Sistemanın' usınday halı *termodinamikalıq ten' salmaqlıq* dep ataladı. Al ortasha kinetikalıq energiya *temperatura* dep atalatug'ın fizikalıq shama menen ta'riplenedi. Ortasha kinetikalıq energiyanın' turaqlılıǵ'ının' ornına a'dette temperaturanın' turaqlılıǵ'ın aytadı, al ortasha kinetikalıq energiyanın' o'siwin temperaturanın' o'siwi menen ta'ripleydi.

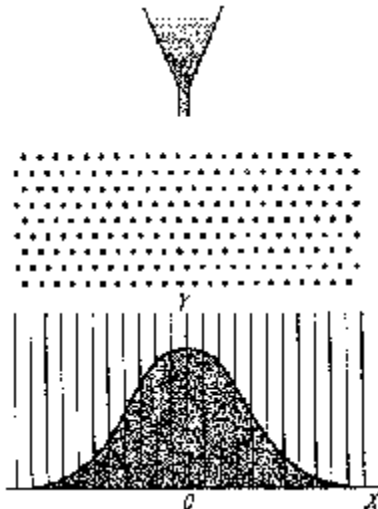
**Temperatura.** Anıqlama boyınsha temperatura  $T$  molekulaların' ortasha kinetikalıq energiyası menen bilay baylanısqa:

$$\left\langle \frac{mv^2}{2} \right\rangle = \frac{3}{2} kT. \quad (7.3)$$

Bul jerde proporsionallıq koeffitsient  $k = 1,380662 \times 10^{-23}$  Dj/K Boltsman turaqlısı dep ataladı. (7.3) te temperatura anıqlama sıpatında formal tu'rde kirgizilgen. Bul temperatura **termodinamikalıq temperatura** bolıp tabıladı (fizikalıq praktikumda Boltsman turaqlısının ma'nisi ta'jiriybede anıqlanadı).

(7.3)-formuludan ju'da' qızıqlı na'tiyje shıg'adı. Biz tezlikтин' en' u'lken ma'nisinin' jaqtılıqtın' vakuumdegi tezligi  $c$  ekenligin bilemiz. Sonlıqtan  $v^2$  shamasının' ornına  $c^2$  shamasın qoyamız ha'm bul jag'dayda hawa ushın (ortasha molekulalıq massa 29 g'a ten') temperaturanın' en' u'lken ma'nisinin'  $6,3 \times 10^{13}$  K nen joqarı temperaturanın' bolıwı mu'mkin emes degen juwmaq shıg'aramız<sup>3</sup>. Demek eger (7.3)-formula haqıyqatında da durıs bolatug'ın bolsa, onda  $6,3 \times 10^{13}$  K shamasınan joqarı temperaturanın' bolıwı mu'mkin emes dep juwmaq shıg'aramız. Biraq joqarı energiyalar fizikasında (ha'zirgi waqıtları elementar bo'leksheler fizikası joqarı energiyalar fizikası dep te ataydı) og'ada joqarı bolg'an ( $10^{30}$  shamasındag'ı) temperaturalar menen is alıp barıladı.

Sİ birlikler sistemasında temperatura birliği **Kelvin** bolıp tabıladı. Termodinamikalıq temperatura TSelsiya temperaturası menen  $T = t + 273,15$  qatnası boyınsha baylanısqa.



2-9 su'wret.

Galton doskasının' su'wreti.

Molekulaların' tezlikleri boyınsha bo'listiriliw haqqındag'ı ma'selenin' statistikalıq ma'sele ekenligin tolıg'ıraq tu'siniw ushın **Galton doskası** dep atalatug'ın demonstratsiyalıq a'sbap ju'da' paydalı bolıp tabıladı (su'wrette ko'rsetilgen). Bul bet jag'ı tegis mo'ldir shiyshe menen jabıl'g'an jiyi tu'rde shaxmat ta'rtibinde mıyıqlar qag'ıl'g'an doska bolıp tabıladı. Mıyıqlardan to'mende bir birine parallel bolg'an metall plastinkalar ornalaştırıl'g'an. Bul plastinkalar doska menen shiyshe arasındag'ı ken'islikti qutışılardı dep atalatug'ın o'z-ara birdey ko'lemlerge bo'ledi. Mıyıqlardıń joqarısında, a'sbaptın' ortasında sharshar ornalaştırıl'g'an. Bul sharshardan qum, biyday da'ni yamasa basqa tu'rli bo'leksheler ag'ıp tu'sedi. Eger sharshar arqalı bir bo'lekshe (biydaydın' bir da'nin) o'tkersek, bul bo'lekshe shegeler menen birqansha soqlıg'ısıwılg'a ushırap, aqır ayag'ında qutışılardıń birine barıp tu'sedi. Qaysı qutışag'a bo'lekshenin' barıp tu'setug'ınlıg'ın usı bo'lekshenin' qozg'alısına ta'sir jasaytug'ın tosınnan ushırasatug'ın faktorlardın' ko'p bolg'anlıg'ı sebepli aldın aytıw mu'mkin emes. Tek g'ana bo'lekshenin' anaw yamasa minaw qutışag'a barıp tu'setug'ınlıg'ının' itimallıg'ın aytıwg'a boladı. Bo'lekshenin' oraylıq qutışag'a barıp tu'siw itimallıg'ı en' u'lken ma'niske iye boladı dep boljaw ta'biyiy na'rse. Haqıyqatında da eger sharshar arqalı bo'lekshelerdi ag'ızsaq, a'sbaptın' oraylıq qutışalarına shettegi qutışılarg'a qarag'anda ko'birek bo'lekshe kelip

<sup>3</sup> Biz to'mende usınday temperaturag'a sa'ykes keliwshi basımdı da esaplaymız.

tu'setug'inlig'ina ko'z jetkeriwge boladı. Eger sharshar arqalı jetkilikli da'rejedegi bo'leksheler o'tse olardin' qutishalar arqalı bo'listiriliwinin' anıq statistikalıq nızamı ko'rinedi. Bul nızamalı analitikalıq formula menen de ko'rsetiw mu'mkin. Ta'jiriybe bo'lkeshelele sanı ko'p bolg'anda bul bo'listiriliw

$$y = \varphi(x) \circ A e^{-\alpha x^2}$$

iymekligine asimptotalıq jaqınlasadı. A ha'm  $\alpha$  on' ma'niske iye turaqlılar. Onin' nin' ma'nisi a'sbaptin' qurılısına baylanıslı bolıp, bo'leksheler sanına g'a'rezli emes. A turaqlısı bo'leksheler sanına baylanıslı ha'm  $\alpha$  menen normirovka sha'rti arqalı baylanıslı.

$y = \varphi(x) \circ A e^{-\alpha x^2}$  formulası **Gausstin' normal qa'teler nızamının'** formulası bolıp tabıladı. Bul formulag'a sa'ykes keliwshi iymeklik **Gausstin' qa'teler iymekligi** dep ataladı.  $\varphi(x) dx$  shaması o'lshevide  $x$  penen  $x + dx$  aralıg'ında jiberiletug'in qa'teliktin' itimallıg'ına ten'. Bul jerde  $\varphi(x)$  itimallıq tıg'ızlıg'ı bolıp tabıladı. Usınday interpretatsiyada itimallıq tıg'ızlıg'ı  $\varphi(x)$  to'mendegidey normirovka sha'rtin qanaatlantırıwı kerek:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(x) dx = A \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\alpha x^2} dx = 1.$$

Bul sha'rt tiykarında A turaqlısın  $\alpha$  turaqlısı menen baylanıstırıw mu'mkin.  $\alpha$  qanshama u'lken bolsa qa'teler iymekliginin' maksimumı ensiz (o'tkir ushlı) bolıp sa'ykes o'lshewler da'l ju'rgizilgen boladı. Sonlıqtan  $\alpha$  shaması ortasha kvadartalıq yamasa ortasha arifmetikalıq qa'telikler menen baylanıslı bolıwı kerek. Al Gausstin' qa'teler nızamının' da'llileniwi Maksvelldin' tezlikler boyınsha nızamının' da'llileniwindey boladı. Bul haqqında endi ga'p etiledi.

**Maksvell bo'listiriliwi.** Termodinamikalıq ten' salmaqlıq molekularlar arasındag'ı og'ada u'lken sandag'ı soqlıg'ısıwlar na'tiyjesinde ornaydı. Ha'r bir soqlıg'ısıwda molekula tezliginin' proektsiyaları  $\Delta v_x$ ,  $\Delta v_y$ ,  $\Delta v_z$  shamalarına tosattan o'zgeredi, qala berse tezliktin' proektsiyaları bir birinen g'a'rezsiz. Da'slep tezligi nolge ten' bolg'an molekulanın' qozg'alısın qaraymız. Jetkilikli waqıt o'tkennen keyin molekularlar og'ada ko'p sandag'ı soqlıg'ısıwlarg'a ushirag'annan tezlikler

$$v_x = \sum_i \Delta v_{xi}, \quad v_y = \sum_i \Delta v_{yi}, \quad v_z = \sum_i \Delta v_{zi}. \quad (7.4)$$

shamalarına ten' boladı.

**Bul molekulanın' tezliginin' proektsiyaları qanday nızam menen bo'listirilgen** dep soraw beriw mu'mkin. Ha'r bir proektsiya u'lken sandag'ı tosattan bolatug'in shamalardin' qosındısınan turadı. Bul tosattan ju'z beretug'in sanlar Gauss bo'listiriliwin qanaatlantıradı. Sonlıqtan (2.28) formulasına sa'ykes

$$\varphi(v_x^2) = A \exp(-\alpha v_x^2), \quad \varphi(v_y^2) = A \exp(-\alpha v_y^2), \quad \varphi(v_z^2) = A \exp(-\alpha v_z^2). \quad (7.5)$$

SHamalardin' barlıg'ı da tosattan shamalar bolg'anlıqtan, koordinata ko'sherleri bag'ıtlarının' bir birinen g'a'rezsizliginen A ha'm  $\alpha$  shamaları barlıq formulada da birdey ma'niske iye

ekenligi kelip shıg'adı. Tezliktin' X ko'sherine tu'sirilgen proektsiyasının'  $[v_x, v_x + dv_x]$  intervalında jatıw itimallıg'ı mınag'an ten':

$$dP(v_x) = \varphi(v_x^2) dv_x = A e^{-\alpha v_x^2} dv_x. \quad (7.6)$$

Tap usınday formulalar tezliktin' basqa da proektsiyaları ushın da durıs boladı. Al tezliktin'  $[v_x, v_y, v_z, v_x + dv_x, v_y + dv_y, v_z + dv_z]$  intervalda jatıw itimallıg'ı itimallıqlardı ko'beytiw formulasınan bilay anıqlanadı:

$$dP(v_x, v_y, v_z) = A^3 e^{-\alpha(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)} dv_x dv_y dv_z. \quad (7.7)$$

A turaqlısının' ma'nisi normirovka sha'rtinen anıqlanadı:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} P(v_x, v_y, v_z) dv_x dv_y dv_z = 1 \quad (7.8)$$

Eger

$$A \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\alpha v_x^2} dv_x = A \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} = 1 \quad (7.9)$$

ekenligin esapqa alsaq, onda

$$A = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}}. \quad (7.10)$$

shamasına iye bolamız.

Endi molekulanın' kinetikalıq energiyasının' ortasha ma'nisin esaplaymız:

$$\begin{aligned} \left\langle \frac{mv^2}{2} \right\rangle &= \frac{m}{2} \langle v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 \rangle = \frac{m}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) dP(v_x, v_y, v_z) = \\ &= \frac{m}{2} \frac{\alpha^3}{\pi^3} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) e^{-\alpha(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)} dv_x dv_y dv_z. \end{aligned} \quad (7.11)$$

(7.11) degi integrallar differentsiallaw jolı menen tabıladı. Mısalı:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} v_x^2 e^{-\alpha v_x^2} dv_x = \frac{\partial}{\partial \alpha} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\alpha v_x^2} dv_x = -\frac{\partial}{\partial \alpha} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} = \frac{1}{2} \alpha^{-\frac{3}{2}} \sqrt{\pi}. \quad (7.12)$$

Sonlıqtan (7.11) mına tu'rge iye boladı:

$$\left\langle \frac{mv^2}{2} \right\rangle = \frac{3m}{4\alpha}. \quad (7.13)$$

(7.3) penen (7.13) tin' on' ta'replerin ten'lestirsek

$$\alpha = \frac{m}{2kT} \quad (7.14)$$

ekenligin alamız. Onda

$$dP(v_x, v_y, v_z) = \frac{1}{\pi^{3/2}} \frac{m}{2kT} e^{-\frac{m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)}{2kT}} dv_x dv_y dv_z. \quad (7.15)$$

Tezliklerdin' bo'listiriliwi izotrop. Sonliqtan tezliklerdin' proektsiyalarinin' bo'listiriliwi bolg'an (7.15) ten tezliktin' modulinin' bo'listiriliwine o'temiz. Bul maqsette tezlikler ken'isligindagi (yamasa impulsler ken'isligindagi, su'wretti qaran'iz) sferaliq koordinatalar sistemasina o'tken maqsetke muvapiq boladi ha'm (7.15) ti qalnl'ig'ı dv, radiusı  $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$  bolg'an sferaliq qatlam boyinsha integrallaymiz. Bunnan

$$dv_x dv_y dv_z = v^2 d\Omega dv \quad (7.16)$$

an'latpasına iye bolamiz. Bul an'latpadag'ı dΩ denelik mu'yesh (usınday mu'yesh penen sferaliq qatlamnin' betinin' elementi ko'rinedi). Sferaliq qatlamnin' barliq beti boyinsha aling'an integraldin'

$$\int_{\Omega=4\pi} v^2 d\Omega = v^2 \int_{\Omega=4\pi} d\Omega = 4\pi v^2 \quad (7.17)$$

ekenligi an'sat esaplanadi. Sonliqtan (7.15) ti qalnl'ig'ı dv bolg'an sferaliq qatlam boyinsha integrallasıq

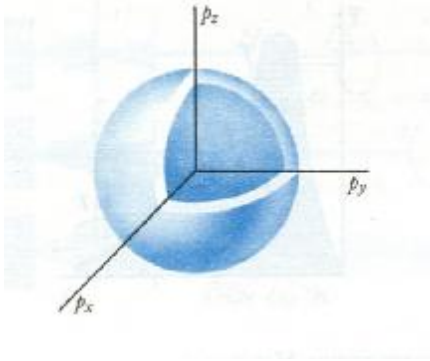
$$dP(v) = 4\pi \frac{1}{\pi^{3/2}} \frac{m}{2kT} e^{-\frac{mv^2}{2kT}} v^2 dv. \quad (7.18)$$

formulasına iye bolamiz. Bul an'latpa moduli [v, v + dv] tezlikler intervalındag'ı molekulanın' tezliginin' modulin tabıwdın' itimallıg'ın beredi. Al

$$f(v) = 4\pi \frac{1}{\pi^{3/2}} \frac{m}{2kT} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}} \quad (7.19)$$

funktsiyası **Maksvell bo'listiriliwi** dep ataladi. f(v) funktsiyası gaz molekularinin' o'z tezliklerinin' absolyut ma'nisleri boyinsha bo'listiriliwin sa'wlelendiredi. Bul bo'listiriliw Maksvell ta'repinen 1860 jılı tabıldı (29 jasında) ha'm molekulanın' tezliginin' moduli boyinsha v g'a ten' bolıwının' itimallıg'ının' tıg'ızlıg'ın beredi (Bul formulanın' durıslıg'ının' anıq da'lili Maksvell ta'repinen 1866-jılı berildi).





İmpulsler ken'isligindeki koordinatalar sistemi

Biz ha'zir D.V.Sivuxinnin' «Obshiy kurs fiziki» kitabı (Moskva. «Nauka» baspası. 1975. 552 b.) boyınsha Maksvell bo'listiriliwin ja'ne bir ret qarap o'temiz. Ma'sele: moleulanın' tezliklerinin'  $v$  ha'm  $v + dv$  ( $[v, v + dv]$  intervalında) aralıg'ında bolıwının' itimallıg'ın tabıw kerek. But itimallıqtı  $F(v)dv$  dep belgileymiz.  $F(v)dv$  nı bo'leksheler sanı  $N$  ge ko'beytsek usınday tezliklerge iye bolg'an molekulalar sanı  $dN$  di alamız. Demek

$$dN = NF(v)dv.$$

Al  $F(v)$  bolsa (7.19) dag'ı  $f(v)$  g'a ten'. Bunday jag'dayda

$$f(v) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{m}{2kT} \right)^{3/2} \exp \left\{ -\frac{mv^2}{2kT} \right\}.$$

A.K.Kikoin menen İ.K.Kikoinnıń' «Molekulyarnaya fizika» kitabında (Moskva. «Nauka» baspası. 1976. 480 b.) tezlikleri  $[v, v+dv]$  intervalındag'ı molekulaların' salıstırmalı sanı ushın

$$\frac{dn}{n} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{m}{2kT} \right)^{3/2} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}} dv$$

formulası berilgen. Demek <sup>4</sup>

<sup>4</sup> Haqıyqatında da, eger biz  $f(v)$  ushın usı formuladan paydalansaq «mathematica 5» programmalaw tilinde  $T = 300$  K, 1500 K, 3000 K temperaturaları ushın mınaday programma jazamız:

```
m = 2 * 10^-27
k = 1.38 * 10^-23
T1 = 300
T2 = 1500
T3 = 3000
z1 = 4 * Pi * (m / (2 * Pi * k * T1))^(3/2)
z2 = 4 * Pi * (m / (2 * Pi * k * T2))^(3/2)
z3 = 4 * Pi * (m / (2 * Pi * k * T3))^(3/2)
Plot[{z1 * v^2 * Exp[-m * v^2 / (2 * k * T1)], z2 * v^2 * Exp[-m * v^2 / (2 * k * T2)], z3 * v^2 * Exp[-m * v^2 / (2 * k * T3)]}, {v, 0, 15000}]
```

Na'tijede mınaday grafiklerdi alamız:

$$f(v) = \frac{dn}{ndv} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \frac{m}{2kT} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}}.$$

(7.18) benen (7.19) formulalar ja'rdeminde tezlikleri berilgen intervalda bolg'an (biz qarap atirg'an jag'dayda  $[v, v + dv]$  intervalında) molekulalardın' sanın tabıw mu'mkin. Bunday molekulalar sanı

$$dn(v) = n dP(v). \quad (7.20)$$

$n$  arqalı sistemadag'ı barlıq molekulalardın' sanı belgilengen. Bul intervaldag'ı molekulalardın' salıstırmalı sanı

$$\frac{dn(v)}{n} = dP(v) = f(v) dv. \quad (7.21)$$

Tezliktin' modulinen g'a'rezli bolg'an  $\varphi(v)$  funktsiyasının' ortasha ma'nisi ortasha ushın formula ja'rdeminde esaplanadı:

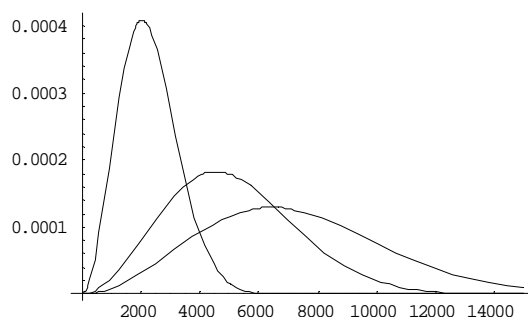
$$\langle \varphi \rangle = \int_0^\infty \varphi(v) f(v) dv. \quad (7.22)$$

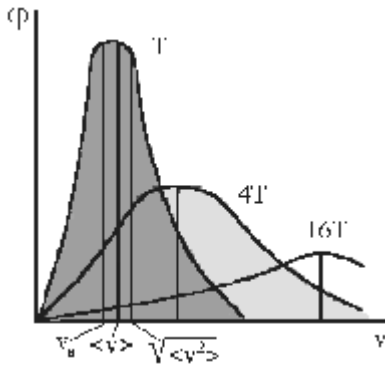
Bul formuladan  $\langle v \rangle$  menen  $\langle v^2 \rangle$  shamaların anıqlap

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}, \quad \sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}. \quad (7.23)$$

formulaların alamız.

Maksvell bo'listiriliwi 2-10 su'wrette keltirilgen. Bul iymektiktin' maksimumına





2-10 su'wret.

Maksvell bo'listiriliwi.

sa'ykes keliwshi  $v_{itim}$  tezligi **en' itimal tezlik** dep ataladi. Bul ma'nis ekstremum sha'rti

$\frac{df(v)}{dv} = 0$  ten'ligi ja'rdeminde aniqlanadi, Yag'nay

$$v_{itim} = \sqrt{\frac{2kT}{m}}. \quad (7.24)$$

(8-18) ha'm (8-19) lardi salistirip Maksvell bo'listiriliwinin' xarakterli tezliklari arasindag'i baylanislardi alamiz:

$$\sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{\frac{3\pi}{8}} \langle v \rangle = \sqrt{\frac{3}{2}} v_{itim}. \quad (7.25)$$

O'jire temperaturalarinda hawadag'i kislorod penen azot molekulalarinin' tezliklari shama menen (400-500) m/s qa ten'. Vodorod molekulasinin' tezligi usinday jag'daylarda shama menen 4 ese u'lken. Temperaturaning' o'siwi menen tezliktin' shaması  $\sqrt{T}$  ge proporsional o'sedi.

**Idis diywalına molekulalardın' urılıwının' jiyiligi.** X ko'sherin diywalg'a perpendikulyar etip bag'itlaymiz ha'm molekulalar kontsentratsiyasın  $n_0$  arqalı belgileymiz. Bunday jag'dayda diywalg'a bag'itlang'an molekulalar ag'ısının' tıg'ızlıg'ı

$$n_0 f(v_x^{(+)}, v_y, v_z) v_x^{(+)} dv_x^{(+)} dv_y dv_z \quad (7.26)$$

shamasına ten'.  $v_x^{(+)}$  tezliktin' X ko'sherinin' on' bag'itındag'ı qurawshısı (tezligi diywal betine qarama-qarsı bolg'an molekulalar ag'ısqa qatnaspaydı). Onday jag'dayda idis diywalı betinin' bir birligindegi soqlıg'ısıwlar sanı

$$v = n_0 \frac{m}{2\pi kT} \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty e^{-\frac{m(v_y^2 + v_z^2)}{2kT}} dv_y dv_z \int_0^\infty e^{-\frac{mv_x^2}{2kT}} v_x dv_x = n_0 \sqrt{\frac{kT}{2\pi m}}. \quad (7.27)$$

(7.23) formulasın na'zerde tutıp aqırg'ı formulanı bilay jazamız:

$$v = \frac{n_0 \langle v \rangle}{4}. \quad (7.28)$$

Misal retinde tezligi 195-205 m/s aralig'ında bolg'an 0.1 kg kislorod molekulalarinin' [O<sub>2</sub>] molekulalar sanin esaplayiq.

195 ten 205 ke shekemgi interval ju'da' kishkene bolg'anliqtan ortasha ma'nis haqqindag'i teoremadan paydalanıwg'a boladı ha'm

$$\frac{\Delta n}{n} \gg 4\pi \frac{m}{2\pi kT} \frac{\bar{v}}{v} e^{-\frac{mv^2}{2kT}} v^2 dv,$$

bul jerde  $v = 200$  m/s,  $dv = 10$  m/s. Kislorodtin' salıstırmalı molekulalıq massası  $M_{O_2} = 32$ , molekula massası  $m = 3291 \times 10^{-27}$  kg =  $5.31 \times 10^{-26}$  kg. Kislorodtin' mollik massası  $M = 32 \times 10^{-3}$  kg/mol. Sonlıqtan 0.1 kg kislorodta  $n = \frac{0.1}{32 \times 10^{-3}} \times 96.02 \times 10^{23} = 1.88 \times 10^{24}$  molekula bar.  $kT = 1.38 \times 10^{-23} \times 273 \text{ Dj} = 3.77 \times 10^{-21} \text{ Dj}$ . Sonlıqtan  $\Delta n = 2.3 \times 10^{22}$ .

**Molekulalıq qozg'alıstın' kinematikalıq xarakteristikaları. Kese-kesim.** Gazdegi molekula o'zinin' qozg'alıw barısında ko'p sanlı soqlıg'ısıwılarg'a ushıraydı ha'm o'zinin' qozg'alıs bag'ıtın o'zgerledi. Biraq soqlıg'ısıwlar basqa da na'tiyjederge de alıp keliwi mu'mkin. Mısalı bazı bir jag'daylarda gazde ionlasıw baqlanadı. Eger uran atomları yadroları jaylasqan ko'lemde neytron qozg'alatug'ın bolsa, onda bul neytron soqlıg'ısıwdın' na'tiyjesinde yadro ta'repinen uslap alınıp, yadronın' bo'liniwine alıp keliwi mu'mkin. Usı mu'mkin bolg'an ayqın qubılıslardıń ju'z beriwi tek g'ana itimallıg'ı arqalı boljanıwı mu'mkin. *Ayqın na'tiyjege iye soqlıg'ısıwdın' itimallıg'ı kese-kesim menen ta'riplenedi.*

Soqlıg'ısıwshı bo'lekshe noqatlıq dep esaplanadı, al usı bo'lekshe soqlıg'ısatug'ın nishana-bo'leksheler ken'islikte kelip soqlıg'ısatug'ın bo'lekshenin' qozg'alıs bag'ıtına perpendikulyar bag'ıtta bazı bir  $\sigma$  kese-kesimine iye dep sanaladı. *Bul geometriyalıq emes, al oyda alıng'an maydan bolıp tabıladı. Qarap atırılğ'an soqlıg'ısıwdın' itimallıg'ı bilay anıqlanadı: soqlıg'ısıwshı bo'lekshe basqa bo'leksheler menen ta'sirlespesten tuwrı sızıq boyınsha qozg'alıp usı  $\sigma$  maydanına kelip soqlıg'ısıw itimallıg'ına ten' bolıwı kerek.*

Meyli bo'lekshe kontsentratsiyası  $n_0$  ge ten' bolg'an bo'leksheler jaylasqan ko'lemnin' kese-kesimi  $S$  ke ten' bolg'an maydanına kelip tu'ssin.  $dx$  qalın'lıg'ına iye qatlamda  $n_0 S dx$  bo'lekshe jaylasadı. Olardıń kese-kesimlerinin' qosındısı  $S$  maydanının'  $dS = \sigma n_0 S dx$  bo'limin jawıp turadı. Bunnan kelip tu'siwshi bo'lekshenin'  $dx$  qatlamındag'ı qanday da bir bo'lekshe menen soqlıg'ısıwınin' itimallıg'ı

$$dP = \frac{dS}{S} = \sigma n_0 dx \quad (7.29)$$

shamasına ten'. *Bul qarap atırılğ'an protsess ushın kese-kesim  $S$  tin' anıqlaması bolıp tabıladı.*  $dP$  itimallıg'ı soqlıg'ısıw protsessinin' ayqın nızamlılıqların esapqa alıw jolı menen esaplanadı yamasa eksperimentte o'lishenedi, al kese-kesim (7.29)-formulası boyınsha alınadı.

Misal. Soqlıg'ısıw protsessinde kelip tu'siwshi bo'lekshe soqlıg'ısıwdın' aqibetinde qozg'alıs bag'ıtın o'zgerledi ha'm berilgen bag'ıt boyınsha qozg'alıstan shıg'ıp qaladı. Uran yadroları jaylasqan ken'isliktegi neytronın' qozg'alısında bolsa protsess yadrolardıń birewi ta'repinen neytronı jutip alınıwdan turadı. Eki jag'dayda da esaplanıwshı yamasa o'lisheniwshı shama bo'lekshe  $dx$  aralıg'ın o'tkendegi waqıyanın' itimallıg'ı bolıp tabıladı. Al usı mag'lıwmatlardın'

ja'rdeminde esaplanatug'ın shama kese-kesim  $\sigma$  bolıp tabıladı. Al bul kese-kesim bunnan keyingi esaplawlarda ha'm talqılawlarda en' da'slep berilgen shama sıpatında paydalanıladı.

**Erkin ju'rgen joldın' ortasha uzınlıg'ı.** A'llette  $\sigma$  ha'm  $n_0$  shamaları x tan g'a'rezli emes. Sonlıqtan waqıyanın' itimallıg'ı kelip tu'siwshi bo'lekshenin' o'tken jolına proporsional o'sedi. Usı itimallıq birge ten' bolg'an joldın' uzınlıg'ı  $\langle l \rangle$  *erkin ju'riw jolının' ortasha ma'nisi* dep ataladı. Bul ma'nisti anıqlaw ushın (7.29) den  $\sigma n_0 \langle l \rangle = 1$  alınadı ha'm

$$\langle l \rangle = \frac{1}{\sigma n_0}. \quad (7.30)$$

Bul shama nıshana zatı ishinde soqlıg'ıwshı (kelip tu'siwshi) bo'lekshenin' ortasha erkin ju'riw jolı bolıp tabıladı.

**Soqlıg'ısıwların' kese-kesimin eksperimentte anıqlaw.** Meyli kelip tu'siwshi bo'leksheler da'stesi X ko'sheri bag'ıtında qozg'alsın (2-11, 2-12, 2-13 su'wretlerdi qaran'ız). Da'ste bo'leksheleri basqa bo'leksheler menen soqlıg'ısıp o'zlerinin' bag'ıtın o'zgertedi ha'm da'steden shıg'ıp kaladı. Sonlıqtan da'stedegi bo'leksheler ag'ısı I(x) zat arqalı o'tiw barısında, Yag'nıy x tın' osiwi menen kemeyedi. dx qatlammın o'tkendegi bo'lekshelerdin' ag'ısının' tıg'ızlıg'ının' ha'lsirewi dI(x) bo'lekshe-nıshana menen bo'lekshenin' soqlıg'ısıwlar sanına ten'. Da'stenin' bo'lekshesinin' ha'r birinin' soqlıg'ısıwının' itimallıg'ı (7.29) ge ten' bolg'anlıqtan ag'ıstın' tıg'ızlıg'ının' ha'lsirewi IdP g'a ten'. Demek tu'siwshi da'stedegi bo'leksheler ag'ısının' tıg'ızlıg'ı ushın mına ten'lemenı alamız:

$$dI = -I(x)\sigma n_0 dx. \quad (7.31)$$

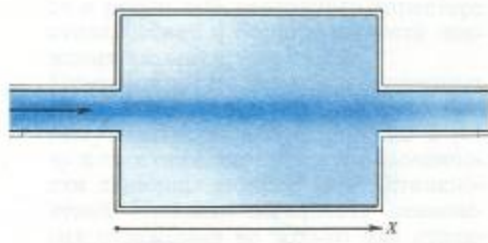
Minus belgisi x tın' o'siwi menen (Yag'nıy da'stenin' zattag'ı qozg'alısı barısında) ag'ıstın' tıg'ızlıg'ının' kemeyetug'ınlg'ın bildiredi. (7.31) ti sheshiw arqalı tabamız:

$$I(x) = I(0) \exp(-\sigma n_0 x) = I(0) \exp(-x / \langle l \rangle). \quad (7.32)$$

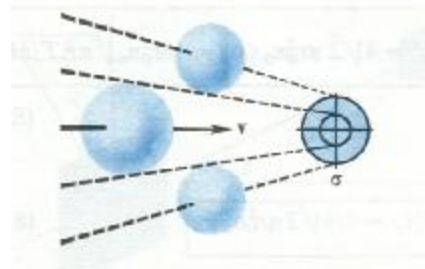
Eki qashıqlıqta qanday da bir jollar menen tu'siwshi bo'lekshelerdin' ag'ısın o'lshep (mısalı x = 0 de ha'm x tın' kanday da bir ma'nisinde) soqlıg'ısıwların' kese-kesimin bılayınsha esaplawg'a boladı:

$$\sigma = \frac{1}{n_0 x} \ln \frac{I(0)}{I(x)}. \quad (7.33)$$

Tap usınday jollar menen basqa da waqıyaların' kese-kesimi esaplanadı.

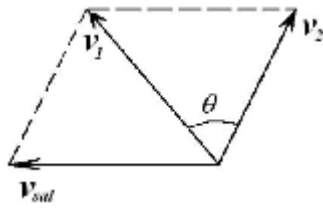


2-11 su'wret. Soqlıg'ısıwların' kese-kesiminin' maydanın eksperimentte anıqlawdı



2-12 su'wret. Qattı sharların' soqlıg'ısıwının'

tu'sindiriwshi su'wret.



kese-kesimin esaplawdı tu'sindiriwshi su'wret.

2-13 su'wret.

Ortasha salıstırmalı tezlikti esaplawg'a arnalg'an su'wret.

**Soqlıg'ısıwlar jiyiligi.** Ortasha tezlik  $\langle v \rangle$  bolg'anda erkin ju'riw jolı  $\langle l \rangle$  di bo'lekshe ortasha

$$\tau = \langle l \rangle / \langle v \rangle$$

waqıtta o'tedi. Al

$$v' = \frac{1}{\tau} = \langle v \rangle / \langle l \rangle = \sigma n_0 \langle v \rangle$$

soqlıg'ısıwlar jiyiliginin' ortasha ma'nisi (1 skundtag'ı soqlıg'ısıwların' ortasha sanı) dep ataladı.

**Qattı sferalar modelindegi soqlıg'ısıwlar ushın kese-kesim.** Gazlerdegi birdey molekulaların' soqlıg'ısıwların' u'yrengende usı molekulalardı ko'pshilik jag'daylarda bazı bir  $r_0$  radiuslı sharlar sıpatında qaraydı. Bunday jag'daylarda kese-kesimdi ha'm sonın' menen baylanısqa shamalardı esaplaw aytarlıqtay qıyınshılıqlardı payda etpeydi.

Meyli nıshana-molekulalar tınıshlıqta tursın, al olarg'a kelip soqlıg'ısıwların' molekulalar  $\langle v \rangle$  tezligi menen qozg'alatug'ın bolsın (su'wrette ko'rsetilgen). A'llette kelip tu'siwshi molekula  $x$  aralıg'ın o'tkende orayları ultanının' radiusı  $2r_0$ , biyikligi  $x$  bolg'an do'n'gelek tsilindr ishinde jaylasqa barlıq nıshana-molekulalar menen soqlıg'ısıp shıg'adı. Erkin ju'riw jolının' ortasha uzınlıg'ı ortasha bir nıshana-molekula jaylasqa tsilindrdin' biyikligine ten'. Sonlıqtan ortasha erkin ju'riw jolı ushın mına ten'lemenı alamız:

$$\pi(2r_0)^2 \langle l \rangle n_0 = 1.$$

Bunnan

$$\langle l \rangle = 1 / (4\pi r_0^2 n_0) \quad (7.35)$$

ekenligi kelip shıg'adı. (7.34) nın' tiykarında soqlıg'ısıwlar jiyiliginin' mınag'ın ten' ekenligin alamız:

$$v' = 4\pi r_0^2 n_0 \langle v \rangle. \quad (7.36)$$

Haqıyqatında gazde nıshana-molekulalar qozg'alısta boladı, al kelip tu'siwshi molekulalar ha'r qıylı tezlik penen qozg'aladı. Qala berse nıshana-molekulaların' da, kelip tu'siwshi molekulaların' da tezlikleri Maksvell bo'listiriliwi ja'rdeminde beriledi. Bunı esapqa alıw ushın barlıq talqılıwları o'zgerissiz qaldıramız, tek (7.36) degi  $\langle v \rangle$  tezligi haqqında ayılğ'anda tu'siwshi molekulaların' ortasha tezligin tu'sinemiz.  $v_1$  ha'm  $v_2$  tezlikleri menen qozg'alıwshi eki molekulanın' salıstırmalı tezligi  $v_{salist}$  mınag'an ten':

$$V_{\text{salist}} = V_1 - V_2.$$

ha'm, usıg'an sa'ykes, salıstırmalı tezliktin' absolyut ma'nisi ushin to'mendegi an'latpanı alamız:

$$v_{\text{salist}} = \sqrt{(v_1 - v_2)^2} = \sqrt{v_2^2 + v_1^2 - 2v_1v_2 \cos \theta}. \quad (7.37)$$

Bul an'latpada  $\theta$  arqalı  $v_1$  ha'm  $v_2$  tezlikleri arasındag'ı mu'yesh belgilengen (su'wretti qaran'ız).

Salıstırmalı tezliktin' ortasha ma'nisin (7.19) Maksvell bo'listiriwin esapqa alıp esaplaw za'ru'r. Sferalıq koordinatalar sistemasının' Z ko'sherin  $v_2$  bag'ıtında bag'ıtlap alamız:

$$\langle v_{\text{салыст}} \rangle = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi} \sin\theta d\theta \int_0^{\infty} dv_1 dv_2 dv_{\text{salist}} f(v_1) f(v_2) = \sqrt{2} \langle v \rangle = \sqrt{16RT/(\pi M)}. \quad (7.38)$$

Bul an'latpadag'ı  $\frac{1}{4\pi}$  ko'beytiwshisi tezliklerdin' bir birine salıstırgandag'ı mu'mkin bolg'an barlıq bag'ıtları boyınsha (Yag'nıy tolıq denelik mu'yesh  $4\pi$  boyınsha) salıstırmalı tezlikti ortashalawdı esapqa aladı. Al  $\langle v \rangle$  bolsa (7.23)-formula beretug'in Maksvell bo'listiriliwindegi molekulalardın' qozg'alısınin' ortasha ma'nisi.

Sonlıqtan soqlıg'ısıwshı molekulalardın' tezlikleri ushin Maksvell bo'listiriliwin esapqa alg'anda soqlıg'ısıwlardın' ortasha jiyiligi ha'm erkin ju'riw jolının' ortasha uzınlıg'ı ushin formulalar to'mendegidey tu'rge iye boladı:

$$v' = 4\sqrt{2}\pi r_0^2 n_0 \langle v \rangle = 16r_0^2 n_0 \sqrt{\pi RT/M},$$

$$\langle l \rangle = 1/4\sqrt{2}\pi r_0^2 n_0.$$

Hawadag'ı a'dettegi sharayatlar ushin (Yag'nıy  $n_0 \gg 10^{25} \text{ m}^{-3}$ ,  $r_0 \sim 10^{-10} \text{ m}$ ,  $\langle v \rangle \sim 500 \text{ m/s}$  bolg'anda) erkin ju'riw jolının' uzınlıg'ı  $\langle l \rangle \sim 10^{-6} = 10^{-4} \text{ sm}$ , al soqlıg'ısıwlar jiyiligi  $v' \sim 10^9 \text{ 1/s}$ .

**Molekulanın' energiyasının' o'zgeriwi soqlıg'ısıwlarda ju'zege keledi. Ayqın molekula ushin soqlıg'ısıwdın' saldarında energiyanı alıw yamasa energiyanı jog'altıw itimallıqları birdey emes: kishi energiyag'a iye molekulalar energiya aladı, al u'lken energiyag'a iye molekulalar energiyasın jog'altadı. Ha'r bir ayqın molekula jetkilikli da'rejede u'lken waqıt aralıqları ishinde kishi energiyag'a da, u'lken energiyag'a da iye boladı.**

**Kese-kesimdi anıqlag'anda nıshanag'a kelip tiyiwshi bo'lekshe noqatlıq dep qabıl etiledi. Kese-kesimnin' bo'lekshenin' geometriyalıq o'lshemlerine qatnası joq ha'm bir bo'lekshe ushin ha'r qanday protsesste ha'r qıylı kese-kesim alınadı. Kese-kesim arqalı protsesstin' itimallıg'ı ta'riplenedi.**

## 8-§. Basım

İdeal gazlardin' kinetikalıq teoriyasının' tiykarg'ı ten'lemesi. Bul ten'lemelerdin' ha'r qıylı formaları ha'm usı formalarǵ'a baylanıslı bolǵ'an nızamlıqlar. Barometrlık formula talqılanadı ha'm hawa sharı menen aerostattın' ko'teriw ku'shinin' payda bolıw mexanizmlari dodalanadı. Klapeyron-Mendeleev ten'lemesi. Dalton nızamı. Avagadro nızamı. Basımdı o'lshew. Mollik ha'm salıstırmalı shamalar.

**İdeal gazlardin' kinetikalıq teoriyasının' tiykarg'ı ten'lemesi.** Basım molekulalardın' ıdıs diywallarına urılıwının' saldarınan payda boladı. Ha'r bir molekula diywalǵ'a kelip soqlıǵ'ısıwdın' aqıbetinde og'an impuls beredi. Usının' saldarınan molekulanın' impulsı de tap sonday shamag'a o'zgeredi. Eger X ko'sherin ıdıs diywalına perpendikulyar etip bag'ıtlasaq bir soqlıǵ'ısıwdag'ı ıdıs diywalı ta'repinen alınatug'ın impuls  $2mv_x^{(+)}$  ke ten' (m arqalı molekulanın' massası belgilengen). Basım maydanı bir  $sm^2$  (yamasa bir  $m^2$ ) bolǵ'an diywalǵ'a bir sekund waqıt ishinde berilgen impulsqa ten'. Sonlıqtan basım ıdıs diywalına normal bag'ıtlang'an molekulalardın' impulsının' ekeletilgen ag'ısına ten'.

İdıs diywalına qaray bag'ıtlang'an impuls ag'ısı

$$n_0 f(v_x^{(+)}, v_y, v_z) v_x^{(+)} dv_y dv_z m v_x^{(+)} . \quad (8.1)$$

Tezliklerdegi (+) indeksi ag'ıstın' tek g'ana ıdısqa qaray bag'ıtlang'an molekular ta'repinen payda etiletug'ınlıǵ'ın bildiredi. Bul ag'ıstıǵ'ı barlıq molekulalardın' sanının' yarımın quraydı. Bunday jag'dayda

$$p_x = 2n_0 m \int_0^\infty f(v_x^{(+)}, v_y, v_z) (v_x^{(+)})^2 v_x^{(+)} dv_y dv_z = n_0 kT . \quad (8.2)$$

Tap usınday jol menen basqa qurawshılardı da tabamız:

$$p_x = p_y = p_z = p = n_0 kT . \quad (8.3)$$

Ku'tkenimizdey, gazdın' basımını izotrop ha'm sonlıqtan onı tek p arqalı, bag'ıttı ko'rsetpey belgilewge boladı. Biraq bunday jag'daydın' barlıq waqıtta da orın almaytug'ınlıǵ'ın eske alıp o'temiz. Eger ortalıqtın' mexanikalıq qa'siyetleri anizotroplıq bolsa, onda ha'r qanday bag'ıttag'ı ha'r qanday noqattag'ı tezliktin' ma'nisleri birdey bolmaydı.

Bul formuladag'ı temperaturanı (7.23) boyınsha ortasha kvadratlıq tezlik  $\langle v^2 \rangle$  arqalı an'latıp (9.3) ti bilay jazamız:

$$p = \frac{2}{3} \left\langle \frac{mv^2}{2} \right\rangle n_0 . \quad (8.4)$$

Bul ten'leme *ideal gazlardin' kinetikalıq teoriyasının' tiykarg'ı ten'lemesi dep ataladı*<sup>5</sup>.

<sup>5</sup> Biz tezliktin' en' u'lken ma'nisinin' jaqtılıqtın' vakuumdagi ma'nisi c g'a ten' ekenligin bilemiz. Sonlıqtan, eger hawa ushın ortasha kinetikalıq energiyanın'  $\langle \frac{mv^2}{2} \rangle = \frac{3}{2} kT$ , al basımınnıñ  $p = \frac{2}{3} \langle \frac{mv^2}{2} \rangle n_0$  ekenligi esapqa alsaq, onda basımınnıñ en' u'lken ma'nisinin'  $p = \frac{2}{3} \langle \frac{mc^2}{2} \rangle n_0$  shamasına ten' bolatug'ınlıǵ'ına iye bolamız (jılılıq



(9.4) ti keltirip shıg'arg'anda molekullardın' ıdı diywalına urılıwının' nızamı haqqında hesh na'rse de boljap ayılmadı. Bul protsess ju'da' quramalı ha'm molekullar menen diywaldın' materialınan ja'ne diywaldın' betinin' kaday da'rejede tegislengenligine baylanıslı. Atomlardın' diywaldan shag'ılıswı ulıwma aytqanda aynalıq shag'ılısw nızamı boyınsha ju'zege kelmeydi, Yag'nıy tu'siw mu'yeshi shag'ılısw mu'yeshine ten' emes. Ko'pshilik jag'daylarda «kosinuslar nızamı» orınlanıp, bul nızamg'a sa'ykes shag'ılıswdın' intensivligi bazı bir bag'ıtlarda usı bag'ıt penen betke normal arasındag'ı mu'yeshin' kosinusına proporsional boladı. Tu'siw mu'yeshinen bul intensivlik derlik g'a'rezli emes. Eger bet monokristaldın' kaptal beti bolsa, onda shag'ılısw nızamı kristaldın' qa'siyetlerinen g'a'rezli bolıp, ha'r qıylı bag'ıtlar boyınsha maksimumlar menen minimumlarga iye boladı. Biraq basımdı esaplag'anda olardın' hesh qaysısın da esapqa almawg'a boladı.

**Klapeyron-Mendeleev ten'lemesi.**  $n$  arqalı gazdın'  $V$  ko'lemindegi molekullardın' ulıwmalıq sanın belgileymiz.  $n_0 = \frac{n}{V}$  ekenligin esapqa alıp (8.3) ti bılay jazamız

$$pV = nkT. \quad (8.5)$$

$n$  nin' shaması tikkeley o'lshenbeytug'in bolg'anlıqtan bul ten'lemege basqasha qolaylı tu'r beremiz. Molekullardın'  $n$  molindegi molekullardın' ulıwma sanı  $n = \nu N_A$ . Al  $\nu = \frac{m}{\mu}$  ( $\mu$  arqalı molekullardın' 1 molinin' massası,  $m$  arqalı gazdın' massası belgilengen). Sonlıqtan (8.5) ti bılay jazamız:

$$pV = \nu N_A kT = \nu RT = \frac{m}{\mu} RT. \quad (8.6a)$$

Bul ten'lik **Klapeyron-Mendeleev ten'lemesi** dep ataladı. Bul ten'lemenin' ja'rdeminde barlıq izoprotsesslerdin' ten'lemeleri alınadı. Mısalı  $T = \text{const}$  bolg'anda **Boyl-Mariott ten'lemesine** iye bolamız, al  $p = \text{const}$   $r = \text{sonst}$  ta **Gey-Lyussak ten'lemesin** alamız.

$$R = kN_A = (8.31434 \pm 0.00035) \text{ Dj}/(\text{mol} \cdot \text{K}) = (8.31434 \pm 0.00035) \cdot 10^7 \text{ erg}/(\text{mol} \cdot \text{grad})$$

shaması **mollık gaz turaqlısı** dep ataladı. Zattın' moline tiyisli shamalar **mollık** dep ataladı.

**Mollık ko'lem** tu'sinigin kirgiziw arqalı (8.6a) g'a basqa tu'r beremiz. Mollık ko'lem  $V_m$  dep zattın' 1 (bir) molinin' ko'lemine aytamız:  $V_m = (\text{gaz ta'repinen iyelengen ko'lem})/(\text{gazdegi moller sanı}) = V/\nu$ . Bunday jag'dayda

$$pV_m = RT. \quad (8.6b)$$

Ko'pshilik jag'daylarda (8.6a) g'a gaz massasın kirgizedi. Zattın' massası  $m$  menen mollık massa  $M$  arasında  $M = m/\nu$  baylanısı bar. Demek

$$pV = \frac{m}{M} RT. \quad (9.7)$$

---

qozg'alısları ta'repine payda bolatugın basımnın' en' u'lken ma'nisi usınnan ibarat). Bunnan biz temperaturanın' joqarılawına baylanıslı bolg'an basımnın' shamasının' belgili bir shekke umtilatug'ınlg'ın ko'remiz. Bul jag'day a'sirese juldızlar fizikasında u'lken a'hmiyetke iye.

(8.6a) formulasına B.P.E.Klapeyron ha'm D.İ.Mendeleevlerdin' atının' beriliwi to'mendegi jag'daylarg'a baylanıslı. B.P.E.Klapeyron da'slep Boyl-Mariottın' birlesken nızamın  $pV = A(267 + t)$  tu'rinde jazdı. Bul formulada A gazdın' berilgen massası ushın turaqlı shama, t arqalı TSelsiya shkalasındag'ı temperatura belgilengen. Klapeyron gazdın' temperaturalıq ken'eyiw koeffitsienti  $1/273$  tin' ornına  $1/267$  ge ten' shama aldı. Bunnan keyin jazıw D.İ.Mendeleev ta'repinen jetilistirildi. Ol ten'lemege mollik gaz turaqlısın endirdi ha'm ten'lemenı (8.7) tu'rinde jazdı.

**Dalton nızamı.** Gazlerdin' aralaspasının' ha'r bir qurawshısının' bir birinen g'a'rezsiz ekenligi joqarıda ayılıp o'tilgen edi. Sonlıqtan ha'r bir qurawshı (8.3) ke sa'ykes o'z basımın payda etedi. Al tolıq basım ha'r bir qurawshı payda etken basımlardın' qosındısına ten':

$$p = n_{01}kT + n_{02}kT + \dots + n_{0i}kT = p_1 + p_2 + \dots + p_i. \quad (8.8)$$

Bul formulada  $p_i$  arqalı **partsiyalıq basım** belgilengen. (8.8) ten'ligi menen an'latılğ'an nızam **Dalton nızamı** dep ataladı. A'llette jetkilikli u'lken basımlarda Dalton nızamı juwıq tu'rde orınlanadı. Sebebi bul jag'daylarda aralaspasın' ha'r tu'rli qurawshıları arasında o'z-ara ta'sirlesiw sezile baslaydı ha'm na'tiyjede olar bir birinen g'a'rezsiz bolıp qala almaydı. Bul haqıyqatında da real jag'daylarda u'lken basımlarda orın aladı. Bul nızam 1801-jılı D.Dalton (1766-1844) ta'repinen ashıldı ha'm ol bul nızamdı atomlıq ko'z-qaras ja'rdeminde tu'sindirdi.

Gaz aralaspasının' qurawshılarının' partsiyalıq basımın, massasın ha'm mollik massasın sa'ykes  $p_i$ ,  $m_i$  ha'm  $M_i$  arqalı belgilep Dalton nızamı (8.7) nın' ja'rdeminde (8.7) ten'lemesin bilayınsha jazamız:

$$(p_1 + p_2 + \dots + p_i)V = \frac{m_1}{M_1}RT + \frac{m_2}{M_2}RT + \dots + \frac{m_i}{M_i}RT. \quad (8.9)$$

Gaz aralaspasının' tolıq basımın  $p = p_1 + p_2 + \dots + p_i$ , massasın  $m = m_1 + m_2 + \dots + m_i$  arqalı belgileymiz ha'm gaz aralaspasının' ortasha mollik massası  $\langle M \rangle$  shamasın kirgizemiz. Onın' shamasın  $\frac{1}{\langle M \rangle} = \frac{1}{m} \left( \frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2} + \dots + \frac{m_i}{M_i} \right)$  ten'ligi menen anıqlaymız ha'm (8.9) ten'lemesin bir qurawshıg'a iye gaz ushın jazılğ'an (8.7) ten'lemesindey etip jazamız:

$$pV = \frac{m}{\langle M \rangle} RT. \quad (8.10)$$

**Avagadro nızamı.** İdeal gazlerdin' hal ten'lemesi (8.5) tan birdey temperatura menen birdey basımlarda qa'legen gazdın' o'z-ara ten'dey bolğ'an ko'lemlerinde birdey sandag'ı molekullardın' jaylasatug'ınılıg'ı ko'rinip tur. 1811-jılı belgilengen bunday tastıyıqlaw **Avagadro nızamı** dep ataladı.

Demek qa'legen gazdın' bir moli belgili temperatura menen basımda birdey ko'lemge iye boladı. A'dettegidey sharayatlarda ( $p = 101,325 \text{ kPa}$ ;  $T = 273,15 \text{ K}$ ) bul ko'lem

$$V_m = \frac{RT}{p} = 22,41383 \text{ m}^3/\text{mol}.$$

Usınday sharayatlardag'ı molekulalardıń kontsentratsiyası **Loshmidt sanı** ja'rdeminde beriledi:

$$N_l = 2,6867754 \times 10^{25} \text{ m}^{-3} = 2,6867754 \times 10^{19} \text{ sm}^{-3}.$$

**Basımdı o'lshew.** Basımdı o'lsheytug'ın a'sbaplardı **manometrler** dep ataydı. Fizikalıq izertlewler praktikasında ha'zirgi waqıtları shama menen  $10^{-10}$  nan  $10^{11}$  Pa shamasına shekemgi basımlardı o'lshewge tuwrı keledi. Basımnın' ha'r qıylı diapazonında onı o'lsheytug'ın ha'r qıylı usıllar qollanıladı.

Manometrlerdi eki kategoriyag'a bo'ledi. Birinshi kategoriyag'a kiriwshi manometrler basımdı ku'shtin' maydang'a katnasına ten' shama retinde o'lsheydi. Bunday manometrler absolyut a'sbap bolıp tabıladı ha'm da'slepki o'lshew kuralı retinde paydalanıladı. Al basqa kategoriyag'a kiriwshi manometrler basımdı tikkeley o'lsheymeydi, al basımg'a g'a'rezli bolg'an basqa bir fizikalıq shamanı o'lsheydi.

**Mollik ha'm salıstırmalı shamalar.** Molekulalıq fizikada yaki zattın' moline tiyisli bolg'an, yaki onın' massasına tiyisli bolg'an shamalar ju'da' jiyi qollanadı. Birinshi jag'dayda olardı mollik shamalar, al ekinshi jag'dayda olardı salıstırmalı shamalar dep ataydı. Mollik shamalar a'dette (biraq barlıq waqıtta emes) m indeksi ja'rdeminde belgileydi. Mısalı mollik ko'lem  $V_m = V/v$ . Biraq mollik gaz turaqlısı R indekssiz jazıladı. Al salıstırmalı shamalar bolsa usı shamanın' belgisindey bolg'an kishi ha'rip penen belgilenedi. Mısalı salıstırmalı ko'lem  $v = V/m$ . Salıstırmalı gaz turaqlısı  $R_0 = R/M = vR/m$  tu'rinde belgilenedi.

Ko'p jag'daylarda formulalar mollik shamalar ushın da, salıstırmalı shamalar ushın da birdey tu'rge iye boladı. Sonlıqtan olardı eki ret jazıp otırıwdın' ha'm indeksler menen olardı quramalasırıwdın' za'ru'rligi joq. Biraq eger qa'teliklerge jol qoyıw mu'mkin bolg'an jag'daylar ushırasatug'ın bolsa shamanın' xarakteri onın' belgilewleri menen an'latıladı.

Mısal retinde ideal gaz ushın ten'lemenı qaraymız. (8.7) tu'rinde jazılğ'an ten'leme massası m ge ten' mollik massası M bolg'an ha'm V ko'lemin iyelewshi gaz ushın ten'leme bolıp tabıladı. Al

$$pV = vRT$$

(bul jerde  $v = m/M$ ) tu'rinde jazılğ'an an'latpa V ko'lemin iyelewshi gazdın' v moli ushın jazılğ'an ten'leme bolıp tabıladı. Tap sol sıyaqlı

$$pV_m = RT$$

tu'rinde ko'shirip jazılğ'an (bul jerde  $V_m = V/v$ ) an'latpa  $V_m$  ko'lemin iyelewshi gazdın' bir moli ushın jazılğ'an ten'leme bolıp tabıladı.

$$pv = R_0T$$

ten'lemesi bolsa ( $v = V/m$ ,  $R_0 = R/M$ ) gazdın' salıstırmalı ko'lemine tiyisli.

Ulıwmalıq teoriyalıq ma'selelerdi talqılag'anda a'dette mollik shamalar qollang'an maqsetke muwapıq keledi. Al ayqın ma'selelerdi sheshkende ha'm ma'selelerdi juwıq tu'rde sheshiw mu'mkin bolg'an jag'daylarda salıstırmalı shamalar paydalang'an qolaylı.

## 9-§. Temperatura

Termometrlik dene ha'm termometrlik shama. Temperaturanın' empirikalıq shkalası.  
Temperaturanın' absolyut termodinamikalıq shkalası. Kelvin boyınsha nol.

**Termometrlik dene ha'm termometrlik shama.** Temperatura denenin' «qızdırılǵ'anlıǵ'ın» sanlıq o'lishemi bolıp tabıladı. A'lbette «Qızdırılǵ'anlıq» tu'sinigi sub'ektiv tu'siniklerdin' katarına kiredi. «Qızdırılǵ'an» dene «qızdırılmaǵ'an» dene menen uzaq waqt bir birine tiydirilip qoyılsa «qızdırılǵ'an» deneden «qızdırılmaǵ'an» denegе jıllılıq o'tedi ha'm na'tiyjede «qızdırılmaǵ'an» denenin' temperaturası artadı dep esaplaymız. Denenin' «qızdırılǵ'anlıq» da'rejesi usı «qızdırılǵ'anlıq» qa baylanıslı bolǵ'an metariallıq denelerdin' xarakteristikaları menen o'lishenedi.

Mısalı «qızdırılǵ'anlıq» qa qattı denenin' uzınlıǵ'ı, gazdin' basımı baylanıslı boladı. Uzınlıq penen basımdı o'lishewdin' usılları jaqsı belgili. Sonlıqtan da «qızdırılǵ'anlıq» tı o'lishew a'dette basqa bir shamanı o'lishewge alıp kelledi.

«Qızdırılǵ'anlıq» tı o'lishew ushın saylap alıng'an dene *termometrlik dene* dep ataladı, al «qızdırılǵ'anlıq» tikkeley o'lishenetug'ın shamanın' o'zi *termometrlik shama* dep ataladı.

**Temperaturanın' empirikalıq shkalası.** En' aldı menen termometrlik deneni saylap alamız. Termometrlik shamanı L ha'ripi menen belgileymiz («bir» sanı emes). Termometrlik dene retinde metal sterjen alanıwı mu'mkin. A'piwayılıq ushın suwdın' qatıw noqatı menen qaynaw noqatın alayıq. O'lishewler qatıw noqatında  $L_1$ , qaynaw noqatında  $L_2$  uzınlıǵ'ın ko'rsetken bolsın. *Temperatura dep denenin' «qızdırılǵ'anlıǵ'ın» ta'ripleytug'ın shamanın' san ma'nisine aytamız.* Temperaturanın' o'zi termometrlik shama bolıp tabılmaıdı. Onın' ma'nisi termometrlik shamadan alınadı ha'm *graduslarda* an'latıladı.

Temperaturanın' bir gradusı dep

$$1^0 = \frac{L_2 - L_1}{t_2 - t_1} \quad (9.1)$$

shamasına aytamız.

Termometrlik denenin' temperaturası dep

$$t = t_1 + \frac{L_t - L_1}{1^0} = t_1 + \frac{L_t - L_1}{L_2 - L_1} (t_2 - t_1) \quad (9.2)$$

shamasın tu'sinemiz. Bul jerdegi  $L_t$  o'lishenip atırlıǵ'an «qızdırılǵ'anlıqtı» o'lshegende alıng'an termometrlik shama.

(9.1) ha'm (9.2) formulalar temperaturaların' empirikalıq shkalasın ta'ripleydi. Olar termometrlik dene menen termometrlik shama anıq saylap alıng'anda bir ma'niske iye boladı.

Empirikalıq temperaturalar mısalı retinde Tselsiya, Reomyur ha'm Farengeyt shkalaların ko'rsetiwge boladı. Bul shkalalardag'ı suwdın' qatıw ( $t_1$ ) ha'm qaynaw ( $t_2$ ) temperaturaları:

SHkala	$t_2$	$t_1$
TSelsiya	100	0
Reomyur	80	0
Farengeyt	212	32

Demek birdey «qızdırılq'anlıq» bul shkalalarda ha'r qıylı temperaturalar menen ta'riplenedi eken:

$$\begin{aligned}
 t^{\circ}\text{C} &= \frac{L_t - L_1}{L_2 - L_1} 100, \\
 t_R &= \frac{L_t - L_1}{L_2 - L_1} 180, \\
 t_F &= 32 + \frac{L_t - L_1}{L_2 - L_1} 180.
 \end{aligned}
 \tag{9.3}$$

Bul formulalarda bir termometrlik dene ha'm bir termometrlik shama alınadı dep esaplang'an. (9.3) ten bir shkaladag'ı temperaturanı ekinshi shkalag'a o'tkeriw formulası an'sat keltirilip shıg'arıladı:

$$t_R = 0,8 * t^{\circ}\text{C}, \quad t_F = 32 + 1,8 * t^{\circ}\text{C}. \tag{9.4}$$

Bir gradustın' ha'r qıylı shkalalarda ha'r qıylı ekenligin an'laymız.

Joqarıda ga'p etilgen shkalalardıń barlıg'ı da reperlik noqatlar retinde muzdın' eriw noqatı menen suwdın' kaynaw noqatın paydalanıp aling'an. Gollandiyalı shiyshe u'rlewshi usta D.Farengeyt (1686-1736) birinshi reperlik noqat retinde muzdın' as duzı menen aralaspasın' eriw noqatın aldı. Bul noqatqa  $0^{\circ}$  temperaturası berildi. Ekinshi reperlik noqat retinde muzdın' eriw noqatı alınıp og'an  $32^{\circ}$  teperaturası berildi. Bunday jag'daylarda a'dettegi atmosferalıq basımlarda suwdın' qaynaw temperaturası ushın  $212^{\circ}$  alındı. Termometrlik dene retinde sinap yamasa spirt alındı.

Frantsuz ilimpazı R.A.Reomyur (1683-1757) 1730-jılı o'zinin' shkalasın usındı. Ol baslangın reperlik noqat retinde muzdın' eriw temperaturasın aldı ha'm onı  $t_1 = 0$  dep qabıl etti. Al bir gradus retinde spirtin' o'z ko'lemin 0,001 ge ken'eytetug'm temperaturanın' osimin usındı. Bunday jag'dayda suwdın' kaynaya temperaturası ushın  $t_2 = 80^{\circ}$  alındı.

SHved astronomı A.TSelsiy (1701-1744) qaytı bolmasınan eki jıl burın (1742-jılı) jan'a shkalanı usındı. Bul shkala boyınsha muzdın' eriw noqatına 100, al suwdın' qaynaw noqatına 0 ma'nisleri berildi. Al ha'zirgi waqıtlardag'ı muzdın' eriw ushın  $0^{\circ}\text{C}$  ha'm suwdın' kaynaw noqatı ushın  $100^{\circ}\text{C}$  nın' jazılıwı keyinirek paydalanıla basladı.

**Temperaturalardıń absolyut termodinamikalıq shkalası.** Termometrlik dene ushın qoyılatur'ın talaplar usınday dana retinde ideal gazdı alıw haqqındag'ı pikirdi payda etedi. Ideal gazdın' hal ten'lemesi  $pV = \nu RT$  termometrlik shama retinde da'l o'lshehiwi mu'mkin bolg'an V yamasa p shamaların alıwdın' mu'mkin ekenligin ko'rsetedi. Bunday termometrlik denede qaytadan o'lshewler ju'rgizgende da'slep kidey shamalardıń da'l alinatug'inlig'ına gu'man tuwılmaydı. Biraq bunday dene ta'biyatta bolmaydı. Usıg'an baylanışlı qa'siyetleri ideal gazge jaqın keletug'm gazdı saylap alıwg'a boladı. Eksperiment jetkilikli da'rejede siyreketilgen gazdın' qa'siyetlerinin' ideal gazdın' qa'siyetlerine jaqın ekenligin ko'rsetedi. Sonlıqtan olardı

termometrlik dene retinde paydalanıw mu'mkin. İdeal gazdin' ten'lemesi bolg'an (8.6a) u'sh o'zgermeli shamanı o'z ishine aladı. Sonlıqtan bul ten'leme temperaturanın' anıqlamasın ha'm eki nızamdı qamtıydı dep esaplawg'a boladı. Bul eki nızam sıpatında Boyle-Mariott ha'm Gey-Lyussak nızamların alıwg'a boladı.

Termometrlik shamalar retinde p yamasa V shamaların alıw mu'mkin. Eger V alınatug'ın bolsa Gey-Lyussak nızamı nızam bolıwdan qaladı ha'm ol qabil etilgen temperaturanın' anıqlamasının' na'tiyjesi bolıp qaladı. Bul jag'dayda ideal gazdin' ekinshi g'a'rezsiz nızamı retinde formulası  $\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$  bolg'an SHarl nızamı alınadı.

Reperlik noqatlar retinde suwdın' eriw ha'm qaynaw temperaturaların alıwg'a boladı. Bul temperaturalar  $T_1$  ha'm  $T_2$  arqalı belgileymiz. Anıqlama boyınsha usı temperaturaların' ayırması 100 ge ten' bolatug'ınday etip alınıwı mu'mkin, Yag'nıy  $T_2 - T_1 = 100$ . Termometrlik shama sıpatında basımdı alamız. Eksperimentte qa'siyetleri ideal gazdin' qa'siyetlerine jaqın etip alıng'an gazdin' suwdın' eriw temperaturasındag'ı  $p_1$  ha'm qaynaw temperaturasındag'ı  $p_2$  basımların o'lshew mu'mkin. Usınday o'lshewlerdin' na'tiyjesinde 1,3661 sanı alıng'an. Demek  $T_1$  menen  $T_2$  lerdi esaplaw ushın eki ten'lemege iye bolamız:  $T_2 - T_1 = 100$  ha'm  $T_2 / T_1 = 1,3661$ . Olardı sheshiw  $T_1 = 273.15$  K ha'm  $T_2 = 373.15$  K shamaların beredi. Solay etip temperaturalar shkalası tolıq belgilenip alınadı.

Biraq joqarıda aytilg'anday etip temperaturalar shkalasın qabil etiw tolıg'ı menen qanaatlandırılıq emes. Sebebi suwdın' eriw menen qaytaw temperaturası basımdan g'a'rezli. Sonlıqtan SI sistemasında suwdın' eriw temperaturasına 273,16 K, al temperatura birliğı retinde suwdın' eriw temperaturası menen absolyut nol arasındag'ı ayırmanın'  $1/273,16$  bo'legi qabil etilgen.

Termometrlik dene retinde ideal gazdi qabil etip temperaturanı

$$T = \frac{273,16}{p_0} p \quad (9.5)$$

formulası menen esaplawg'a boladı.  $p_0$  suwdın' eriw temperaturasındag'ı basım, p arqalı o'lsheyip atırg'an temperaturadag'ı basım belgilengen. O'lshew barısında gazdin' ko'lemi V turaqlı bolıp qalıwı kerek.

Usınday jol menen anıqlang'an temperaturalar shkalası temperaturaların' absolyut termodinamikalıq shkalası dep ataladı.

**Kelvin boyınsha nol.** (8.6) ten'lemesinen to'mendegiler kelip shıg'adı: *İdeal gazdin' teris ma'nisli basımınan' bolmawına baylanisli absolyut termodinamikalıq temperatura belgisin o'zgerme almaydı. Reperlik temperatura retinde on' ma'nisli temperatura qabil etilgenlikten termodinamikalıq temperatura teris ma'nisti qabil ete almaydı.*

Bul talqılawlardan nollik absolyut temperaturag'a iye haldın' bar ekenligi biykarlanbaydı. Biraq ha'r qanday protsesslerdi talqılaw 0 K ge jetiwdin' mu'mkin emesligin ko'rsetedi. 0 K ge shekli sandag'ı operatsiyaların' na'tiyjesinde mu'mkin emesligi termodinamikada *termodinamikanın' u'shinshi baslaması* dep atalıwshı postulat sıpatında qabil etiledi.

Temperatura termometrlik shama bolip tabilmaydi. Sonliqtan temperaturani o'lshevi barliq vaqitda da barometrning ja'rdeminde biyiklikni o'lshevi eske tu'siredi. Barometrning ja'rdeminde biyiklik basimni o'lshevi yamasa barometrni biyiklikten erkin tu'rde taslab jiberip, oning Jer betine kelip jetemen degenshe waitti o'lshevi arqali a'melge asiriladi. Basqa joli joq.

Belgilenip aling'an shkala menen reperlik noqat bar bolg'an jag'dayda termometrlik dene menen termometrlik shamani ha'r qiyli etip saylap alg'anda emperikalik temperatura birdey ma'niske iye bolmaydi.

Temperaturaning xalqaralik a'meliy shkalasi o'lshevi a'sbaplarin an'sat kalibrovkalaw ha'm temperaturaning absolyut termodinamikalik shkalasin jetkilikli da'rejede a'piwayi ha'm da'l etip du'zip aliwdi a'melge asiriwg'a karatilg'an.

Absolyut termodinamikalik temperatura o'z belgisin o'zgerte almaydi. Bul temperaturani on' ma'niske iye dep esaplaw ulwma tu'rde qabil etilgen. Sonliqtan bunday temperatura teris ma'niske iye bolmaydi.

Absolyut termodinamikalik temperaturaning noline jetiw mu'mkin emes. Biraq qa'legen da'rejege shekem sol nolge jaqinlaw mu'mkinshiligi biykarlanbag'an.

## 10-§. Boltsman bo'listiriliwi

Idistag'1 gazler aralaspasi. Maksvell ha'm Boltsman bo'listiriwleri arasindag'1 baylanis. Boltsman bo'listiriliwin eksperimentte tekseriw. Barometrlik formula. Ko'teriw ku'shi.

**Temperaturaning sirtqi potentsial maydandan g'a'rezsizligi.** Sirtqi potentsial maydanda turg'an gazdin' toliq energiyasi  $E = \frac{mv^2}{2} + E_p$  g'a ten'. Bul an'latpada  $E_p$  arqali molekulaning potentsial energiyasi belgilengen. Potentsial maydanda qozg'alg'anda bo'lekshenin' kinetikalik energiyasi o'zgeredi. Da'slepki ko'z-qaras penen qarag'anda molekulalardin' ortasha energiyasi ha'm sog'an sa'ykes temperatura o'zgeredi dep oylaw mu'mkin. Biraq onday emes.

Joqarida ortasha kinetikalik energiya ha'm temperatura haqqinda aytilg'anlar potentsial maydanda turg'an jag'daylar ushin da orinlanadi. Maksvell bo'listiriliwi de o'zinin' a'hmiyetin toliq saqlaydi. Demek *termodinamikalik ten' salmaqliq halinda sirtqi potentsial maydanda turg'an sistemanin' barliq noqatlarinda temperatura birdey ma'niske iye boladi.*

Sirtqi potentsial maydan molekulalardin' kontsentratsiyasina u'lken ta'sirin tiygizedi.

**Boltsman bo'listiriliwi.** Molekulaning potentsial energiyasi  $E_p$  bolsa, bul molekulag'a  $F = - \text{grad } E_p$  ku'shi ta'sir etedi. X ko'sheri bag'itindag'1 ku'shlerdin' balansin qaraymiz.

Qabirg'alarinin' uzinlig'1  $dx, dy, dz$  bolg'an kubtin' ishindeg1 molekulalarg'a ta'sir etetug'in ku'sh:

$$dF_{ix} = - n_0 dy dz dx \frac{\partial E_p}{\partial x}. \quad (10.1)$$

$n_0$  arqalı molekullar kontsentratsiyası belgilengen. Kubtin'  $X$  ko'sheri bag'ıtındag'ı jaqları arasındag'ı basımlar ayırması  $\frac{\partial p}{\partial x} dx$  qa ten'. Al usı ayırmanın' bar bolıwı sebepli payda bolg'an  $X$  ko'sheri bag'ıtında ta'sir etiwshi ku'sh:

$$dF_{2x} = - \frac{\partial p}{\partial x} dx dy dz. \quad (10.2)$$

Ten' salmaqlıq halda bul ku'shler bir birin ten'estiriwi kerek, Yag'nıy

$$dF_{1x} + dF_{2x} = 0$$

yamasa

$$\frac{\partial p}{\partial x} dx = - \frac{\partial E_p}{\partial x} dx dy dz. \quad (10.3)$$

Tap usınday qatnaslar basqa koordinata ko'sherleri bag'ıtındag'ı ku'shler ushın da durıs. (11-3) tin' on' ha'm shep ta'replerin ag'zama-ag'za qosıw arqalı

$$\frac{\partial p}{\partial x} dx + \frac{\partial p}{\partial y} dy + \frac{\partial p}{\partial z} dz = - n_0 \left( \frac{\partial E_p}{\partial x} dx + \frac{\partial E_p}{\partial y} dy + \frac{\partial E_p}{\partial z} dz \right) = - n_0 dE_p. \quad (10.4)$$

an'latpasına iye bolamız. Bul an'latpadag'ı  $dp$  menen  $dE_p$  basım menen potentsial energıyanın' o'zgeriwiniñ tolıq differentsialları. (9.3) penen  $T = \text{const}$  sha'rtinen

$$dp = kT dn_0 \quad (10.5)$$

ha'm usıg'an sa'ykes

$$\frac{dn_0}{n} = - \frac{dE_p}{kT}. \quad (10.6)$$

Bul ten'lemenı  $(x_0, y_0, z_0)$  ha'm  $(x, y, z)$  noqatları arasındag'ı ıqtıyarlı alıng'an jol boyınsha integrallap **Boltsman bo'listiriwin** alamız:

$$n_0(x, y, z) = n_0(x_0, y_0, z_0) e^{-\frac{E_p(x, y, z) - E_p(x_0, y_0, z_0)}{kT}}. \quad (10.7a)$$

Bul jerde potentsial energiya  $E_p$  arqalı belgilengen.

Eger  $(x_0, y_0, z_0)$  noqatındag'ı potentsial energıyanı nolge ten' dep normirovkalasaq, Yag'nıy  $E_p(x_0, y_0, z_0) = 0$  bolsa, onda

$$n_0 = n_{00} e^{-\frac{E_p(x, y, z)}{kT}}, \quad (10.7b)$$



an'latpasına iye bolamız. Bul jerde  $n_0 = n_0(x, y, z)$ ,  $n_{00} = n_0(x_0, y_0, z_0)$ ,  $E_p = E_p(x, y, z)$ .

Eger molekularların kontsentratsiyası hesh bir jerde (hesh bir noqatta) belgisiz bolsa Boltsman bo'listiriwin bilayinsha jazıwg'a ma'jbu'r bolamız:

$$n_0 = A e^{-\frac{E_p(x,y,z)}{kT}}, \quad (10.8)$$

al normirovka turaqlısın normirovka sha'rtinen tabamız:

$$\oint_V n_0(x, y, z) dx dy dz = n,$$

bul jerde  $V$  arqalı sistemanın ko'lemi belgilengen. Bul sha'rtten (10.8) di esapqa alıp mınag'an iye bolamız:

$$\frac{n}{A} = \oint_V e^{-\frac{E_p(x,y,z)}{kT}} dx dy dz. \quad (10.9)$$

Boltsman bo'listiriwi (10.8) potentsial energiya  $E_p = E_p(x, y, z)$  tek g'ana koordinatag'a baylanisli bolg'anda emes, al basqa da o'zgermeli shamalg'a baylanisli bolg'an jag'daylarda da duris boladı. Mısalı elektrlik momenti  $r$  bolg'an polyar molekulanın kernewliligi  $E$  bolg'an sırtqı elektr maydanındag'ı potentsial energiyası  $E_p = -pE \cos \theta$ , bul jerde  $\theta$  elektr momenti vektorı menen kernewlilik vektorı arasındag'ı mu'yesh. Termodinamikalıq ten' salmaqlıqta polyar molekularların elektr momentleri (10.8) formulasında  $E_p = -pE \cos \theta$  bolg'ang'a sa'ykes denelik mu'yeshler boyınsha bo'listiriledi.

**Ildıstag'ı gazlerdin' aralaspası.** Meyli ultanının maydanı  $S$ , biyikligi  $h_0$  bolg'an tsilindr ıdista eki sorttag'ı molekular aralaspası bolsın. Birinshi sort molekularların tolıq sanı  $n_1$ , ekinshisiniki  $n_2$ , al massaları sa'ykes  $m_1$ ,  $m_2$  dep belgilensin. Biyiklikke baylanisli molekularların bo'listiriliwin tabamız.

En' da'slep ha'r bir sorttag'ı bazı bir molekulanı tabıw itimallıg'ının tek sol sorttag'ı basqa molekulanın emes, al basqa sorttag'ı molekularların da qaysı orınlarda turg'anlıg'ınan g'a'rezli emes ekenligi ba'rshege de tu'sinikli ekenligin atap o'temiz. Sonlıqtan ha'r bir sorttag'ı molekularların bo'listiriliwi (10.7a) formulası menen beriledi. Molekular qatlamının biyikligin ıdıstın to'mengi ultaninan baslap esaplaymız. Molekularların kontsentratsiyası tek biyiklik  $h$  qa g'a'rezli boladı. Molekularların potentsial energiyasın ıdıstın to'meni bolg'an  $h = 0$  de nolge ten' etip normirovkalansın.  $h$  biyikligindeki potentsial energiya  $U = mgh$  shamasına ten' boladı. Demek kontsentratsiyaların bo'listiriliwi (10.7a) g'a sa'ykes

$$n_{01}(h) = n_{01}(0) e^{-\frac{m_1 g h}{kT}}, \quad (10.10)$$

$$n_{02}(h) = n_{02}(0) e^{-\frac{m_2 g h}{kT}}.$$

Normirovka sha'rtinen

$$\begin{aligned} S \int_0^{h_0} n_{01}(h) dh &= n_1, \\ S \int_0^{h_0} n_{02}(h) dh &= n_2 \end{aligned} \quad (10.11)$$

to'mendegidey ten'likler alamız:

$$n_{01}(0) = \frac{\frac{n_1 m_1 g}{S k T}}{1 - e^{-m_1 g h_0 / (k T)}}, \quad (10.12)$$

$$n_{02}(0) = \frac{\frac{n_2 m_2 g}{S k T}}{1 - e^{-m_2 g h_0 / (k T)}}.$$

Ha'r qanday biyikliklerdegi molekulalardın' konsentratsiyalarının' qatnası:

$$\frac{n_{02}(0)}{n_{01}(0)} = \frac{n_2 m_2}{n_1 m_1} \frac{1 - e^{-m_1 g h_0 / (k T)}}{1 - e^{-m_2 g h_0 / (k T)}} \times e^{-\frac{(m_2 - m_1) g h_0}{k T}}. \quad (10.13)$$

(10.10)-formuladan biyiklikke baylanışlı salmag'ı ko'birek bolg'an molekulalardın' konsentratsiyasının' salmag'ı kemirek bolg'an molekulalardın' konsentratsiyasına salıstırg'anda tezirek kemeyetug'ınlg'ı ko'rinip tur. (10.13)-formula bolsa salmag'ı u'lken bolg'an gazdın' ıdıstın' ultanında, al salmag'ı kishi bolg'an gazdın' ıdıstın' joqarısında konsentratsiyalanatug'ınlg'ın ko'rsetedi.

(10.10) formulasınan u'lkenirek massalı molekulalardın' biyiklikke baylanışlı konsentratsiyasının' tezirek kemeyetug'ınlg'ı ko'rinip tur. (10.13)-formula awır gaz tiykarınan ıdıstın' to'meninde, al jen'il gaz ıdıstın' joqarısında ko'birek konsentratsiyalanadı.

Joqarıda keltirilgen fizikalıq shamalardın' san ma'nislerin bahalayıq. A'dettegidey jag'daylarda hawadag'ı molekulalardın' konsentratsiyası  $n_0 = 2,7 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ . ayqınlıq ushın ekinshi gazdı kislorod dep, al birinshi gazdı vodorod dep esaplayıq. Hawanın temperaturası  $T = 300 \text{ K}$  ( $t = 27^\circ \text{C}$ ).  $m_1 = 3,34 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ,  $m_2 \gg 16 m_1$ .  $kT \gg 4,14 \times 10^{-21} \text{ Dj}$ ,  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ . Bunday sharayatlarda ju'da' u'lken emes  $h$  larda eksponentialardın' ko'rsetkishlerinin' bir birinen parqı ju'da' az. Mısalı  $m_1 g h / (kT) \gg 8 \times 10^{-6} h$  ha'm  $m_2 g h / (kT) \gg 10^{-4} h$ . Eksponentsiyalıq ag'zalardı qatarg'a jayıw ha'm usının' menen birge  $\left[ \frac{L}{h} \right]$  boyınsha sıızılıq ag'zalardı saqlap qalıwg'a boladı:

$$\frac{n_{02}(h)}{n_{01}(h)} \sim \frac{e_1}{e_2} 1 - \frac{m_2 - m_1}{kT} g h \frac{1}{h} \sim (1 - 1,2 \times 10^{-4} h). \quad (10.14)$$

Solay etip ıdıstın' joqarı bo'liminde salmaqlı qurawshının' salıstırmalı konsentratsiyası kishireyedi, al jen'il qurawshının' konsentratsiyası u'lkeyedi. Bul jag'day biyiklik  $h$  tın' u'lken ma'nislerinde ayqın ko'rinedi. Ko'z aldımızg'a  $h \sim 10^4$  biyikligin keltireyik. Bunday jag'dayda (10.13)-formula mına tu'rge enedi:

$$\frac{n_{02}(h)}{n_{01}(h)} \sim e^{-1,240^{-4} h}. \quad (10.15)$$

$e^{-1,2} \gg 0,3$  bolg'anlıqtan biyiklik 0 den  $10^4$  m ge shekem o'zgergende bo'lekshelerdin' kontsentratsiyalarinin' qatnası u'shten de u'lken shamag'a o'zgeredi. Usıg'an baylanıslı biyiklik u'lken shamalarg'a o'zgermegen jag'daylarda kontsentratsiyalardin' ayırmasının' sezilerliktey u'lken shamalarg'a o'zgermese de biz joqarıda ko'rip o'tilgen jag'daylardin' hawadan jen'il bolg'an ushiw apparatlarinin' ko'teriw ku'shinin' payda bolıw sebebi bolıp tabılatur'ınlg'ın atap o'temiz.

**Maksvell ha'm Boltsman bo'listiriliwleri arasındag'ı baylanıs.** Maksvell ha'm Boltsman bo'listiriliwleri Gibbs bo'listiriliwinin' quramlıq bo'lekleri bolıp tabıladı (Yag'nıy ekewi de Gibbs bo'listiriliwine kiredi).

Gibbs bo'listiriliwi (yamasa ko'p jag'daylarda kanonikalıq bo'listiriliw dep te ataladı) bılaysınsha jazıladı:

$$P_a = A e^{-\beta E_a}.$$

Bul formulada  $\beta = \frac{1}{kT}$ ,  $E_a$  arqalı energiya belgilengen.

Temperaturanın' ortasha kinetikalıq energiyanın' ma'nisi boyınsha anıqlanatur'ınlg'ın biz jaqsı bilemiz. Usıg'an baylanıslı soraw tuwıladı: Nelikten potentsial maydanda temperatura turaqlı? Energiyanın' saqlanıw nızamı boyınsha potentsial energiya o'zgerse kinetikalıq energiya da o'zgeriske ushırawı sha'rt emes pe! Basqa so'zler menen aytqanda salmaq maydanında bo'leksheler joqarı qaray qozg'alsa olardin' kinetikalıq energiya kemeyedi, al temperaturası bolsa turaqlı bolıp qaladı (Yag'nıy temperaturanı anıqlaytug'ın olardin' ortasha kinetikalıq energiya turaqlı bolıp kaladı), al bo'lekshe to'menge qaray qozg'alsa kinetikalıq energiya artadı, al ortasha energiya turaqlı bolıp qaladı. Nelikten?

Bul jag'day bılaysınsha tu'sindiriledi: Ko'terilgende bo'leksheler jıynag'ınan en' a'steleri, en' «salqınları» ayırılıp shıg'adı. Sonlıqtan ortasha energiya anıqlang'anda bo'lekshelerdin' barlıg'ı boyınsha esaplaw ju'rgizilmeydi. Al sol biyiklikte jaylasqan «ıssıraq» molekular boyınsha esaplaw ju'rgiziledi. Eger nollik biyiklikten  $h$  biyikligine bazı bir sandag'ı molekula kelip jetse, onda bul biyikliktegi ha'r bir bo'lekshege sa'ykes keletug'ın ortasha kinetikalıq energiya nollik biyikliktegi ha'r bir bo'lekshege sa'ykes keletug'ın kinetikalıq energiya'ga ten'. Al nollik biyikliktegi «a'ctelik penen qozg'alıwshı salqın» bo'leksheler  $h$  biyikligine jete almaydı. Eger nollik biyiklikte  $\left[ \frac{E_a}{kT} \right]$  biyikligine ko'terile alatug'ınday kinetikalıq energiya'ga iye bo'lekshelerdi bo'lip ala alsaq ha'm ha'r bir bo'lekshege sa'ykes keliwshi ortasha kinetikalıq energiyanı esaplasaq, onda bul ortasha kinetikalıq energiyanın' ma'nisi nollik biyikliktegi barlıq bo'lekshelerdi esapqa alg'andag'ı ortasha kinetikalıq energiyanın' ma'nisinen artıq bolıp shıg'adı. Sonlıqtan  $h$  biyikligindeki ha'r bir bo'lekshenin' ortasha kinetikalıq energiya haqıyqatında da kemeydi dep ayta alamız. Bunday ma'niste bo'leksheler toparı joqarıg'a ko'terilgende «salqınlawdın'» ju'z bergenligin ko'remiz. Biraq, eger  $h$  biyikliginde ha'm nollik biyiklikte usı biyikliklerdegi barlıq bo'leksheler esapqa alınatur'ın bolg'anda olardin' ha'r birine sa'ykes keliwshi ortasha energiylar, sog'an sa'ykes temperaturalar birdey boladı. Bunnan *temperaturanın' turaqlılıg'ı menen bo'lekshelerdin' kontsentratsiyalarinin' o'zgerisi arasında anıq qatnas orın alatug'ınlg'ı kelip shıg'adı.*

**Planetaların atmosferası.** SHar ta'rizli dene payda etken ağırlıq maydanındag'ı m massalı bo'lekshenin' potentsial energiyası:

$$E_p(r) = -G \frac{vm}{r}. \quad (10.16)$$

Planetaların', sonın' ishinde Jerdin' atmosferası ten' salmaqlıq halda turmaydı. Jer atmosferası ten' salmaqlıq halda turmag'anlıqtan biyiklikke baylanıslı temperatura to'menleydi. Planetanın' atmosferasının' ten' salmaqlıqta turıwının' printsipinde mu'mkin emes ekenligin ko'rsetemiz. Eger de mu'mkin bolg'anda atmosferanın' tıg'ızlıg'ı biyiklikke baylanıslı (10.7a) boyınsha o'zgerer edi. Bul jag'dayda (10.7a) mına tu'rge enedi:

$$n_0(r) = n_0(r_0) \times \exp \left[ -G \frac{mM}{kT} \frac{1}{r_0} - \frac{1}{r} \right]. \quad (10.17)$$

Bul formulanı

$$n_0(r) = n_0(r_0) \times e^{-G \frac{mM}{kT} \frac{1}{r_0} - \frac{1}{r}}$$

tu'rinde de jazıw mu'mkin. Biraq e sanının' da'rejesindegi ha'riplerdin' ko'rinbey qalıwı mu'mkin bolg'anlıqtan "exp" belgisi paydalanıldı. (10.17)-formulada energiya ushın jazılğan (10.16) an'latpası esapqa alıng'an,  $r_0$  arqalı planetanın' radiusı belgilengen. (10.17)-an'latpa  $r \in \mathbb{R}$  te mınaday shekke iye:

$$n_0(r \in \mathbb{R}) \in n_0(r_0) \exp \left[ -G \frac{mM}{kT} \frac{1}{r_0} - \frac{1}{r} \right]. \quad (10.8)$$

Bul an'latpa eger atmosferada shekli sandag'ı molekula bolatug'ın bolsa, onda bul molekular pu'tkil ken'islik boyınsha tarqalıwının', Yag'nıy atmosferanın' shashırawının' kerek ekenligi bildiredi.

Aqırg'ı esapta barlıq sistemalar ten' salmaqlıq halg'a o'tiwge umtıladı ha'm planetalar atmosferasın tolıq jog'altadı. Ayda atmosfera tolıg'ı menen jog'alg'an, Marsta bolsa atmosfera ju'da' siyreklegen. Demek Ay atmosferası ten' salmaqlıqqa jetken, al Mars planetasında bolsa sol halg'a jaqınlasqan. Venerada atmosfera ju'da' tıg'ız. Demek bul planeta ten' salmaqlıq halg'a o'tiw jolnıń basında turıptı.

Atmosferanı jog'altıwdı sanlıq jaqtan qarag'anda molekularların' tezlikleri boyınsha bo'listiriliwin na'zerde tutıw kerek. Jerdin' tartıw ku'shin tek g'ana tezligi ekinshi kosmoslıq tezlikten joqarı bolg'an molekular jen'e aladı. Bul molekular Maksvell bo'listiriwinin' «quyrıg'ın» da jaylasadı ha'm olardıń salıstırmalı sanı ju'da' kishi. Biraq usı jag'dayg'a qaramastan waqıtlardıń o'tiwi menen atmosferanın' jog'alıwı sezilerliktey da'rejede boladı. Awır planetaların' atmosferaları salıstırmalı uzıq waqıtlar saqlanadı, al jen'il planetalar atmosferasın tez jog'altadı.

**Barometrlık formula.** Joqarıda keltirilgen  $p_x = p_y = p_z = p = n_0 kT$  formulası ja'rdeminde basım temperatura ja'rdeminde bir ma'nisli an'latılutug'ın bolg'anlıqtan (10.10) Boltsman bo'listiriliwi usı formula durıs boatug'ın jag'daylar ushın qosımsha esaplawlardı ju'rgizbesten-aq

ten' salmaqlıq sharayatlari ushin ( $T=\text{const}$ ) basımnın' bo'listiriwin ta'ripleytug'ın formulani jazıwg'a mu'mkinshilik beredi. Sonlıqtan izotremalıq atmosfera jag'dayında  $h$  biyikligindeki basım ha'm bir qurawshı ushin mına formulalar ja'rdeminde beriledi:

$$p_i(h) = n_{oi}(h)kT, \quad (10.19)$$

$$p_i(h) = p_i(0) \exp \left[ - \frac{m_i g h}{kT} \right].$$

Hawa tiykarıman kislorod penen azottan turadı. Sonlıqtan biyiklikke baylanıslı basımnın' o'zgeriw formulası to'mendegidey tu'rge iye boladı:

$$p(h) = p_1(h) + p_2(h) = p_1(0) \exp \left[ - \frac{m_1 g h}{kT} \right] + p_2(0) \exp \left[ - \frac{m_2 g h}{kT} \right]. \quad (10.20)$$

Demek biyiklikke baylanıslı partsiallıq basımlardıń' o'z-ara qatnası o'zgeriwi kerek. Azot penen kislorod molekularının' massaların' jaqın ekenligin esapqa alamız.

$\frac{m}{kT} = \frac{\rho_0}{p_0}$  ekenligi esapqa alsaq ( $\rho_0$  ha'm  $p_0$  nollik biyikliktegi tıg'ızlıq ha'm basım) barometrlık formulani bılay jaza alamız:

$$p(h) = p_0 \exp \left[ - \frac{\rho_0 g h}{p_0} \right]. \quad (10.21)$$

Jerdin' betinde  $p_0 = 101,325$  kPa qabıl etiledi. Biyiklikke baylanıslı temperatura o'zgermeydi dep esaplanadı.

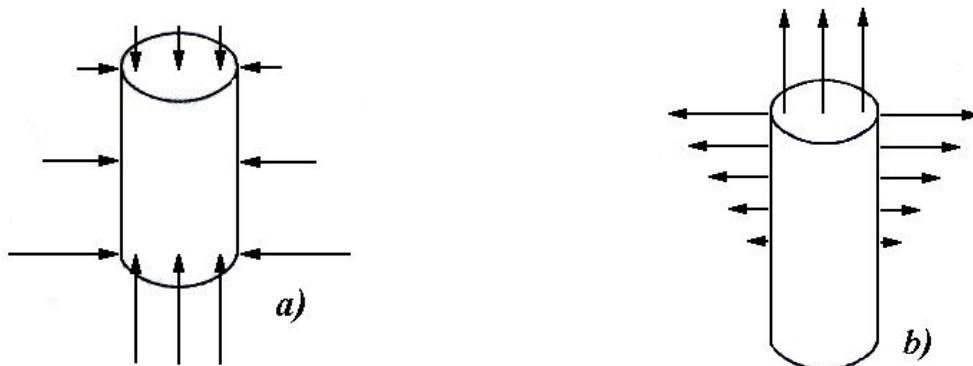
Eger biyiklikti kilometrlerde alsaq formula mına tu'ske enedi:

$$p(h) = p_0 \exp \left[ - \frac{h}{7,99} \right]. \quad (10.22)$$

Biraq haqıyqatında atmosfera statsionar emes, al temperatura bolsa biyiklikke baylanıslı to'menleydi. Usıg'an baylanıslı basım menen biyiklik arasındag'ı g'a'rezlilik sezilerliktey o'zgeredi. Ortalasırılğ'an jag'daylarda ten'iz betindeki ortasha basım  $p_0$  de ha'm temperatura  $+15^\circ\text{C}$  da 11000 m biyiklikke shekem (troposfera) xalıqaralıq barometrlık formula sıpatında mına an'latpa qabıl etilgen:

$$p(h) = 101,3 \exp \left[ - \frac{6,5h}{288} \right]^{5/255}.$$

Bul jerde  $p$  kPa lardag'ı basım, al  $h$  bolsa kilometrlerdegi biyiklik.



10-1 su'wret. Arximed ko'teriw ku'shinin' (a) ha'm aerostattın' ko'teriw ku'shinin' payda bolıwına alıp keletug'ın ku'shler sxeması.

**Ko'teriw ku'shi.** Hawadan jen'il bolg'an ushiw apparatlarındag'ı ko'teriw ku'shi qalay payda bolatug'ınlıg'ın ko'rip o'temiz. TSilindr ta'rizli qattı ıdıs berilgen bolsın. Uzunlıg'ı  $L$  bolg'an tsilindrdin' qaptal jaqları vertikal bag'ıtlang'an dep esaplaymız. TSilindrdin' u'stingi ha'm to'mengi ultanlarının' maydanları  $S$  ke ten' bolsın. Eger tsilindrdin' to'mengi ultanı janında gazdin' kontsentratsiyası  $n_0$  bolsa, u'stingi ultanı qasında  $n_1 = n_0 \exp \left[ -\frac{mgL}{kT} \right] \approx n_0 \left( 1 - \frac{mgL}{kT} \right)$ .

Demek tsilindirdin' to'mengi ultanındag'ı basım  $p_0 = n_0 kT$  joqarıdag'ı ultanındag'ı basım bolg'an  $p_1 = n_1 kT$  dan u'lken. Joqarg'ı ha'm to'mengi ultanlarga tu'sken basımlar payda etken ku'shler ko'teriw ku'shin beredi:

$$F_{\text{koteriw}} = S(p_0 - p_1) = SLn_0 mg. \quad (10.23)$$

**Bul ku'shtin' shaması gazdin' salmag'ına ten' (eger gazdin' ko'lemi denenin' ko'lemine ten' bolatug'ın bolsa). Bunday na'tiyje Arximed nızamı menen tolıq sa'ykes keledi.**

10-1 su'wrette Arximed ko'teriw ku'shinin' (a) ha'm aerostattın' ko'teriw ku'shinin' payda bolıwına alıp keletug'ın ku'shler sxeması berilgen. Bul su'wretlerde denenin' ha'r qıylı bo'limlerine ta'sir etiwshi basımlar strelkalar menen ko'rsetilgen. Sol ku'shlerdin' ten' ta'sir etiwshisi ko'teriw ku'shin beredi.

Aerostattın' ko'teriw ku'shi basqasha payda boladı. Aerostat juqa kabıqtan turıp, usı qabıqtın' to'mengi ta'repinde tesik boladı. Qabıqtın' ishinde jen'il gaz boladı (vodorod yamasa ko'binese o'rtten qa'wipsiz geliy). Ko'teriw ku'shinin' payda bolıw protsessin talqılaw ushın aerostattı to'mengi ultanı jaq quwıs tsilindr dep ko'z aldıg'a keltiriw, qala berse tsilindirdin' to'mengi ta'repindegi bazı bir bo'limi xawa menen, al qalg'an joqarg'ı bo'legi jen'ilirek gaz benen toltırılğan dep esaplaw kerek (10-1 b su'wret). Jen'il gaz benen hawanın' tiyisiw qa'ddinde (punktir menen belgilengen) gaz benen hawanın' basımı tsilindrdin' sırttag'ı atmosferalıq basımg'a ten'. TSilindirdin' diywallarına hesh qanday ku'shler tasir etpeydi. Biyikliktin' o'siwi menen jen'il gazdegi basım hawanın' basımına salıstırğ'anda a'sterek kishireyedi. Sonlıqtan jen'il gaz benen hawanın' tiyisetug'ın qa'ddidin' joqarı bo'limde jen'il gaz terepinen aerostat diywalına tu'siriletug'ın basım hawanın' aerostat diywalına tu'siretug'ın basımına salıstırğ'anda u'lken boladı. Demek tsilindirdin' diywallarının' barlıq bo'limlerine sırtqa qaray bag'ıtlang'an ku'shler ta'sir etedi. Biz qarap atırğ'an jag'dayda ko'teriw ku'shi joqarı ultang'a ta'sir etiwshi basımlar ayırmasının' esabınan payda boladı. Usı ko'teriw ku'shinin' ma'nisin anıqlaymız. Alingan na'tiyjeni bunnan aldın aling'an na'tiyje menen an'sat salıstırıw ushın tsilindir ishindegi quwıshıqtın' barlıg'ı da jen'il gaz benen toltırılğ'an, Yag'nıy jen'il gaz to'mengi ultang'a tiyedi

dep esaplaymız. Bunday jag'dayda to'mengi ultanda gazdin' basımı menen hawanın' basımı ha'm sog'an sa'ykes olardin' kontsentratsiyaları  $n_0$  de birdey boladı. Biyikliktin' o'siwi menen jen'il gaz benen hawanın' kontsentratsiyaları ha'r qıylı tezlikler menen o'zgeredi ha'm joqarg'ı ultanda

$$n_1 = n_0 \exp\left\{-\frac{m_1 g L}{kT}\right\}, \quad (10.24)$$

$$n_2 = n_0 \exp\left\{-\frac{m_2 g L}{kT}\right\}$$

shamalarına ten' boladı. Sonlıqtan tsilindrdin' joqarg'ı ultanına ta'sir etetug'in ko'teriw ku'shi

$$F_{ko'teriw}^I = S(p_2 - p_1) = SkT(n_2 - n_1) = SLn_0g(m_2 - m_1) \quad (10.25)$$

shamasına ten', Yag'nıy ko'teriw ku'shi (10.23) ke salıstırg'anda tsilindirdin' ishindegi jen'il gazdin' salmaq ku'shindey shamag'a kishi boladı (sol formulanın'  $F_{koteriw} = S(p_0 - p_1) = SLn_0mg$ . ekenligin umıtpaymız). Bul na'tiyjeni bılayınsha tu'sindiriw mu'mkin: b jag'dayında (10-1 b su'wret) tsilindrge ko'teriw ku'shi ta'sir etedi, biraq tsilindrdin' salmaq ku'shine tsilindrdin' ishindegi jen'il gazdin' salmaq ku'shin qosıw gerek boladı.

Usınday talqılaw ko'teriw ku'shi ushın durıs na'tiyjege alıp keledi. Biraq sonın' menen birge bunday talqılaw ko'teriw ku'shinin' payda bolıwının' fizikalıq ma'nisin durıs sa'wlelendire almaydı: birinshi jag'dayda ten' ta'sir etiwshisi ko'teriw ku'shin payda etetug'in basım ku'shleri tsilindrdi qısıwıg'a, al ekinshi jag'dayda tsilindrdi qampayıwıg'a umıladı (tsilindr isinedi). Bunday ayırma suw astı kemesinin' korpusında yamasa aerostattın' qabıg'anda tesik payda bolg'anda ayqın ko'rinedi (ko'binese qayg'ılı aqıbetlerge alıp keledi). Eger suw ıstı kemesi usı keme ushın belgilengen teren'likten to'menirek teren'likke tu'sse, onda suw ta'repinen qısıp taslanadı. Al aerostatta bolsa onın' joqarılawı menen qabıg'ı qampayıwıg'a shıdamay jırtılardı.

**Salmaq maydanında joqarı qaray qozg'alıwshı molekulalardın' energiyası kemeyedi. Biraq bunday jag'dayda da tezlikler boyınsha Maksvell bo'listiriliwindegi ortasha energiya o'zgeriske ushıramaydı. Ha'r bir molekulanın' energiyasının' kemeyiwinde molekulanın' ortasha energiyasının' o'zgerissiz qalıwı «kem energiyag'a iye» molekulalardın' joqarıg'a ko'terilgende ag'ıstan shıg'ıp qalıwı menen baylanışlı. Ag'ıstan shıg'ıp qalg'an molekulalar menen qosılatug'ınlig'ının' saldarınan to'menge qarap qozg'alıwshı molekulalardın' ortasha energiyası o'zgermeydi.**

Sorawlar: Salmaq maydanında molekulalar ko'terilgende olardin' kinetikalıq energiyaları kemeyedi. Biraq qanlay sebeplerge baylanışlı ten' salmaqlıq halda salmaq maydanında temperatura biyiklikke g'a'rezli emes?

Maksvell ha'm Boltsman bo'listiriwleri o'z ara qanday qatnaslarda turadı?

## 11-§. Energiyanın' erkinlik da'rejesi boyınsha bo'listiriliwi

Erkinlik da'rejesi sanı. Erkinlik da'rejesi boyınsha energiyanıq ten' bo'listirilwi haqqındag'ı teorema. Potentsial energiya menen baylanışlı bolg'an erkinlik da'rejeleri.

**Erkinlik da'rejesi sanı.** Sistemanın' halın anıqlaytug'ın g'a'rezsiz o'zgermeli shamalardın' sanı sistemanın' erkinlik da'rejesi dep ataladı. Materiallıq noqattın' qozg'alısın' bazı bir waqıt momentindegi energiyalıq halın tolıq ta'riplew ushın kinetikalıq energiyanı anıqlawg'a tezliktin' u'sh komponentasın, al potentsial energiyanı anıqlawg'a u'sh koordinata kerek. Yag'nıy bul jag'dayda altı o'zgeriwshi talap etiledi. *Ayırım alıng'an materiallıq noqattın' qozg'alsın dinamikalıq jaqtan qarag'anda bul o'zgeriwshi shamalar g'a'rezsiz shamalar bolıp qalmaydı. Qozg'alis ten'lemesi sheshilgende koordinatalardı waqtın' funktsiyaları, al tezliklerdi bolsa koordinatalar boyınsha alıng'an tuwindılar sıpatında an'latıwg'a boladı. Al noqat statistikalıq sistemanın' bo'limi bolıp tabılatug'ın bolsa onı altı erkinlik da'rejesi bar dep qaraw kerek.*

$n$  noqatlıq bo'leksheden turatug'ın statistikalıq sistema  $6n$  erkinlik da'rejesine iye boladı, olardın'  $3n$  danası kinetikalıq energiyanı alıp ju'riwshiler, al (eger sistema sırtqı potentsial maydanda tursa yaki sistemanı qurawshı bo'leksheler biri biri menen potentsial ku'shler arqalı ta'sir etetug'ın bolsa) qalg'an  $3n$  danası potentsial energiyanı alıp ju'riwshiler bolıp tabıladı. *Ta'sir etisiwdin' keyingi tu'ri ideal gazlerde bolmaydı dep esaplanadı (ideal gaz bo'leksheleri bir biri menen potentsial ku'shler arqalı ta'sir etispeydi).*

**Energiyanın' erkinlik da'rejeleri boyınsha ten'dey etip bo'listiriliwi haqqında teorema.** Statistikalıq mexanikanın' *statistikalıq ten' salmaqlıq jag'dayında sistemanın' ha'r bir erkinlik da'rejesine birdey ortasha energiya sa'ykes keledi* dep tasıyıqlawı (teoreması) a'hmiyetli orın tutadı. Bul ma'seleni matematikalıq jaqtan tolıq da'llilew og'ada quramalı. Sonlıqtan da'llilewdi keyinge kaldıramız.

Joqarıda ideal gazdin' molekulasının' ortasha kinetikalıq energiyasının'

$$\left\langle \frac{mv^2}{2} \right\rangle = \frac{3}{2} kT \quad (11-1)$$

shamasına ten' ekenligi ayılğ'an edi.  $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$  ekenligi anıq. Sonday-aq  $\langle v_x^2 \rangle = \langle v_y^2 \rangle = \langle v_z^2 \rangle$ . Onda

$$\left\langle \frac{mv_x^2}{2} \right\rangle = \left\langle \frac{mv_y^2}{2} \right\rangle = \left\langle \frac{mv_z^2}{2} \right\rangle = \frac{kT}{2}. \quad (11-2)$$

(11-2) nin' gazdin' qa'legen molekulası ushın durıs ekenligi tu'sinikli. Bunnan ideal gazdin' ha'r bir erkinlik da'rejesine birdey bolg'an  $\frac{kT}{2}$  ortasha energiya sa'ykes keledi.

Joqarıda gazdin' quramındag'ı ha'r qanday sorttag'ı molekulalardın' ortasha kinetikalıq energiylarının' birdey ekenligi da'llilengen edi. Sonlıqtan energiyanın' erkinlik da'rejeleri boyınsha birdey bolıp bo'listiriliwi ha'r qanday gazlerdin' aralaspası ushın da durıs boladı dep tasıyıqlay alamız.



Endi molekulamız eki atomnan turatug'ın bolsın. Bunday jag'dayda eki atomlı molekulalardan turatug'ın gazdi molekulaları molekulanın' quramına kiretug'ın atomlardı dep esaplanatug'ın eki sorttag'ı molekulalardın' jıynag'ı dep qarawg'a boladı. Bunday jag'dayda eki atomlı molekulanın' ortasha energiyası  $2 \times 3 \times \frac{kT}{2}$ . Bul altı  $\frac{kT}{2}$  ni eki atomlı molekulanın' altı erkinlik da'rejesine bo'listirip beriw mu'mkin. Biraq bul teoremanın' da'llileniwi bolıp tabılmaydı.

Eki atomlı molekulanın' altı erkinlik da'rejesi to'mendegilerden turadı: u'sh erkinlik da'rejesi molekulanın' massa oraynınn' ilgerilemeli qozg'alısına sa'ykes keledi. Eki da'reje molekulanın' eki o'z-ara ortogonal (perpendikulyar) ko'sherler do'geresinde aylanıwına, al bir erkinlik da'rejesi atomlardın' bir birin tutastırıwshı tuwrı boyınsha terbelisine sa'ykes keledi.

**Potentsial energiya menen baylanışlı bolg'an erkinlik da'rejeleri.** Bir birin tutastırıwshı tuwrı bag'ıtında terbeliwshı atomlar sızıqlı ostsillyator bolıp tabıladi. Bunday sızıqlı ostsillyatordın' ortasha kinetikalıq energiyası ortasha potentsial energiyag'a ten' boladı. Demek eki atomlı molekuladag'ı potentsial energiya menen baylanışqan erkinlik da'rejesine qosımsha  $\frac{kT}{2}$  energiya sa'ykes keledi. *Biraq bunday dep tastıyqlaw atomlar arasındag'ı o'z-ara ta'sirlesiw potentsial energiyası ma'nisi aralıqtın' kvadratının' funktsiyası bolg'an jag'dayda durıs boladı. Energiyanıq erkinlik da'rejesi boyınsha ten'dey bolıp bo'listiriliw qag'ıydası o'z-ara ta'sirlesiwdin' basqa nızamları orınlag'anda durıs bolmaydı.*

Energiyanın' erkinlik da'rejeleri boyınsha birdey bo'listiliwi bir erkinlik da'rejesine sa'ykes keletug'ın energiyanı na'zerde tutadı. Ayqın waqıt momentinde berilgen erkinlik da'rejesine sa'ykes keletug'ın energiya basqa erkinlik da'rejesine sa'ykes keliwshı energiyag'a ten' bolmawı mu'mkin. Tek u'lken waqıt aralıg'ında alıng'an ha'r qıylı erkinlik da'rejelerine sa'ykes keliwshı energiyalardın' ortasha ma'nisleri bir birine ten' boladı. Ergodikalıq gipotezag'a muwapıq bul ansambl boyınsha alıng'an sa'ykes erkinlik da'rejelerine sa'ykes keliwshı energiyalardın' birdey ekenligin bildiredi.

## 12-§. Broun qozg'alısının' ma'nisi

Broun bo'lekshesinin' qozg'alısın esaplaw. Aylanbalı Broun qozg'alısı.

**Broun qozg'alısının' ma'nisi.** Suyıqlıqqa aralastırılğ'an mikroskop penen baqlanatug'ın mayda bo'lekshelerdin' barlıq waqıtta qozg'alısta bolatug'ınlig'ı birinshi ret 1827-jılı R.Broun ta'repinen ashıldı ha'm onın' atı menen Broun qozg'alısı dep ataladı. Optikalıq mikroskop ja'rdeminde ko'riwge bolatug'ın mo'ldir suyıqlıqqa aralastırılğ'an sol bo'lekshelerdi (mısalı Brounnın' o'zi paydalang'an gu'l shan'ları bo'leksheleri) Broun bo'leksheleri dep ataymız. Bul qubılıstın' molekulyar-kinetikalıq tu'sindiriliwi 1905-jılı A.Eynshteyn ta'repinen berildi<sup>6</sup>. A'tirapındag'ı ko'p sanlı molekulalardın' kelip soqlıg'ısıwının' saldarınan Broun bo'leksheleri ta'rtipsiz qozg'alısta boladı.

Bul qubılıstın' ma'nisi to'mendegiden ibarat: Mayda bo'leksheler molekulalar menen birlikte bir tutas statistikalıq sistemanı payda etedi. Erkinlik da'rejesi boyınsha ten'dey bolıp bo'listiriliw

<sup>6</sup> Studentlerge A.Eynshteynnin' usı «O dvizhenii vzveshennix v pokoyasheysya jidkosti shastits, trebuemom molekulyarno-kinetisheskoy teoriey teplotı» maqalasın oqip shıg'ıwdı usınamız. Bul maqala A.Eynshteynnin' to'rt tomlıq ilimiy shıg'armalarınin' toplamının' 3-tomına kirgizilgen (Moskva, «Nauka» baspası, 1966-jıl, 108-bet).

teoreması boyınsha Broun bo'lekshesinin' ha'r bir erkinlik da'rejesine  $\frac{kT}{2}$  energiyası sa'ykes keliwi kerek. *Bo'lekshenin' u'sh ilgerilemeli erkinlik da'rejesine sa'ykes keliwshi  $3\frac{kT}{2}$  energiyası onın' massa orayının' qozg'alısın ta'miyinleydi ha'm bul qozg'alıs mikroskopta baqlanadı. Eger Broun bo'lekshesi jetkilikli da'rejede qattı bolsa ha'm o'zin qattı dene sıpatında ko'rsetse aylanıw erkinlik da'rejelerine ja'ne  $3\frac{kT}{2}$  energiyası sa'ykes keledi. Sonlıqtan o'zinin' qozg'alısı barısında bo'lekshe qozg'alıs bag'ıtın turaqlı tu'rde o'zgertip baradı.*

Aylanıw Broun qozg'alısın suyuqlıqtıq'ı mayda bo'lekshelerde emes, al basqa ob'ektlerde baqlanadı.

**Tosattan ju'zege keletug'in geziwler**<sup>7</sup>. Ortasha kinetikalıq energiyalardıń o'z-ara ten'lesiwı bo'lekshelerdin' bir biri menen ta'rtipsız tu'rdegi soqlıg'ısıwların' na'tiyjesinde ju'zege keledi. Al ha'r bir bo'lekshenin' soqlıg'ısıwdın' na'tiyjesinde ju'zege keletug'in qozg'alısı tosattan ju'zege keletug'in protsess bolıp tabıladı. bazı bir waqıt aralıqınan keyingi Broun bo'lekshesinin' awhalın qaraymız. Waqıttın' baslang'ısh momentinde bo'lekshe jaylasqan nokatqa koordinata basın ornalaştıramız ha'm onı O ha'ripi menen belgileyemiz.  $(i-1)$ -soqlıg'ısıwdan [Yag'niy  $(i-1)$  inshi dep oqıw kerek] soqlıg'ısıwıg'a shekemgi bo'lekshenin' awısıwın ta'ripleytug'in vektordı  $q_i$  arqalı belgileyemiz. Baqlaw o'tkerip bolaman degenshe bo'lekshe nolinshi awhaldan radius-vektori  $r_n$  bolg'an awhalg'a awısadı (12-1 su'wret):

$$r_n = \sum_{i=1}^n q_i \quad (12.1)$$

Baqlawlar momentleri arasındag'ı waqıt aralıqlarında bo'lekshenin' qozg'alısı og'ada kuramalı sınıq sızıqlar boyınsha ju'redi. Ta'jiriybelerdi bir neshe ret qaytalawıg'a da boladı. Ha'r bir ta'jiriybede bo'lekshenin' koordinata basınan qozg'ala baslap  $n$  adımnan keyin radius-vektori  $r_n$  bolg'an awhalg'a keletug'inlıgın ko'riwge boladı. A'lbette  $r_n$  radius-vektori ha'r ta'jiriybede ha'r qıylı boladı (uzınılg'ı da, bag'ıtı da).

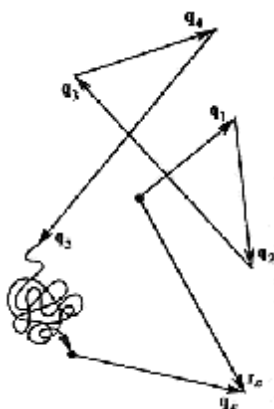
Ko'p ta'jiriybeler o'tkerilgendegi bo'lekshenin' adım o'tkennen keyingi koordinata basınan qansha aralıqqa qashıqlasqanlıg'ının' ortasha kvadrattın esaplaymız. A'lbette ortasha kvadrattı esaplawdın' anıqlaması boyınsha

$$\langle r_n^2 \rangle = \langle \sum_{i,j=1}^n q_i q_j \rangle = \sum_{i=1}^n \langle q_i^2 \rangle + \sum_{i \neq j} \langle q_i q_j \rangle. \quad (12.2)$$

ekenligin an'sat seziwge boladı. Bul an'latpadag'ı  $\langle q_i^2 \rangle$  ta'jiriybeler seriyasındag'ı bo'lekshenin' adımdag'ı awısıwının' ortasha kvadratı (usı shamanın' barlıq adımlar ushın birdey ekenligi ha'm qanday da bir on' shamasına ten' ekenligi tu'sinikli). Eqinshi summadag'ı  $\langle q_i q_j \rangle$  shaması ha'r qıylı ta'jiriybelerdegi  $i$  —adımdag'ı awısıw menen  $j$  —adımdag'ı awısıwlardıń ortasha skalyar ko'beymesi bolıp tabıladı. Bul awısıwlardıń bir birinen pu'tkilley g'a'rezsiz ekenligi ba'rshege de ma'lim, bul skalyar ko'beymenin' on' da, teris te ma'nisleri birdey jiyilikle gezlesedi. Sonlıqtan ekinshi summanın'  $\langle q_i q_j \rangle$  ko'beymelerinin' ba'ri de nolge ten' ( $i \neq j$  ma'nislerinde) ha'm usıg'an baylanış (12.2) an'latpası

<sup>7</sup> Rus tilindegi «Slushaynoe boljdenie» so'zi qaraqalpaq tiline «Tosattan ju'zege keletug'in geziwler» dep awdarılǵ'an.

tu'rine enedi. Bul an'latpada arqalı baqlawlar arasındag'ı waqıt aralıg'ı, arqalı bo'lekshenin' qashıqlasıwının' ortasha kvadratı shamasına ten' bolg'an waqıt belgilengen. Sonlıqtan ha'r bir adımdag'ı qozg'alıw bag'ıtı birdey itimallıqqa iye bolıwına qaramastan bo'lekshe waqıttın' o'tiwi menen koordinata basınan qashıqlasadı. Eger ko'p bo'lekshe qantasatug'ın ko'p ta'jiriybelerdin' izbe-izliginin' ornına koorddinata basına jaylastırılğan birdey Broun bo'leksheleri menen islengen bir ta'jiriybeni ko'z aldığ'a keltirsee bul jag'day ayrıqsha jaqsı ko'rinedi. Broun bo'lekshelerinen turatug'ın «daq» tın' waqıttın' o'tiwi menen koordinata basınan jayılatug'ınlıg'ı ba'rshege tusinikli. Bul jag'day ortashakvadrat awısıwdın' waqıttın' o'tiwi menen o'siwine sa'ykes keledi. Sonın' menen birge (12.3) tegi qashıqlasıwdın' ortasha kvadratının' waqıttın' birinshi da'rejesine proporsional ekenligi u'lken a'hmiyetke iye.



12-1 su'wret.

Broun qozg'alısındag'ı bo'lekshenin' orın awıstırıwı.

İymek sıziq penen 6- ha'm ( )-soqlıg'ısıwlar aralıg'ındag'ı traektoriya su'wretlengen.

**Broun bo'lekshesinin' qazg'alısının esaplaw.** Broun qozg'alısın ta'riplew ushın (123)-formuladag'ı nı anıqlaw kerek. Onın' ma'nisin eksperimentte shamasın anıqlaw arqalı yamasa teoriyalıq jollar menen esaplaw mu'mkin.

Broun bo'lekshesi molekulalardın' bo'lekshege ta'rtipsiz urılıwının' saldarınan payda bolatug'ın ku'shtin' ta'sirinde qozg'aladı (bul xaqında joqarıda ayılıp o'tildi). Suyıqlıqtın' jabısqaqlıg'ı saldarınan payda bolatug'ın bo'lekshenin' suyıqlıqtag'ı su'ykelis koeffitsientin arqalı belgileyemiz. Bo'lekshenin' qozg'alıs ten'lemesi

(12.4)

tu'rine iye boladı. Bul ten'lemede arqalı Broun bolekshesinin' massası, al arqalı sol bo'lekshege tosınnan ta'sir etetug'ın ku'sh belgilengen.

ag'zasının' da molekulalardın' urılıwının' saldarınan payda bolatug'ınlıg'ın atap o'tiw kerek. Biraq Broun bo'lekshesi tezligi menen sistemalı tu'rde qozg'alg'anda tezlik bag'ıtındag'ı tosınnan soqqılarg'a qarag'anda bo'lekshenin' tezligi bag'ıtına qarama-qarsı bag'ıttag'ı urıwlar ortasha ko'birek impuls beredi. Usının' saldarınan shaması menen ta'riplenetug'ın su'ykelis ku'shi payda boladı.

Basqa koordinatalar ko'sherlerine tiyisli bolg'an shamalar ushın du'zilgen qozg'alıs ten'lemeleri de joqarıdag'ıday tu'rge iye boladı. Bul ten'lemenin' eki bo'limin de qa ko'beytemiz, al ha'm ag'zaların tu'rlendiremiz:

(12.5)

(qawsırma belgisinin' joqarısında qoyılğan eki noqat sol an'latpadan waqıt boyınsha eki ret tuwındı alıw kerekligin an'g'artadı, sog'an sa'ykes bir noqat waqıt boyınsha bir ret tuwındı an'g'artadı). Mısalı  $\left(\frac{\ddot{x}^2}{2}\right) = \ddot{x}x$  ha'm  $\left(\frac{x^2}{2}\right) = \dot{x}x$  ekenligin an'sat keltirip shıg'arıwg'a boladı. Bunday jag'dayda (12.4)-ten'leme

$$\frac{m}{2} (\ddot{x}^2) - m(\dot{x})^2 = -\frac{b}{2}(\dot{x}^2) + F_x dx \quad (12.6)$$

tu'rinde jazıladı (tu'rindegi belgilewlerdi paydalanıw menen noqatlardı alıp tasladıq). Bul ten'lemenin' eki bo'limin de Broun bo'leksheleri ansambli boyınsha ortashalaymız. Usının' menen birge waqıt boyınsha aling'an tuwındının' ortasha ma'nisininin' ortasha ma'nisten aling'an tuwındıg'a ten' ekenligin inabatqa alamız. Na'tiyjede (12.6) nın' ornına

$$\frac{m}{2} (\langle \ddot{x}^2 \rangle) - \langle m(\dot{x})^2 \rangle = -\frac{b}{2} (\langle \dot{x}^2 \rangle) + \langle F_x dx \rangle \quad (12.7)$$

ten'lemesin alamız. Broun bo'lekshesinin' awısıwı barlıq bag'ıtlar boyınsha ten'dey itimallıqqa iye bolg'anlıqtan  $\langle x^2 \rangle = \langle y^2 \rangle = \langle z^2 \rangle = \frac{\langle r^2 \rangle}{3}$ . Sonlıqtan (12.3) ten

$$\langle x^2 \rangle = \frac{\alpha t}{3}$$

ekenligine iye bolamız ha'm sog'an sa'ykes  $\langle \dot{x}^2 \rangle = \frac{\alpha}{3}$ ,  $\langle \ddot{x}^2 \rangle = 0$  qatnasların alamız.  $F_x$  ku'shinin' ha'm bo'lekshenin' koordinatası  $x$  tın' tosinnan bolatug'inlig'ına ha'm olardıń bir birinen g'a'rezsiz ekenligine baylanıslı  $\langle F_x x \rangle = 0$  ten'liginin' orınlanıwı sha'rt. Usı ayılğ'anlarg'a baylanıslı (12.7)-ten'leme

$$\langle m(\dot{x})^2 \rangle = \frac{\alpha b}{6} \quad (12.8)$$

ten'lemesine aylanadı. Erkinlik da'rejesi boyınsha ten'dey bo'listiriliw teoremasına muwapıq  $\langle m(\dot{x})^2 \rangle = kT$  ha'm usıg'an sa'ykes ushın (12.8)-ten'lemeden mınanı alamız:

$$\alpha = \frac{6kT}{b}. \quad (12.9)$$

Bul an'latpadag'ı  $b$  suyıq su'ykelis ku'shin ta'ripleytug'ın shamasın teoriyalıq jollar menen de (Mexanika boyınsha lektsiyalar tekstlerindeki (28.1)-formula bolg'an Stoks formulasın eske tu'siremez) ta'jiriybede de an'latıw mu'mkin. Sonlıqtan onı belgili shama dep esaplaymız. Temperatura da belgili shama. Usıg'an baylanıslı (12.9)-formulanı esapqa alg'an xalda (12.3)-formula suyıqlıqtın' ishinde ju'rgen bo'lekshelerdin' Broun qozg'alısı haqqındag'ı ma'seleni sheshedi:

$$\langle r^2 \rangle = \frac{6kTt}{b}. \quad (12.10)$$

Aling'an formuladag'ı barlıq shamaların' ma'nisleri belgili. Sonlıqtan usı formuladag'ı baylanıslardıń durıs yamasa qa'te ekenligin eksperimentte tekserip ko'riw mu'mkin. J.B.Perren ta'repinen 1908-jıldan baslap orınlang'an ta'jiriybelerde (12.10)-formuladag'ı baylanıslardan kelip shıg'atug'ın boljawlar tastıyıqlandı. Sonlıqtan (12.10)-formuladanı tiykarlı dep esaplap onı Boltsman turaqlısı nın' ma'nisin anıqlaw yamasa anıqlang'an nın' da'lligin joqarılalıw ushın

paydalanıw mu'mkin (sebebi formuladag'ı basqa fizikalıq shamalardıń ha'mmesi de bir birinen g'a'rezsiz anıqlanadı). nı anıqlawdın' usınday usılı birinshi ret Perren ta'repinen islendi ha'm ta'jiriybeler Boltsman bo'listiriliwi ja'rdeminde anıqlang'an shama g'a sa'ykes keletug'in jaqsı na'tiyjelerdi berdi. XX asirdin' birinshi shereginde bul na'tiyjelerdin' bir birine sa'ykes keliwi molekulaıq-kinetikalıq ko'z-qaraslardın' ullı jen'isi sıpatında qabıl etildi.

(12.10)-formulag'a baylanıslı soraw tuwıladı: joqarıdag'ı ten'liktin' shep ta'repi bo'lekshenin' massasınan g'a'rezli emes, sebebi shaması tek bo'lekshenin' radiusınan g'ana g'a'rezli. Bul Stoks formulasınan ko'rinip tur:

$$b = 6\pi\mu r_0. \quad (12.11)$$

Bul formulada  $\mu$  arqalı suyuqlıqtın' jabısqaqlıg'ı,  $r_0$  arqalı suyuqlıqta qozg'alatug'ın shar ta'rizli molekulanın' radiusı belgilengen.

Ekinshi ta'repten birdey ortasha kinetikalıq energiyada bo'lekshenin' ortasha tezligi massanın' o'siwi menen kishireyedi. Sonlıqtan basqa barlıq sharayatlar birdey bolg'anda salmaqlıraq bo'leksheler jen'il bo'lekshelerge qarag'anda kishirek tezlik (intensivlik) penen gezedi. Usıg'an baylanıslı soraw payda boladı: Eger jen'il ha'm salmaqlı bolg'an bo'leksheler ha'r qıylı intensivlik penen qozg'alatug'ın bolsa, onda nenin' sebebinen olar baslang'ısh noqattan birdey ortasha tezlik penen qashıqlasadı? Bul sorawg'a juwap bılayınsha beriledi: ***Jen'il bo'leksheler salmaqlıraq bo'lekshelerge salıstırg'anda haqıyqatında da tezirek qozg'alatug'ın bolsa da olar baslang'ısh noqattan birdey ortasha tezlik penen qashıqlasadı. Demek jen'il bo'lekshelerdin' qozg'alısı haqqında «olar tezirek qozg'aladı, biraq tabısqa erise almaydı» dep ayta alamız.***

Solay etip ***Broun bo'lekshesinin' qozg'alısınan' ortasha tezligi onın' massasınan g'a'rezli, al sol bo'lekshenin' belgili bir waqt aralıg'ındag'ı baslang'ısh noqattan qashıqlasawınan' ortasha kvadratı massadan g'a'rezli emes. Sonlıqtan jen'il bo'leksheler salmaqlı bo'lekshelerge qarag'anda «tezirek qozg'aladı, biraq tabısqa erise almaydı» dep juwmaq shıg'aramız.***

**Aylanbalı Broun qozg'alısı.** Bul qubılıstı suwda aralastırılğ'an mayda bo'lekshelerde izertlew qıyın. Bul qozg'alıstı jin'ishke jipke ildirip qoyılğ'an aynanın' ja'rdeminde baqlaw mu'mkin. Hawa molekulları menen barqulla ta'sir etiskenlikten ten' salmaqlıq hal ornaydı ha'm aynanın' ha'r bir erkinlik da'rejesine energiyası sa'ykes keledi. Sonlıqtan ildirilip qoyılğ'an jiptin' a'tırıpında ayna aylanbalı terbelis jasaydı. Eger ayna betine jaqtılıq da'stesi tu'sirilse, shag'ılısqan nurdın' bag'ıtının' u'zliksiz o'zgeriwin baqlawg'a ha'm o'lsheuge boladı.

Usı terbelisler amplitudasının' ortasha kvadratın esaplaymız. Jiptin' burılıw moduli  $D$ , al buralıw ko'sherine salıstırg'andag'ı aynanın' inertsia momenti  $J$  bolsın. Aynanın' ten' salmaqlıq halınan burılıw mu'yeshin  $\varphi$  arqalı belgileyik. Buralıw terbelisleri ten'lemesi mınaday tu'rge iye:

$$J\ddot{\varphi} = -D\varphi. \quad (12.12)$$

Bul ten'lemedegi minus belgisi jiptin' serpimliliginin' ku'sh momenti aynanı ornına alıp keliwge qaray bag'ıtlang'anlıg'ın ko'rsetedi. Ten'lemenin' eki ta'repin de  $\ddot{\varphi}$  shamasına ko'beytip ha'm integrallap jiptin' terbelisindegi energiyanın' saqlanıw nızamın alamız:

$$\frac{1}{2}J\dot{\varphi}^2 = \frac{1}{2}D\varphi^2. \quad (12.13)$$

Kishi buralıw terbelisleri garmonikalıq terbelis bolıp tabıladı. Sonlıqtan:

$$\frac{1}{2}J\langle\dot{\varphi}\rangle^2 = \frac{1}{2}D\langle\varphi^2\rangle. \quad (12.14)$$

Bul jerde energiyanın' erkinlik da'rejeleri boyınsha ten' bo'listiriliwi teoreması paydalanılğ'an. Sonlıqtan aynanın' Brounıq burılıw terbelisleri ushın mına an'latpanı alamız:

$$\langle\varphi^2\rangle = \frac{kT}{D}. \quad (12.15)$$

Bul shamanı o'lshew mu'mkin. Mısalı  $T \approx 290 K$ ,  $D = 10^{-15} N \cdot m$  bolğ'an jag'dayda  $\langle\varphi^2\rangle = 4 \cdot 10^{-6}$ . Bul shamanı eksperimentte o'lshewge boladı. Jiptin' parametrlerin, temperaturanı bilip,  $\langle\varphi^2\rangle$  shamasın eksperimentte o'lshep (12.14)-formula boyınsha  $k$  turaqlısının' ma'nisin esaplaw mu'mkin. Usınday jollar menen anıqlang'an  $k$  turaqlısı Boltsman bo'listiriliwi ha'm joqarıda u'yrenilgen ilgerilemeli Broun qozğ'alısı ja'rdeminde aling'an turaqlısı menen birdey bolıp shıg'adı. Solay etip

Broun qozğ'alısı makroskopiyaq paramatrlardi o'lshew arqalı molekulaq turaqlı nı tikkeley anıqlaw jolın ashıp beredi.

Ekinshi ta'repten ideal gaz ten'lemesi ja'rdeminde jaqsı da'rejede ta'riplenetug'in gazlerdi izertlew makroskopiyaq parametr bolıp tabılaturg'in mollik gaz turaqlısı di anıqlawg'a mu'mkinshilik beredi.  $R$  menen  $k$  turaqlıların bile otırıp formulası ja'rdeminde sistemalardı mikroskopiyaq qa'siyetlerin ta'ripleytug'in ja'ne bir a'hmiyetli shama bolgan Avagadro sanın esaplaw mu'mkin:

$$N_A = \frac{R}{k}. \quad (12.16)$$

### 13-§. Maksvell-Boltsman bo'listiriwi

Bo'lekshelerdin' bir birinen parqının' joqlıg'ı. Boze-Eynshteyn ha'm Fermi-Dirak modelleri.

Maksvell-Boltsman bo'listiriliwi formulasının' Boze-Eynshteyn ha'm Fermi-Dirak statistikalarının' dara jag'dayı sıpatında. Bir birinen ayrılatug'in bo'lekshelerdin' energiya boyınsha tarqalıwı.

Usı waqıtlarg'a shekem ko'p bo'lekshelerden turatug'in sistemalardı qarag'anımızda bo'leksheler birdey bolğ'anı menen bir qatar da ha'r bir bo'lekshenin' o'zine ta'n o'zgesheligi bar dep qabil etildi. Sonlıqtan mikrohallardı sanı esaplang'anda eki bo'lekshe orın almastırg'andag'ı mikrohallar birdey emes dep esaplandı. Bir birinen parqı bar bo'lekshelerdin' usınday modeli **Maksvel-Boltsman modeli** dep, al usınday tiykarda aling'an statistikalıq teoriya **Maksvel-Boltsman statistikası** dep ataladı.

Bizge bir bo'leksheni ekinshisinen ayırıw belgileri belgili emes. Sebebi anıqlama boyınsha barlıq bo'leksheler birdey. **Bazı bir hallarda turg'an eki birdey bolğ'an bo'leksheni ko'z aldımızg'a elesletemiz. Bunday jag'dayda usı eki bo'lekshe orın almastırg'anda fizikalıq situatsiyada hesh na'rsenin' o'zgermeytug'inlig'ı tu'sinikli na'rse.**

Eger eki elektron alıp qaralsa olardıń bir birinen parqının' joqlıg'ı o'z o'zinen tu'sinikli. Eger bo'lekshelerdi bir birinen parqı joq dep esaplasaq, mikrohallar sanın esaplawdın' Maksvel-Boltsman modelinendegiden o'zgeshe basqa usıllardan paydalanıw kerek.

**Boze-Eynshteyn menen Fermi-Dirak modelleri.** Bo'lekshelerdin' bir birinen parqı joq dep qaralaturug'in modeller Boze-Eynshteyn menen Fermi-Dirak modelleri bolıp tabıladı.

Sonin' menen birge mikrohاللarg'a bo'lekshelerdin' qatnası boyınsha bul modeller bir birinen ayrıladı. Berilgen halda tek g'ana bir bo'lekshe bola aladı dep esaplanaturug'in modeldi Fermi-Dirak modeli dep ataymız. Al Boze-Eynshteyn modelinde berilgen halda qa'legen sandag'ı bo'lekshe turıwı mu'mkin. Da'lirek aytqanda Boze-Eynshteyn modelinde ha'r bir kvant halında qa'legen sandag'ı bo'lekshe jaylasıwı mu'mkin, al Fermi-Dirak modelinde - tek bir bo'leksheden artıq emes. Haldın' tek g'ana energiyasınin' ma'nisi boyınsha emes, al basqa da parametrlar menen ta'ripleneturug'inlig'in atap o'temiz. Mısalı birdey energiyalı, biraq bo'lekshenin' impulsinin' bag'ıtı boyınsha ayrılaturug'in hallar ha'r qıylı hallar bolıp tabıladı. Sonlıqtan da'lirek tu'rde bılay tastıyıqlaymız: **Boze-Eynshteyn modelinde ha'r bir kvant halında qa'legen sandag'ı, al Fermi-Dirak modelinde tek g'ana bir bo'lekshe tura aladı.** Boze-Eynshteyn modeline tiykarlang'an statistikalıq teoriya **Boze-Eynshteyn statistikası** dep ataladı.

**Maksvel-Boltsman statistikası formulası Boze-Eynshteyn ha'm Fermi-Dirak statistikalari formulalarınin' shektegi dara jag'dayı** bolıp tabıladı. Real bo'leksheler bir birinen parqı joq, sonlıqtan da olar Maksvell-Boltsman modeline sa'ykes kelmeydi ha'm yaki Boze-Eynshteyn, yaki Fermi-Dirak statistikasına bag'ınadı. V.Pauli ta'repinen pu'tin spinge iye bo'lekshelerdin' Boze-Eynshteyn, al yarım pu'tin spinge iye bo'lekshelerdin' Fermi-Dirak statistikasına bag'ınaturug'inlig'ı anıqlandı. Maksvell-Boltsman statistikasına bag'ınaturug'in bo'leksheler joq. Biraq sog'an qaramastan bul statistika ko'pshilik jag'daylarda ko'p bo'lekshelerden turaturug'in sistemaların' qa'siyetlerin durıs ta'ripleydi. **Sebebi bo'leksheler tura alatug'in hallar sanı usı hallarda turıwı mu'mkin bolg'an bo'leksheler sanınan a'dewir artıq bolg'an jag'daylarda Boze-Eynshteyn ha'm Fermi-Dirak statistikalarınin' formulaları Maksvell-Boltsman statistikası formulasına o'tedi** (basqa so'z benen aytqanda bir halg'a sa'ykes keliwshi bo'lekshelerdin' ortasha sanı az bolg'an jag'day).

Praktikada ko'pshilik jag'daylarda usı jag'day jiyi ushırasadı. Tek sheklik jag'daylarda formulaların' birinin' birine o'tiwi haqqında g'ana ga'p etilip atır. Al bo'lekshelerdin' qa'siyetlerinin' o'zgeriwi haqqında ga'ptin' bolıwı mu'mkin emes. **YArım pu'tin spinli bo'leksheler barlıq waqıtta Fermi-Dirak statistikasına, al pu'tin spinli bo'leksheler ba'rhama Boze-Eynshteyn statistikasına bag'ınadı.**

Bo'lekshenin' tolıq energiyası onın' tezlikke baylanıslı bolg'an kinetikalıq energiyası  $E_k = \frac{m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)}{2}$  menen koordinatalarına g'a'rezli bolg'an potentsial energiya  $E_p = E_p(x, y, z)$  nın' qosındısınan turadı.

Bo'lekshenin'  $E_i$  energiyasına iye bolıwının' itimallıg'ı

$$P_i = A \exp(-\beta E_i)$$

formulası menen anıqlanadı. Bul jerde  $A = e^{-\alpha}$  normirovkalawshi turaqlı. Bul formula mikrokantonik sistemag'a tiyisli. Usı formuladan  $dx dy dz dv_x dv_y dv_z$  ko'lem elementindegi  $(dx dy dz dv_x dv_y dv_z)$  noqatı janında bo'lekshelerdin' sanı

$$dn(dx dy dz dv_x dv_y dv_z) = A \exp[-\beta(E_k + E_p)] dx dy dz dv_x dv_y dv_z.$$

Bul formula boyınsha bo'lekshenin' ortasha kinetikalıq energiyasın esaplaw arqalı  $\beta = \frac{1}{kT}$  ekenligin tabamız ( $T$  arqalı absolyut termodinamikalıq temperatura belgilengen). Sonlıqtan keyingi formula to'mendegidey tu'rge enedi:

$$dn \left( dx dy dz dv_x dv_y dv_z \right) = A \exp \left\{ [mv^2/2 + E_p] / (kT) \right\} dx dy dz dv_x dv_y dv_z \quad (13-1)$$

Bul formula **Maksvel-Boltsman bo'listiriwi formulası** dep ataladı.

Koordinatalar ha'm tezlikler bir birinen g'a'rezsiz shamalar bolıp tabıladı. Sonlıqtan (13-1) di tezlikler ha'm koordinatalar boyınsha integrallap to'mendegidey formulalardı alamız:

$$dn(x, y, z) = A_1 \exp [-E_p(x, y, z) / (kT)] dx dy dz, \quad (13-2)$$

$$dn(v_x, v_y, v_z) = A_2 \exp [m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) / (2kT)] dv_x dv_y dv_z. \quad (13-3)$$

$A_1$  ha'm  $A_2$  ler normirovkalawshı turaqlılar. (13-2) menen (13-3) sa'ykes Boltsman ha'm Maksvell bo'listiriwlerin beredi.

Maksvell-Boltsman bo'listiriliwin Maksvell ha'm Boltsman bo'listiriwlerin bir birine ko'beytiw jolı menen formal tu'rde alıw mu'mkin. Biraq bunday jag'dayda en' tiykarg'ı orında turg'an bo'lekshelerin' bir birinen parqlanatug'inlıg'ı dıqqattan tısta qaladı.

Fizikalıq jaqtan bul awhaldın' orın alıwı qa'telik bolıp tabıladı. Sebebi ta'biyatta bir birinen parqlanatug'in bo'leksheler joq ha'm olar ya Boze-Eynshteyn, ya Fermi-Dirak bo'listiriliwi boyınsha ta'riplenedi. Biraq klassikalıq fizikanın' en' ko'p ushırasatug'in situatsiyalarında Fermi-Dirak ha'm Boze-Eynshteyn bo'listiriliwleri Maksvell-Boltsman bo'listiriliwi menen sa'ykes keledi. Usının' saldarınan bal bo'listiriliw klassikalıq statistikalıq fizikanın' tiykarg'ı bo'listiriliwi bolıp esaplanadı.

**Bo'leksheler ha'r qıylı dep esaplanatug'in jag'dayda qanday da eki bo'lekshe orınlarnı almasırg'anda payda bolatug'in mikrohollar ha'r qıylı dep esaplanadı. Bir birinen parqı joq bo'leksheler bolg'anda mikrohollar birdey (bo'leksheler orınlarnı almasırg'anda jan'a mikrohollar payda bolmaydı).**

**Bo'leksheler bir birinen o'zgeshe dep esaplang'an jag'daydag'ı mikrohollar sanın esaplaw Maksvell-Boltsman bo'listiriwine alıp keledi. Bul bo'listiriw funktsiyası klassikalıq statistikanın' tiykarg'ı bo'listiriw funktsiyası bolıp tabıladı.**

Soraw:

Ta'biyatta bir birinen ajralatug'in bo'leksheler bolmaydı. Sonlıqtan Maksvell-Boltsman bo'listiriw funktsiyası qanday da bir real bar bo'lekshelerge tiyisli emes. Biraq sog'an qaramastan bul bo'listiriw funktsiyası klassikalıq statistikalıq fizikanın' tiykarg'ı bo'listiriw funktsiyası bolıp tabıladı ha'm real bo'lekshelerden turatug'in sistemalar ushın tabıslı tu'rde qollanıladı. Bul qalay tu'sindiriledi?



## 14-§. Termodinamikanın' birinshi baslaması

Termodinamika ma'seleleri. Jumıs. Jıllılıq. İshki energiya. Termodinamikanın' birinshi baslaması.

Ko'p bo'lekshelerden turatug'ın sistemalar bazı bir ulıwmalıq nızamlarg'a (mısali energiyanın' saqlanıw nızamı) bag'ınadı. Bul nızamlardı termodinamikanın' baslamaları dep ataydı. Sistemanın' makroskopiyaq halı usı sistemag'a tolıg'ı menen qatnası bar ha'm anıq ma'niske iye parametrlar menen ta'riplenedi. Tutası menen aling'anda sistemanın' qa'siyetleri termodinamikanın' baslamaları tiykarında fenomenologiyalıq tu'rde ta'riplenedi. Differentsial formalar teoriyası menen dara tuwındılı ten'lemeler matematikalıq apparatı bolıp tabıladı.

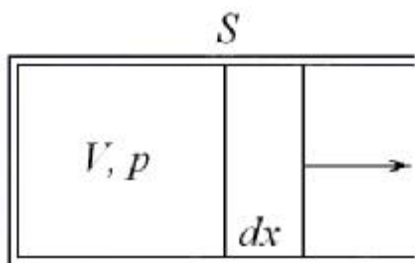
**Termodinamika ma'seleleri.** Termodinamika ma'seleleri u'yrenilip atırg'an qubılıslardıń mikroskopiyaq mexanizmlerine itibar bermey termodinamika baslamaları dep atalatug'ın ulıwmalıq nızamlar tiykarında makroskopiyaq parametrlar menen ta'riplenetug'ın materiallıq denelerdin' qa'siyetleri fenomenologiyalıq izertlewden ibarat.

*Termodinamika u'sh baslamag'a tiykarlanadı. Birinshi baslama termodinamika ta'repinen u'yrenilip atırg'an qubılıslarg'a energiyanın' saqlanıw nızamın qollanıwdan ibarat. Ekinshi baslama termodinamikada u'yreniletug'ın protsesslerdin' bag'ıtın anıqlaydı. Yshinshi baslama termodinamikalıq temperaturanın' noline jetiwidin' mu'mkin emesligi tiykarında protsesslerge shek qoyadı.*

**Jumıs.** Gaz benen toltırılǵ'an ko'lemdi kishireytiw ushın usı gaz basımın jen'iw ushın jumıs islew kerek. Qozǵ'alıwın nı tiyjesinde jumıs islenetug'ın porshenge iye tsilindrlik ıdıstıǵ'ı gazdı ko'z aldımızǵ'a keltireyik (su'wrette ko'rsetilgen). Basım  $p$  g'a ten' gazdin' maydanı  $S$  ke ten' bolǵ'an porshenge ta'sir etiw ku'shi  $pS$  ke ten'. Demek porshen jılısqanda islengen jumıs  $pS dV = p dV$  g'a ten' ( $dV$  arqalı gaz ko'leminin' o'zgerisi belgilengen). Sırtqı ku'shler ta'repinen gaz u'stinen islengen jumıstın' belgisi teris, al gaz ta'repinen onın' ko'lemi u'lkeygende islengen jumıstın' belgisi on' dep kelisilip aling'an. Sonlıqtan gazdin' ko'lemi o'skende islengen jumıs

$$\delta A = p dV . \quad (14.1)$$

Bul jerde jumıs ushın  $\delta A$  belgilewinin' ( $dA$  emes) qollanılg'anı keyin talqılanadı.



14-1 su'wret.

Jumıs ushın an'latpa alıw maqsetinde qollanılatug'ın su'wret.

Eger ideal gazdin' ornına basqa quramalı gaz aling'an bolsa onda sistema u'stinen yamasa sistema ta'repinen islengen jumıstın' isleniwinin' basqa da usılları orın alg'an bolıwı mu'mkin ekenligi ko'riwge boladı. Usı protsesslerdin' barlıǵ'ın da xarakterli o'zgesheligi to'mendegiden ibarat: *Bazı bir makroskopiyaq parametrların o'zgeritiw arqalı sistemadan energiya alınadı yamasa sistemag'a energiya beriledi. Bul so'zler ayırıqsha a'hmiyetke iye.*

***Sistemanın' makroskopiyalıq parametrlerin o'zgertpey energiya beriw de, energiyanı alıw da mu'mkin emes. Bunday jag'dayda jumıs islendi dep aytıwǵ'a bolmaydı.***

Sistemag'a jıllılıq beriw arqalı energiya beriwdi mısıl retinde ko'reyik. Bul jag'dayda sistema u'stinen jumıs islendi dep aytıwǵ'a bolmaydı ha'm makroskopiyalıq parametrler jıllılıq beriwdin' na'tiyjesi sıpatında o'zgeredi.

Ulıwma jag'dayda jumıs ushın an'latpa to'mendegidey tu'rge iye boladı:

Jumısqa baylanıslı o'zgeretug'in parametrlerdi  $\mu_1, \mu_2, \mu_3 \dots$  dep belgileyik.  $\mu_i$  parametri sheksiz kishi o'zgerse  $\delta A = f_i \mu_i$  jumısı islenedi. Bul jerde  $f_i$  ulıwmalasqan ku'sh. Belgiler (14.1) degidey etip alınadı. ***Eger jumıs sistema u'stinen islense  $\delta A$  teris ma'niske iye boladı.***

Toliq jumıs:

$$\delta A = f_1 \mu_1 + f_2 \mu_2 + f_3 \mu_3 + \dots \quad (14.2)$$

$f_i \mu_i$  ag'zaları arasına (14.1) de kirgizilgen dep esaplaymız. Mısıl ulıwmalasqan ku'sh  $f = p$  al ulıwmalasqan koordinata  $\mu_1 = V$ , Yag'ınıy  $d\mu_1 = dV$ . Biraq a'dette a'piwayılıq ushın (14.1) tu'rindegi jazıw qollanıladı. (14.2) degi keyingi ag'zalar qaldırılıp ketedi. Usıǵ'an baylanıslı bazı bir mısallar keltiremiz.

Sterjen ku'shtin' ta'sirinde qısqradı yamasa sozıladı. Onın' uzınlıǵ'ı  $dl$  shamasına o'zgergende islengen jumıs

$$\delta A = -f dl .$$

Bul formuladag'ı  $f$  ku'shtin' absolyut ma'nisi. Sterjen sozılǵ'anda sistema u'stinen jumıs islenedi. Sonlıqtan minus belgisi qoyılǵ'an.

$dq$  zaryadın  $U$  potentsiallar ayırmasına iye noqatlar arasında ko'shirgende islengen jumıs

$$\delta A = -U dq$$

Bul mısıl (14.2) degi ulıwmalasqan ku'shler menen koordinatalar a'dettegi ku'shler menen koordinatalardı eske tu'sirmewi mu'mkin ekenligi ko'rsetedi.

**Jıllılıq.** Eksperimentten eki dene bir biri menen tiyisip turg'anda olardıń jıllılıq halının' ten'lesetug'inlıǵ'ı ma'lim. Jıllıraq denelerden salqın denelerde jıllılıq o'tedi dep aytamız. ***Jıllılıq - bul ayırıqsha formadag'ı, molekulalıq qozǵ'alıs formasındag'ı energiya.*** Usınday ayırıqsha formadag'ı sheksiz kishi energiyanı  $\delta Q$  arqalı belgileyemiz. Bunday ayırıqsha formadag'ı energiya - jıllılıq sistemag'a beriliwi de, sistemadan alınıwı da mu'mkin. Eger sistemag'a jıllılıq beriletug'in bolsa  $\delta Q$  dın' belgisi on', al alınatug'in bolsa teris etip alınadı.

Jumıs tu'sinigi texnikada da'slep XVIII a'sirdin' ortalarında suw ko'teriwshi mashinalardıń jumıs isley alıwshılıq qa'biletlıliginin' o'lshegi retinde paydalana basladı. Keyinirek bul tu'sinik a'ste-aqırılıq penen mexanikag'a o'tti. Bul shama ku'sh penen jol ha'm olar arasındag'ı mu'yeshtin' kosinusının' ko'beymesi dep 1803-jılı L.Karno ta'repinen belgilendi (1753-1823). XIX a'sirdin' birinshi yarımında jumıs termini a'sirese a'meliy mexanikada ko'p tarqaldı. Sonın' menen birge bul termin Nikola Leonar Sadi Karno (1796-1832) ta'repinen baslang'an jıllılıq penen jumıstın' bir birine aylanıwında aylanıw protsesslerin izertlewlerde ken'nen qollanıldı.

**İshki energiya.** Sistemadag'ı bo'lekshelerdin' mu'mkin bolg'an qozg'alıslarının' barlıq tu'rleri ha'm olardın' bir biri menen ta'sir etisiwine baylanıslı bolg'an, sonın' menen birge sistemanı qurawshı bo'lekshelerdin' o'zleri de quramalı bolg'an jag'dayda sol bo'lekshelerdi qurawshı bo'lekshelerdin' qozg'alısları ha'm o'z-ara ta'sir etisiwleri energiyaların' jıynag'ı sistemanın' ishki energiyası dep ataladı. Bul anıqlamadan sistemanın' massa orayının' qozg'alısı menen baylanısqa kinetikalıq energiyası, sistemanın' sırtqı potentsial maydanındag'ı potentsial energiyası ishki energiyag'a kirmeytug'ınlig'ı kelip shıg'adı.

İshki energiyanın' sheksiz kishi o'simi  $dU$  arqalı belgilenedi. Eger sistemanın' ishki energiyası o'setug'ın bolsa  $dU$  on' shama dep, kemeygen jag'dayda teris shama dep qabıl etiledi.

Parametrlerdi ishki ha'm sırtqı dep ekige bo'ledi. Sırtqı parametrler dep sistema ushın sırtqı jag'daylardı anıqlaytug'ın parametrler ayıladı. Al ishki parametrler dep sırtqı parametrler belgili bir jag'daylar tuwdırg'andag'ı sistema ishinde qa'liplesetug'ın jag'daylardı ta'ripleytug'ın shamalar ayıladı. Ma'selen gazdin' ko'lemi  $V$  parametri arqalı belgilenedi. Bul sırtqı parametr. Al usı ko'lem ishinde  $p$  anıq basımı ornaydı. Bul ishki parametr.

Basqasha situatsiyanı qarayıq. Ko'lem qozg'alıwshı porshen ta'repinen sheklengen bolsın. Porshendi qozg'altıw arqalı biz basımdı o'zgertemiz. Bunday jag'dayda sırttan basım berilip ol sırtqı parametrge aylanadı, al ko'lem bolsa ishki parametr bolıp qaladı.

**Termodinamikanın' birinshi baslaması.** Energiyanın' bir forması sıpatında jıllılıq, ishki energiya ha'm islengen jumıs ushın energiyanın' saqlanıw nızamı bilay jazılıwı mu'mkin:

$$\delta Q = dU + \delta A . \quad (14.3)$$

*(14.3) tu'rdegi energiyanın' saqlanıw nızamı termodinamikanın' birinshi baslaması dep ataladı. Bil saqlanıw nızamının' mexanikadag'ı energiyanın' saqlanıw nızamınan ayırmashılıg'ı sheksiz kishi jıllılıq mug'darı  $\delta Q$  dın' barlıg'ında bolıp tabıladı. Energiyanın' usı formasının' qozg'alısın ha'm aylanısın u'yreniw termodinamikanın' tiykarg'ı predmetin quraydı.*

Bunnan keyingi talqılawlardın' ko'pshiliginde basım ku'shlerinin' ta'siri menen ko'lemnin' o'zgeriwine baylanıslı bolg'an jumıs qarap shıg'ıladı. Sonlıqtan birinshi baslama (13-3) bilayınsha jazıladı:

$$\delta Q = dU + p dV . \quad (14.4)$$

*Mexanikadag'ı sıyaqlı (14.3) protsesstin' rawajlanıw bag'ıtın anıqlay almaydı. Bul an'lapta protsess ju'rgen jag'dayda usı shamalardın' qalayınsha o'zgeretug'ınlig'ın bildiredi.*

*Mexanikada qozg'alıs qozg'alıs ten'lemesi ja'rdeminde ta'riplenedi. Termodinamikada bolsa protseslerdin' rawajlanıw bag'ıtı termodinamikanın' ekinshi baslaması ja'rdeminde anıqlanadı.*

Misallar keltiremiz:

Basımı  $9,8 \cdot 10^4$  Pa, temperaturası bolg'an 1 l geliydin' ishki energiyasın esaplayıq.

SHeshimi: Ten'day bo'listiriliw nızamı boyınsha geliydin' ha'r bir atomı ushın ortasha  $\langle \varepsilon \rangle = \frac{3}{2} kT$  energiyası sa'ykes keledi.  $V$  ko'lemde  $n = \frac{V_p}{kt}$  bo'lekshe bar. Demek 1 l geliydin' ishki energiyası

$$U = \frac{3}{2} kT \frac{V_p}{kt} = \frac{3V_p}{2} = 147 \text{ Dj.}$$

**Termodinmikanın' birinshi baslaması qanday da bir protsesstin' o'tiwin anıqlamaydı. Biraq qanday da bir protsess ju'retug'in bolsa, bul protsesstin' birinshi baslamasın qanaatlanıdırıwı kerek. Termodinamikanın' birinshi baslamasının' ja'rdeminde anaw yamasa mınaw protsesstin' o'zgeshelikleri izertlenedi.**

**Termodinamikanın' birinshi baslaması jıllılıq qatnasatug'in protsessler ushın energiyanın' saqlanıw nızamının' an'latpası bolıp tabıladı. Jumıs makroskopiyaalıq parametrlerdin' o'zgeriwi menen ju'retug'in jıllılıqtın' beriliwi menen baylanıslı, al jıllılıqtın' beriliwi molekulaalıq qozg'alis energiyasının' beriliwi menen a'melge asadı. Usınday jag'daylardag'ı makroskopiyaalıq parametrlerdin' o'zgerisi molekulaalıq qa'ddilerdegi energiyaalıq sharayatlardıń o'zgerisinin' na'tiyjesi bolıp tabıladı.**

**R.Feynman boyınsha termodinamika nızamları:**

### **Birinshi nızam**

Sistemag'a berilgen jıllılıq + sistema u'stinen islengen jumıs = Sistemanın' ishki energiyasının' o'simi:

$$dQ + dW = dU .$$

### **Ekinshi nızam**

Birden bir na'tiyjesi rezervuardan jıllılıq alıp onı jumısqa aylandıratug'in protsesstin' bolıwı mu'mkin emes.

$T_1$  temperaturasında  $Q_1$  jıllılıg'ın alıp  $T_2$  temperaturasında  $Q_2$  jıllılıg'ın beretug'in qa'legen mashina qaytımlı mashinadan artıq jumıs isley almaydı. Qaytımlı mashinanın' jumısı:

$$W = Q_1 - Q_2 = Q_1 \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

### **Sistemanın' entropiyasının' anıqlaması**

Eger sistemag'a  $T$  temperaturasında qaytımlı tu'rde  $\Delta Q$  jıllılıg'ı kelip tu'setug'in bolsa, onda usı sistemanın' entropiyası  $\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$  shamasına artadı.

Eger  $T = 0$  bolsa  $S = 0$  (u'shinshi nızam).

Qaytımlı protsesslerde sistemanın' barlıq bo'limlerinin' (jıllılıq rezervuarların da esapqa alg'anda) entropiyası o'zgermeydi.

Qaytımlı bolmag'an o'zgerislerde sistema entropiyası barqulla o'sedi.

## 15-§. Differentsial formalar ha'm toliq differentsiallar

Differentsial formalar. Toliq differentsial.

Differentsial formanın' toliq diifferentsial bolatug'ın sha'rtler talqılanadı. Toliq differentsial menen hal funktsiyaları arasındag'ı baylanıslar ko'rsetiledi.

**Differentsial formalar.** Termodinamikanın' birinshi baslamasın eske tu'siremiz:

$$\delta Q = dU + p dV. \quad (13-3)$$

Bul an'latpada sheksiz kishi shamalar bolg'an  $\delta Q$ ,  $dU$  ha'm  $\delta A$  lar ha'r qıylı belgiler menen belgilengen ( $Q$  menen  $A$  lardın' aldında  $\delta$ , al  $U$  dın' aldında  $d$ ). Usınday etip belgilew za'ru'rliligi usı sheksiz kishi shamalardın' qa'siyetlerindeki ayırmag'a baylanıslı. Meyli bazı bir g'a'rezsiz o'zgeriwshi shamalar berilgen bolsın. Da'slep bir g'a'rezsiz o'zgeriwshi  $x$  mısallın qaraymız. Bul shamanın' differentsialı  $dx$ .  $f(x)dx$  sheksiz kishi shama bolsın.  $f(x)$  ıqtıyarlı funktsiya. Usı sheksiz kishi  $f(x)dx$  shamasın to'mendegidey etip bir birinen  $dx$  qashıqlıg'ında turg'an eki noqat aralıg'ındag'ı bazı bir  $F(x)$  funktsiyasının' o'simi sıpatında qarawg'a bola ma dep soraw beriledi:

$$f(x)dx = F(x + dx) - F(x)? \quad (15.1)$$

Basım ko'pshilik jag'daylarda usınday etip qaraw mu'mkin. Matematikalıq tallaw kursında

$$F(x) = \int f(x)dx \quad (15.2)$$

bolg'an jag'dayda funktsiyanın' o'simi sıpatında qaraw mu'mkin ekenligi da'lillenedi. Sonlıqtan bir o'zgermeli shama jag'dayında sheksiz kishi shamanı bazı bir funktsiyanın' sheksiz kishi o'simi sıpatında qarawg'a boladı. Bul jag'dayda sheksiz kishi  $f(x)dx$  shaması **tolıq differentsial** dep ataladı.  $F(x)$  funktsiyasının' sheksiz kishi o'simi sıpatında ol bılay jazıladı:

$$dF(x) = f(x) dx \quad (15.3)$$

Bul jerde  $d$  simvolın funktsiyanın' sheksiz kishi o'simin belgilew ushın kiritemiz.

Eki o'zgermeli shama bolg'an jag'daylardın' ko'pshiliginde basqasha jag'dayg'a iye bolamız.

Meyli eki o'zgeriwshi ushın sheksiz kishi shamag'a iye bolayıq:

$$\sigma = P(x, y)dx + Q(x, y)dy. \quad (15.4)$$

Bul jerde  $P(x, y)$  ha'm  $Q(x, y)$  funktsiyaları  $x$  ha'm  $y$  lerdin' funktsiyaları bolsın. Usı sheksiz kishi shamanı  $F(x, y)$  funktsiyasının' o'simi  $F(x + dx, y + dy) - F(x, y) = \sigma$  sıpatında ko'rsetiwge bolama dep soraw qoyıladı. Ulıwma jag'dayda ıqtıyarlı  $P$  ha'm  $Q$  larda mu'mkin emes ekenligi matematikalıq tallaw kursında da'lillenedi.

**Toliq differentsial.** Joqarıda qoyılğ'an sorawg'a  $R$  menen  $Q$  funktsiyaları arasında tek belgili bir qatnaslar bar bolg'anda boladı dep juwap beriwge boladı. Usı talaptı jazamız:

$$P(x, y)dx + Q(x, y)dy = F(x + dx, y + dy) - F(x, y) \quad (15-5)$$

$F(x + dx, y + dy) - F(x, y)$  tı qatarg'a jayamız ha'm to'mendegidey ag'zalar menen sheklenemiz:

$$F(x + dx, y + dy) - F(x, y) = F(x, y) + \frac{\partial F}{\partial x} dx + \frac{\partial F}{\partial y} dy. \quad (15-6)$$

(15-5) ten'ligi to'mendegige aylanadı:

$$Pdx + Qdy = \frac{\partial F}{\partial x} dx + \frac{\partial F}{\partial y} dy. \quad (15-7)$$

x ha'm u ler g'a'rezsiz shamalar bolg'anlıqtan (15-7) den

$$P = \frac{\partial F}{\partial x}, \quad Q = \frac{\partial F}{\partial y}. \quad (15-8)$$

ekenligi kelip shıg'adı. P nı y, Q dı x boyınsha differentsiallap

$$\frac{\partial P}{\partial y} = \frac{\partial^2 F}{\partial y \partial x}, \quad \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y}. \quad (15-9)$$

Aralas tuwındı differentsiallaw ta'rtibinen g'a'rezli emes. Sonlıqtan

$$\frac{\partial^2 F}{\partial y \partial x} = \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y}$$

ha'm (15-9) dan alamız:

$$\frac{\partial P}{\partial y} = \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (15-10)$$

Demek (15-4) sheksiz kishi shamasın eger P ha'm Q funktsiyaları (15-10) sha'rtin qanaatlandıratug'm bolsa basqa bir  $F(x, y)$  funktsiyasın' (15-5) yamasa (15-7) tu'rindegi o'simi tu'rinde qaray alamız. Bul sheksiz kishi shamanı eki funktsiyanın' o'simi dep qarawdın' za'ru'rli ha'm jetkilikli sha'rti bolıp tabıladı. Ko'rilip atırğ'an jag'dayda (15-4) sheksiz kishi shaması **tolıq differential** dep ataladı ha'm (15-7) nin' ja'rdeminde bılay jazıladı

$$\sigma = Pdx + Qdy = \frac{\partial F}{\partial x} dx + \frac{\partial F}{\partial y} dy = dF \quad (15-11)$$

Bul jerde F funktsiyasın' sheksiz kishi o'simi ushın dF belgilewi qollanılg'an.

Tolıq differential bolıp tabılıwshı sheksiz kishi shamanın' tiykarg'ı qa'siyeti  $(x_1, y_1)$  ha'm  $(x_2, y_2)$  noqatları arasında alıng'an

$$\int_{(x_1, y_1)}^{(x_2, y_2)} (Pdx + Qdy) \quad (15-12)$$

integralının' tek g'ana baslang'ish ha'm aqirg'ı noqatlarg'a baylanisli, al sol noqatlar arasındag'ı o'tken jolg'a g'a'rezsizlilinde boladı. (15-12) integralı (15-11) sha'rti orınlang'anda bilayınsha esaplanadı:

$$\int_{(x_1, y_1)}^{(x_2, y_2)} (Pdx + Qdy) = \int_{(x_1, y_1)}^{(x_2, y_2)} dF = F(x_1, y_1) - F(x_2, y_2). \quad (15-13)$$

Eger o'zgermeli shama x bazı bir sistemanın' halın ta'riplese, (15-4) tu'rindagi sheksiz kishi shama F funktsiyasının' toliq differentsialı bolsa, onda

*F funktsiyası hal funktsiyası bolıp tabıladı. Bul funktsiya sistemanıq berilgen halı ushın anıq ma'niske iye boladı, funktsiyanın' bul ma'nisi sistemanın' usı halg'a qanday jol yamasa usıl menen kelgenligine baylanisli emes.*

Hal funktsiyaları usı haldın' a'hmiyetli ta'riplemeleri bolıp tabıladı.

Sorawlar: Ishki energiya sıyaqlı jıllılıq ta molekularlar qa'ddindegi energiyalıq sha'rtlerge baylanisli. Olardıń ayırması nelerden ibarat?  
Qanday sharayatlarda differentsial formalar toliq differentsial bolıp tabıladı ha'm hal funktsiyası degenimiz ne?  
Hal funktsiyasının' qaysı qa'siyetin en' a'hmiyetli qa'siyeti dep ataymız?

## 16-§. Qaytımlı ha'm qaytımsız protsessler

Protsessler. Ten' salmaqlı emes ha'm ten' salmaqlı protsessler. Qaytımlı ha'm qaytımsız protsessler.

**Protsessler.** Sistemanın' ten' salmaqlıq halı makroskopiyalıq parametrlar bolg'an r, V ha'm T lardıń ma'nisleri menen ta'riplenedi. Biraq termodinamikalıq qaraw ramkasında ideal gazdın' ne ekenligi ele anıqlang'an joq.

*İdeal gaz Boyle-Mariott nızamına bag'ınıwg'a bag'darlang'an talap tiykarında anıqlanadı. Atap aytqanda belgili bir massadag'ı ideal gazdın' basımı menen ko'leminin' ko'beymesi tek temperaturag'a baylanisli boladı.*

Protsess dep sistemanın' bir ten' salmaqlıq haldan ekinshisine o'tiwine, Yag'nıy  $p_1, V_1$  ha'm  $T_1$  parametrlarinen  $p_2, V_2$  ha'm  $T_2$  parametrlarına o'tiwge aytamız. Bul jerde eki haldın' da ten' salmaqlı hal bolıw talabı tiykarg'ı orında turadı.

$p_1, V_1, T_1$  halın A halı, al  $p_2, V_2$  ha'm  $T_2$  parametrlari menen belgilengen haldı B ha'ripi menen belgileyik. Bunday jag'dayda A halınan B halına o'tiw protsessin ( $A \rightarrow B$  protsessin) a'dette tuwrı, al  $B \rightarrow A$  protsessin **keri protsess** dep ataymız.

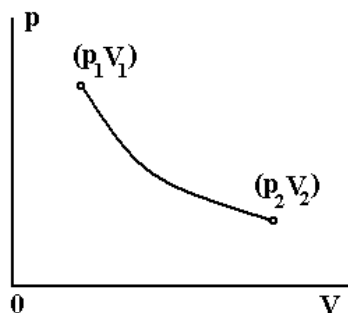
**Ten' salmaqlıq emes protsessler.** Ma'yli basqa ko'lemge iye halg'a o'tiw gerek bolsın. Eger usı o'tiw a'ste aqırılıq penen ju'rgizilmese ko'lem boyınsha basımın' turaqlılıg'ı, sonın' menen birge temperaturanın' turaqlılıg'ı buzıladi. Ha'r bir noqatta ha'r qanday ma'niske iye bolg'anlıqtan anıq basım ha'm temperatura haqqında da aytıw mu'mkinshiligi bolmaydı. Onnan qala berse ko'lem boyınsha basım menen tesperaturanın' bo'listiriliwi da'slepki ha'm aqırğ'ı ko'lemlerge g'a'rezli bolıp qalmay, o'tiwdin' qanday usıl menen a'melge asırılğ'anlıg'ına da baylanışlı. Solay etip usınday protsestege aralıqtag'ı hallardın' barlıg'ı da ten' salmaqlıq emes hallar bolıp tabıladi. *Usınday protsess ten' salmaqlıq emes protsess dep ataladi.*

**Ten' salmaqlıq protsessler.** O'tiwdi basqa usıl menen - ju'da' aqırılıq penen a'melge asırıw mu'mkin. Ha'r bir sheksiz kishi o'zgerisinen keyin barlıq makroskopiyaqlıq parametrlar o'zlerinin' turaqlı ma'nislerine kelmegenshe o'zgeris bolmaytug'ın jag'daydı a'melge asıramız. Solay etip protsesstin' barlıg'ı da ten' salmaqlıq hallardın' izbe-izliginen turadı. *Bunday protsess ten' salmaqlıq protsess dep ataladi.* Diagrammada bunday protsessti u'zliksiz iymeklik ja'rdeminde ko'rsetiwge boladı. İdeal gazlerdin' hal ten'lemesi bolg'an  $pV_m = RT$  ten'lemesinde qa'legen eki parametr protsessti ta'ripleytug'ın g'a'rezsi parametr bolıp esaplanadı. Mısal retinde su'wrette  $p_1, V_1$  halınan  $p_2, V_2$  halna o'tiw protsessti ko'rsetilgen. Ha'r bir noqattag'ı temperatura hal ten'lemesinen bir ma'nisli anıqlanadı.

Termodinamikanın' teoriyaqlıq usıllarında *kvazistatikaqlıq* yamasa *kvaziten'salmaqlıq* protsessler dep atalatug'ın protsessler ken'nen qollanıladi. Bunday protsessler birinin' izinen biri u'zliksiz tu'rde payda bolatug'ın ideallastırılğ'an ten' salmaqlıq hallardan turatıg'ın protsessler kiredi.

**Qaytımlı ha'm qaytımsız protsessler.** Qaytımlı protsess dep aqırğ'ı haldan da'slepki halg'a tuwrı protsesste o'tken hallar arqaqlı keri o'tiw mu'mkin bolg'an protsesske aytamız.

Qaytımsız protsess dep aqırğ'ı haldan da'slepki halg'a sol aralıqlıq hallar arqaqlı o'tiw mu'mkin bolmag'an protsesske aytamız.



2-12 su'wret.

Ten' salmaqlıq protsesstin' su'wretleniwi.

Qaytımsız protsesske mısal retinde bir birine tiydirilip qoyılğ'an to'men qızdırılğ'an deneden joqarıraq qızdırılğ'an deneg'e jıllılıqtın' o'tiwin keltiriwge boladı. Bunday protsesstin' qaytımsız ekenligi lektsiyalarda keyinirek ga'p etiletug'ın Klauzius postulatınan kelip shıg'adı (Klauzius 1850-jılı «Jıllılıq to'men qızdırılğ'an deneden joqarı qızdırılğ'an deneg'e o'zinen o'zi o'te almaydı» dep aytilatug'ın postulattı usındı, bul jerde jıllılıq dep denenin' ishki energiyasın tu'sinemiz).

Joqarıda keltirilgen mısal menen bir qatarda qaytımsız protsesske su'ykelistin' saldarınan jıllılıqtın' alınıwın da ko'rsetiw mu'mkin. Bunday protsesstin' qaytımsızlıg'ı bolsa Tomson-Plank postulatınan kelip shıg'adı (Tomson-Plank postulattı boyınsha birden bir na'tiyjesi jıllılıq rezervuarının' salqınlawının' esabınan jumıs isleytug'ın aylanbalı protsesstin' bolıwı mu'mkin emes).



Ten' salmaqlıq emes protsesstin' qaytımsız protsess ekenligi anıq. Sonın' menen birge ten' salmaqlıq protsess barlıq waqıtta da qaytımlı. Biraq qaytımlı protsess sheksiz a'ste aqırınlıq penen ju'retug'ın protsess dep oylamaw kerek. SHEksiz a'stelik penen ju'retug'ın ten' salmaqlı emes qaytımsız protsesstin' bolıwı mu'mkin (mısalı qattı denelerdegi plastik deformatsiya).

***Demek ten' salmaqlıq protsesste barlıq aralıqlıq hallar ten' salmaqlıq hallar bolıp tabıladı, al ten' salmaqlıq emes protsesste aralıqlıq hallar ishinde ten' salmaqlıq emes hallar boladı. Ten' salmaqlıq protsessler qaytımlı, ten' salmaqlı emes protsessler qaytımsız. SHEksiz kishi tezliklerde ju'retug'ın protsessler barlıq waqıtta qaytımlı ha'm ten' salmaqlı bolmaydı.***

Endi sistemanı o'zinin' da'slepki A halınan qanday da bir jollar menen B halına o'tkereyik. Bunday protsessti tuwrı protsess dep atayıq. Eger bul sistemanı B halınan A halına tuwrı protsesste o'tken joldan o'zgeshe jol menen apara alsaq a'melge asırılğ'an protsessti ***ken' ma'nistegi qaytımlı protsess*** dep ataw qabil etilgen. Eger sistema B halınan A halına tek g'ana  $A \rightarrow B$  o'tiwindeki ju'rgen jol menen qaytatug'ın bolsa  $A \rightarrow B$  protsessi ***tar ma'nistegi qaytımlı protsess*** dep ataladı.

Barlıq kvazistatikalıq protsessler qaytımlı, sonın' menen qatar tar ma'nistegi qaytımlı protsessler bolıp tabıladı. Haqıyqatında kvazistatikalıq protsess ten' salmaqlıq hallar (durısırığ'ı ten' salmaqlıq haldan sheksiz az parqlanatug'ın hallar) izbe-izliginen turıp, sheksiz a'stelik penen ju'redi. Sol sheksiz ko'p ten' salmaqlıq hallardıń birewin alıp qarasaq, sistemag'a sırttan ta'sir bolmag'an jag'dayda sistema bul halda sheksiz uzaq waqıt turadı. Protsesstin' baslanıwı ushın sistemanı sırttan bolatug'ın ta'sirdin' sebebinen ten' salmaqlıq haldan shıg'arıw kerek, Yag'nıy sırtqı parametrler menen qorshap turg'an ortalıqtın' temperaturasını o'zgertiw kerek. Kvazistatikalıq protsesstin' ju'riwi ushın bunday o'zgerisler ju'da' a'ste-aqırınlıq penen ju'riwi kerek. Sebebi sistema barlıq waqıtta ten' salmaqlıq halda yamasa sol ten' salmaqlıq haldan sheksiz kishi parqlanatug'ın halda turıwı kerek. Na'tiyjede sheksiz kishi tezlik penen ju'retug'ın ileallastırılğ'an protsess alınadı. Usınday protsesstin' ja'rdeminde da'slepki A halınan pu'tkilley alıs bolğ'an B halına sistemanı o'tkeriwge, sonın' menen birge sistemanı B halınan A halına qaytadan o'tkeriw mu'mkin. Usınday jollar menen aylanbalı protsess alamız. Al ***qa'legen kvazistatikalıq aylanbalı protsess tuwrı bag'utta da, kerı bag'utta da ju'riwi mu'mkin.***

**Ten'salmaqlıq protsesste barlıq aralıqlıq hallar ten'salmaqlıq hallar, al ten'salmaqlıq emes protsesslerde aralıqlıq hallar arasında ten'salmaqlıq emes hallar boladı.**

**Ten'salmaqlıq protsessler qaytımlı, al ten'salmaqlıq emes protsessler qaytımsız bolıp tabıladı.**

**SHEksiz a'stelik penen ju'retug'ın protsesstin' ten'salmaqlıq ha'm qaytımlı bolıwı sha'rt emes.**

**Ten'salmaqlıq hal fluktuatsiyalar na'tiyjesinde ten'salmaqlı emes hallar arqalı o'tiw menen ju'zege keledi.**

## 17-§. Jıllılıq sıyımlıg'ı

*Jıllılıq sıyımlıg'ı. İshki energiya hal funksiyası sıpatında. Ko'lem turaqlı bolg'andag'ı jıllılıq sıyımlıg'ı. Basım turaqlı bolg'andag'ı jıllılıq sıyımlıg'ı. Jıllılıq sıyımlıqları arasındag'ı baylanıs. İdeal gaz jıllılıq sıyımlıg'ı teoriyasının' eksperimentke sa'ykes kelmewi.*

**Anıqlama.** Denege  $\delta Q$  jıllılıg'ı berilse onın' temperaturası  $dT$  shamasına o'zgeredi.

$$C = \frac{\delta Q}{dT} \quad (17.1)$$

shaması **jıllılıq sıyımlıg'ı** dep ataladı. Jıllılıq sıyımlıg'ı denenin' temperaturasını 1 K ge ko'teriw ushin kerek bolatug'ın jıllılıq mug'darı menen o'lishenedi. Jıllılıq sıyımlıg'ı denenin' massasına baylanıslı. Denenin' massa birligine sa'ykes keletug'ın jıllılıq sıyımlıg'ı **salıstırmalı jıllılıq sıyımlıg'ı** dep ataladı. Zattın' molekullarının' 1 molın alg'an a'dewir qolaylı boladı. Bunday jıllılıq sıyımlıg'ı mollik jıllılıq sıyımlıg'ı dep ataladı. **Jıllılıq sıyımlıg'ı denege jıllılıq beriw ha'm onın' temperaturasını'n' o'zgeriw jag'dayların'n' o'zgesheligine g'a'rezli.**

Mısalı, eger gazge  $\delta Q$  jıllılıg'ı berilgen jag'dayda gaz ken'eyip jumıs islese, onın' temperaturası gaz ken'eymegen jag'daydag'ıg'a salıstırg'anda kishi shamag'a ko'teriledi. Sonlıqtan bul jag'dayda (17.1) formulası boyınsha gazdın' jıllılıq sıyımlıg'ı u'lken boladı. Demek jıllılıq sıyımlıg'ı anıq ma'niske iye bolmay, qa'legen ma'nisti qabıl etiwı mu'mkin. Sonlıqtan (17.1) boyınsha esaplang'an jıllılıq sıyımlıg'ına, usı jıllılıq sıyımlıg'ı qanday jag'daylarda aling'anlıg'ın qosa aytıw kerek.

**İshki energiya hal funksiyası sıpatında.** İshki energiyanın' anıqlamasınan onın' sistemanın' qa'legen halında belgili bir ma'niske iye bolatug'ınlıg'ı ko'rinedi. Bul **ishki energiya  $U$  dın' hal funksiyası, al  $dU$  dın' tolıq differentsial ekenligin** ko'rsetedi. Usıg'an baylanıslı biz bunnan bılay **eger sheksiz kishi shama tolıq differentsial bolsa, onda sa'ykes funksiya hal funksiyası bolıp tabıladı** degen anıqlamanı basshılıqqa alamız.  $V$ ,  $p$  ha'm  $T$  shamaları sistemanın' qa'legen hallarında anıq ma'nislerge iye boladı ha'm bul haldı ta'ripleydi. Sonlıqtan  $dV$ ,  $dp$  ha'm  $dT$  lar tolıq differentsiallar bolıp tabıladı.

**Turaqlı ko'lemdegi jıllılıq sıyımlıg'ı.** Bul jıllılıq sıyımlıg'ı

$$C = \left( \frac{\delta Q}{dT} \right)_V \quad (17.2)$$

sıpatında anıqlanadı. Termodinamikada skobkag'a alınıp jazılğ'an jag'daydag'ı qoyılğ'an indeks sol fizikalıq shamanın' turaqlı bolıp qalatug'ınlıg'ının bildiredi.

Ko'lem turaqlı bolg'anda termodinamikanın' birinshi baslaması  $\delta A = dU + p dV$  bılayınsha jazıladı (sebebi  $p dV = 0$ ):

$$(\delta Q)_V = dU. \quad (17.3)$$

Bul an'latpa  $V = \text{const}$  bolg'anda  $\delta Q$  dın'tolıq differentsial bolatug'ınlıg'ınan derek beredi, al

$$C_V = \left( \frac{dU}{dT} \right)_V. \quad (17.3)$$

Bunnan  $V = \text{const}$  bolg'anda  $C_V$  nın' hal funksiya'sı ekenligi kelip shıg'adı. Bul jag'day jıllılıq sıyımlıg'ının' a'hmiyetin sa'wlelendiredi.

**Turaqlı basımdag'ı jıllılıq sıyımlıg'ı.**  $p = \text{const}$  bolg'anda termodinamikanın' birinshi baslaması bılay jazıladı:

$$(\delta Q)_p = dU + (pdV)_p = d(U + pdV). \quad (17-5)$$

Bul  $(\delta Q)_p$  nın' tolıq differentsial ekenligin bildiredi, al

$$C_p = \left( \frac{dQ}{dT} \right)_p \quad (17-6)$$

hal funksiya'sı bolıp tabıladı. (17-5) ke kiriwshi

$$H = U + pV \quad (17-7)$$

funksiya'sı **entalpiya** dep ataladı. Entalpiya da hal funksiya'sı bolıp tabıladı. Sonlıqtan (17-6) dag'ı  $C_p$  ushın an'latpanı bılay o'zgerte alamız:

$$C_p = \left( \frac{dH}{dT} \right)_p. \quad (17-8)$$

**Jıllılıq sıyımlıqları arasındag'ı baylanıs.** Biz qarap atırğ'an termodinamikalıq sistemalar u'sh makroskopiyalıq parametrlar  $p$ ,  $V$  ha'm  $T$  menen ta'riplenedi. Olar bir birinen g'a'rezsiz ha'm hal **ten'lemeleri ja'rdeminde** baylanısqa'n. İdeal gaz ushın hal ten'lemesi  $pV_m = RT$  ten'ligi menen beriledi. Bıqtıyarlı gaz ushın bul shamalar arasındag'ı baylanıs tu'ri belgili emes. Sonlıqtan da usı u'sh shamalar bir biri menen funktsionallıq baylanısta boladı dep jaza alamız:

$$p = p(T, V). \quad (17-9)$$

Sonın' menen birge qaysı o'zgermeli g'a'rezsiz sıpatında qaralıwına baylanıslı  $T = T(p, V)$ ,  $V = V(p, T)$  dep jaza alamız. Eger g'a'rezsiz shamalar retinde  $V$  menen  $T$  saylap alıng'an bolsa ishki energiya da sol shamalardan g'a'rezli boladı, Yag'nıy  $U = U(T, V)$ . Toliq differentsial ushın

$$dU = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_V dT + \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_T dV \quad (17-10)$$

an'latpasın  $\delta Q = dU + pdV$  formulasına qoyıp

$$\delta Q = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_V dT + \left[ p + \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_T \right] dV \quad (17-11)$$

Onday jag'dayda (16-1) formulası bılay jazıladı:

$$C = \frac{\delta Q}{dT} = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_V + \left[ p + \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_T \right] \frac{dV}{dT}. \quad (17-12)$$

Bul ten'liktin' on' ta'repindegi  $dV/dT$  shaması protsesstin' xarakterine baylanıslı.  $V = \text{const}$  bolg'anda bul shama nolge ten' ha'm (17-12)  $C_v$  ushın (17-4) ke aylanadı.  $r = \text{const}$  jag'dayında turaqlı basımdag'ı jıllıq sıyımlıg'ı an'latpasın alamız:

$$C_p = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_V + \left[ p + \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_T \right] \left( \frac{dV}{dT} \right)_p = C_v + \left[ p + \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_T \right] \left( \frac{dV}{dT} \right)_p. \quad (7-13)$$

Demek  $\delta Q$  ushın jazılg'an (17-11) bılay jazılıwı mu'mkin:

$$\delta Q = C_v dT + \left[ p + \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_T \right] dV. \quad (17-14)$$

**İdeal gazdin' jıllıq sıyımlıqları arasındag'ı qatnas.** Anıqlaması boyınsha ideal gazdin' ishki energiyası temperaturadan g'a'rezli boladı, al gazdin' ko'lemine baylanıslı emes. Sonlıqtan  $U = U(T)$ , al hal ten'lemesi bılay jazıladı:

$$V = \frac{RT}{p}. \quad (17-15)$$

Sonlıqtan

$$\left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_T = 0; \quad \left( \frac{dV}{dT} \right)_p = \frac{R}{p}. \quad (17-16)$$

(17-16) nı (17-13) ke qoyıp

$$C_p = C_v + R. \quad (17-17a)$$

(17-17a) **Mayer ten'lemesi** dep ataladı. Bul ten'lemenin' eki ta'repin de gazdin' mollik massası  $M$  ge bo'lsek

$$c_p = c_v + R_0. \quad (17-17b)$$

Bul jerde  $c_p = C_p / M$ ,  $c_v = C_v / M$ ,  $R_0 = R / M$  = salıstırmalı gaz turaqlısı.

**İdeal gazdin' jıllıq sıyımlıg'ı.** Meyli ideal gazdin' ha'r bir bo'lekshesi i erkinlik da'rejesine iye bolsın. Onda bir bo'lekshenin' ortasha energiyası  $\frac{i}{2} kT$  g'a ten' boladı. 1 molde  $N_A$  bo'lekshe bar. Demek ideal gazdin' bir molinin' ishki energiyası

$$U = \frac{i}{2} N_A kT = \frac{i}{2} RT. \quad (17-18)$$

Usıg'an baylanıslı (17-4) ha'm (17-17a) formulalarınan

$$C_v = \frac{i}{2} R, \quad C_p = \frac{i+2}{2} R. \quad (17-19)$$

### Tiykarg'ı juwmaqlar:

Jıllıq sıymılg'ı ulıwma jag'daylarda denenin' qa'siyetin ta'riplemeydi. Ol dene menen usı denenin' temperaturasınıń o'zgeretug'ın sharayatlarınń ta'riplemesi bolıp tabıladı. Sonlıqtan jıllıq sıymılg'ı anıq ma'niske iye bolmaydı. Eger denenin' temperaturasınıń o'zgeriw sharayatları anıqlanıp alınsa jıllıq sıymılg'ı denenin' qa'siyetinin' ta'riplemesine aylanadı ha'm anıq sanlıq ma'niske iye boladı. Usınday jıllıq sıymıqlarının' ma'nisleri kestelerde keltiriledi. Usı jıllıq sıymıqlarının' en' a'hmiyetlileri turaqlı basım menen turaqlı ko'lemde alıng'an jıllıq sıymıqları bolıp tabıladı. Jıllıq sıymılg'ı protsesstin' xarakterine baylanıslı ha'm shaması sheksiz u'lken teris ma'nisten sheksiz u'lken on' ma'niske shekem o'zgeriwi mu'mkin.

Turaqlı basımdag'ı ha'm turaqlı ko'lemdegi jıllıq sıymılg'ı hal funktsiyası bolıp tabıladı.

Gazdin' jıllıq sıymılg'ının' temperaturadan g'a'rezsizligi ta'jiriybede tastıyqlanbaydı. Bug'an molekulaq vodorod penen o'tkerilgen ta'jiriybeler da'lil bola aladı.

İdeal gaz jıllıq sıymılg'ı teoriyasının' eksperiment na'tiyjeleri menen sa'ykes kelmewi.

A'piwayı  $C_v = \frac{i}{2}R$  ha'm  $C_p = \frac{i+2}{2}R$  formulaları eksperiment penen bir atomlı ha'm ko'p atomlı birqansha gazler ushın (vodorod, azot, kislorod ha'm basqalar) o'jire temperaturalarında jaqsı sa'ykes keledi. Olar ushın jıllıq sıymılg'ı  $C_v = \frac{3}{2}R$  shamasına ju'da' jaqın.

Biraq eki atomlı  $Cl_2$  ushın jıllıq sıymılg'ı  $\frac{6}{2}R$  ge ten' bolıp, onın' ma'nisin joqarıda keltirilgen ko'z-qaraslarday ko'z-qaras penen tu'sindiriw mu'mkin emes (printsipinde eki atomlı molekulada  $C_v$  ya  $\frac{5}{2}R$  ge yaki  $\frac{7}{2}R$  ge ten' bolıwı kerek).

U'sh atomlı molekullarda bolsa teoriyag'a sa'ykes kelmewshilik sistemalı tu'rde baqlanadı.

Misal retinde molekulaq vodorodtı qaraymız. Vodorod molekulası eki atomnan turadı. Jetkilikli da'rejede siyrekletilgen vodorod gazi qa'siyeti boyınsha ideal gazdin' qa'siyetine ju'da' jaqın.

Eki atomlı gaz ushın joqarıda aytilg'anday  $C_v$  nın' shaması  $\frac{5}{2}R$  ge yaki  $\frac{7}{2}R$  ge ten' ha'm temperaturadan g'a'rezsiz bolıwı kerek. Al

Haqıyqatında ta'jiriybe molekulaq vodorodtın' jıllıq sıymılg'ının' temperaturag'a baylanıslı ekenligin ko'rsetedi: to'mengi temperaturalarda (50 K shamasında) onın' jıllıq sıymılg'ı  $\frac{3}{2}R$  ge, o'jire temperaturalarında  $\frac{5}{2}R$  ge, al joqarı temperaturalarda  $\frac{7}{2}R$  ge ten' boladı.

Demek to'mengi temperaturalarda vodorod molekulları ishki qurılısqa iye emes noqatlıq bo'lekshenin', o'jire temperaturalarında qattı ganteldin' qa'siyetindey qa'siyetke iye. Bunday gantel ilgerilemeli qozg'alıs penen qatar aylanbalı qozg'alısqa da iye boladı. Al joqarı temperaturalarda bolsa bunday qozg'alıslarg'a terbelmeli qozg'alıs ta qosıladı (gantel sozılıp qısıladı). Juwmaqlap aytqanda *temperaturanın' joqarılawı menen ha'r qıylı erkinlik da'rejeleri iske qosıladı eken: to'mengi temperaturalarda tek ilgerilemeli erkinlik da'rejeleri iske*

*qosılǵ'an, temperaturanın' joqarılawı menen aylanbalı erkinlik da'rejeleri, al keyin terbelmeli erkinlik da'rejeleri qozadı* («iske qosıladı» ha'm «qozadı» so'zleri bir ma'niste qollanılǵ'an, sonday-aq shın ma'nisinde erkinlik da'rejesi emes, al sol erkinlik da'rejesine sa'ykes keliwshi qozǵ'alıs qozadı).

Biraq bir rejimnen ekinshi rejimge o'tiw (demek jan'a erkinlik da'rejelerinin' iske tu'siwi na'zerde tutılmaqta) belgili bir temperaturalarda birden keskin tu'rde a'melge aspaydı. Bunday o'tiw temperaturanın' bazı bir intervallarında ju'zege keledi. Belgili bir temperaturalarda tek g'ana molekulalardıń bir rejimnen ekinshi rejimge o'tiw mu'mkinshiligi payda boladı. Biraq bul rejimge barlıq molekulalar birden o'tpeydi. Temperaturanın' joqarılawı menen jan'a rejimge o'tken molekulalardıń sanı artadı. Sonlıqtan jıllıq sıyımlıǵ'ı iymekligi u'zliksiz tu'rde o'zgeredi (su'wrette ko'rsetilgen).

**Molekulalıq vodorodtıń jıllıq sıyımlıǵ'ının' temperaturag'a g'a'rezliligin sapalıq jaqtan tu'sindiriw.** Iye bolatug'ın energiyaların' diskrettiligi mikrobo'lekshelerdin' qozǵ'alısın' tiykarg'ı o'zgesheligi bolıp tabıladı. Bo'lekshe qozǵ'alatug'ın aymaq shekli bolatug'ın bolsa onın' energiyası tek diskret ma'nislerdi qabıl etedi. Bul aymaq u'lkeygen sayın energiya qa'ddileri arasındag'ı qashıqlıq kishireydi. Jetkilikli da'rejedegi u'lken ko'lemelerde qozǵ'alıwshı bo'lekshelerdin' energiya spektrin u'zliksiz dep esaplaw mu'mkin (biraq bunday jag'daylarda da diskretlik saqlanadı). Spektr a'meliy jaqtan derlik u'zliksiz bolǵ'an basqa jag'day - energiyanın' ma'nisi u'lken bolǵ'anda orın aladı. Bunday jag'dayda energiya qa'ddileri arasındag'ı qashıqlıq energiyanın' o'zinin' ma'nisine qarag'anda esapqa almastay kishi boladı. Bo'lekshenin' energiyasın' diskret spektri kvant mexanikasın' qozǵ'alıs ten'lemelerin sheshiw arqalı alınadı.

Biz ha'zir vodorodtıń eki atomlı molekulası ushın sheshimnin' na'tiyjesin qaraymız.

Molekulanın' ilgerilemeli qozǵ'alısına sa'ykes keliwshi energiya u'zliksiz o'zgeredi dep esaplaymız. Sebebi siyrekletilgen gazdin' moli ushın qozǵ'alıs aymag'ı jetkilikli da'rejede u'lken. Aylanbalı ha'm terbelmeli qozǵ'alıs energiyaları kvantlang'an, Yag'nıy bunday qozǵ'alısar energiyaları qa'legen ma'niske iye bolmay, tek energiyanın' ma'nislerinin' diskret qatarına iye. A'sirese terbelislerdin' energiyalıq spektri a'piwayı tu'rge iye

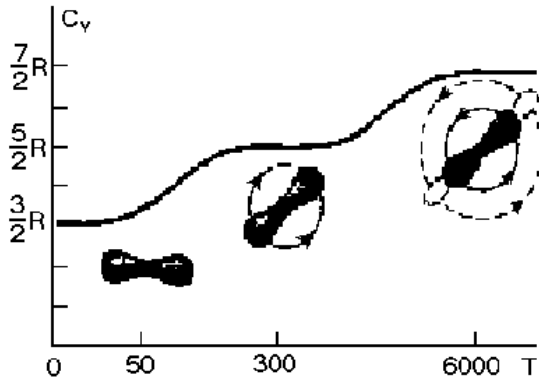
$$E_n = \hbar\omega(n + \frac{1}{2}).$$

Bul jerde  $\hbar\omega$  atomlardın' massası ha'm serpimlilik koeffitsienti ja'rjeminde anıqlanadı.

$E_0 = \frac{1}{2}\hbar\omega$  energiyası energiyanın' en' kishi ma'nisine ten', Yag'nıy bo'lekshe tınıshlıqta tura almaytug'ınday qozǵ'alıs nızamı orın aladı. Nolinshi qa'ddinin' u'stinde bir birinen  $\partial\omega$  qashıqlıqta turg'an molekulanın' energiya qa'ddileri jaylasadı.

Molekulanın' aylanıwına sa'ykes keliwshi energiyanın' shaması terbeliske sa'ykes keliwshi energiyanın' shamasınan shama menen 100 esedey kishi. Basqa so'z benen aytqanda aylanıw qozǵ'alısı terbeliske salıstırǵ'anda a'dewir a'stelik penen ju'redi. Vodorod molekulasın' aylanbalı qozǵ'alısına sa'ykes keliwshi energiya spektri to'mendegidey tu'rge iye boladı:

$$E_n = q_1 n(n+1).$$



2-13 su'wret.

Molekulalıq vodorod ushın  $C_v$  nın'  $T$  g'a  
g'a'rezliligi  
(eksperimenttin' na'tiyjesi).

Bul jerde  $q_1 = \hbar^2 / (2J_0)$ ;  $J_0$  aylanıw ko'sherine salıstırǵandag'ı molekulanın' inertsiya momenti (eki atomlı molekula ushın ko'sherlerge salıstırǵandag'ı momentler birdey shamag'a ten' boladı).

Quramındag'ı yadrolardıń (vodorod atomının' yadrosının' bir protonnan turatug'ınlıg'ın eske tu'siremisiz) menshikli momentlerinin' (spininın') o'z-ara bag'ıtı boyınsha vodorod molekulası eki sortqa bo'linedi. Molekulanı qurawshı eki yadronın' menshikli momentleri qarama-qarsı bolsa, payda bolg'an vodorod paravodorod dep ataladı ha'm bul jag'dayda  $n = 0, 2, 4, \dots$ , al ortovodorod ushın (yadrolardıń menshikli momentleri o'z-ara parallel)  $n = 2, 3, 5, \dots$ . Vodorod gazindegi paravodorod molekularının' sanı ulıwma molekular sanının'  $1/4$  in, al ortovodorodtıń molekularının' sanı  $3/4$  in quraydı.

Energiyanın' aylanıw qa'ddileri arasındag'ı qashıqlıq terbelis qa'ddileri arasındag'ı qashıqlıqtan a'dewir kishi boladı. Usı qa'ddilerdin' arasındag'ı en' to'mengi qa'ddi menen birinshi qozg'an qa'ddi arasındag'ı qashıqlıq a'hmiyetli orındı iyeleydi. Paravodorod molekuları ushın  $E_0 = 0$  ha'm  $E_2$  qa'ddileri arasındag'ı qashıqlıq  $(\Delta E)_0 = 5q_1$ , al ortovodorod ushın bunday ayırma  $E_1$  ha'm  $E_3$  qa'ddiler arasındag'ı ayırma bolıp  $(\Delta E)_1 = 10q_1$  ge ten'.

Molekulalar bir biri menen soqlıg'ısqanda ilgerilemeli, aylanıw ha'm terbeliw erkinlik da'rejeleri energiyaları arasında energiya almasıwı orın aladı. To'men temperaturalarda ( $Yag'nıy kT \ll 5q_1$ ) aylanıw ha'm terbeliw erkinlik da'rejeleri qoza almaydı. Bunday jag'daylarda molekula en' minimallıq terbelis energiyası (terbelistin' nollik energiyası) ha'm en' kishi aylanıs energiyası menen qozg'aladı (paravodorod ushın aylanıw minimallıq aylanıw energiyası  $E_0=0$ , al ortovodorod ushın  $E_1=2q_1$ ). Molekulalar ishki qurılısqıa iye emes bo'leksheday bolıp qozg'aladı, Yag'nıy u'sh erkinlik da'rejesine iye boladı. Bunday gazdin' jıllılıq sıyımlıg'ı  $(3/2)kT$  ge ten'. Temperatura ko'terilgende ilgerilemeli qozg'alıs energiyası aylanıw qa'ddilerin qozdırıwıg'a jetkilikli ma'niske jetedi ha'm molekula erkinlik da'rejesi 5 ke ten' bolg'an quramalı bo'lekshe qa'sietine iye boladı. Aylanıw erkinlik da'rejeleri iske tu'setug'ın temperatura

$$T_{ayl} = q_1/k = \hbar^2 / (2J_0k).$$

$T_{ayl} < T < T_{terb}$  (terbelis erkinlik da'rejesiiske tu'setug'ın temperaturanın' ma'nisi) temperaturalarında eki atomlı gazdin' jıllılıq sıyımlıg'ı  $\frac{5}{2}R$  ge, al  $T_{terb}$  ten joqarı temperaturalarda  $\frac{7}{2}R$  ge ten'.

To'mende ayırım eki atomlı gazler ushın  $T_{ayl}$  ha'm  $T_{ter}$  temperaturalarının' ma'nisleri keltirilgen:

temperatura	vodorod	Azot	kislorod
$T_{\text{ayn}}, K$	85.5	2.86	2.09
$T_{\text{ter}}, K$	6410	3340	2260

Aling'an an'latpalardı ayqın mısıl ushın qollanamız. Turaqlı basımdag'ı kislorodtın' jıllılıq sıyımlıg'ın tabamız.

$O_2$  molekulasında erkinlik da'rejesi 5 ke ten' (demek u'sh ilgerilemeli ha'm eki aylanbalı erkinlik da'rejeleri esapqa alıng'an). Mollik jıllılıq sıyımlıg'ı  $c_p = \frac{i+2}{2}R$ . Kislorodtın' mollik massası  $M = 0.032 \text{ kg/mol}$ . Onda salıstırmalı jıllılıq sıyımlıg'ı

$$c_p = \frac{(i+2)R}{2M} = 798.31/(290.032) \text{ Dj/(kg*K)} = 0.909 \text{ kDj/(kg*K)}.$$

#### Sorawlar:

Qanday fizikalıq talqılawdan ideal gazdin' turaqlı basımdag'ı jıllılıq sıyımlıg'ının' turaqlı ko'lemdegi jıllılıq sıyımlıg'ınan artıq ekenligi kelip shıg'adı?

Ulıwma jag'daylarda jıllılıq sıyımlıg'ı molekularıdın' o'z-ara ta'sir etisiwine baylanıslı bolg'an potentsial energiyag'a g'a'rezli dep ayta alamız ba?

Gazdin' jıllılıq sıyımlıg'ı usı gaz turg'an salmaq maydanına g'a'rezli me?

## 18-§. İdeal gazlerdegi protsessler

*İdeal gazlerdegi protsessler. İzobaralıq, izoxoralıq ha'm izotermalıq protsessler. Adiabatalıq protsess. Adiabatalıq protsestege jumıs. Politroplıq protsess. Politropa ten'lemesi.*

**İzobaralıq protsess.** Turaqlı basımda ju'retug'in protsess izobaralıq protsess dep ataladı. ( $p_1, V_1$ ) ha'm ( $p_2, V_2$ ) noqatlarındag'ı temperaturalar hal ten'lemesi ja'rdeminde esaplanadı ha'm sa'ykes  $T_1 = p_1 V_1/R$ ,  $T_2 = p_2 V_2/R$ . Bunday jag'dayda ko'lemnin' u'lkeyiwi menen basımnın' turaqlı bolıp qalıwı ushın sistemag'a jıllılıq berip turıw za'ru'r. Jumıs

$$A = \int_{(1)}^{(2)} p_1 dV = p_1 (V_2 - V_1). \quad (18-1)$$

Jumıstın' bul ma'nisi a) su'wrette ko'rsetilgen.  $p, T$  koordinatalarında da bul protsess tuwrı sıyıqlar menen ko'rsetiledi. Bul o'zgeriwshilerde jumıstın' an'latpası to'mendegidey bolıp jazıladı:

$$A = \int_{(1)}^{(2)} p_1 dV = \int_{(1)}^{(2)} p_1 \frac{R}{p_1} dT = R(T_2 - T_1). \quad (18-2)$$

Bul eki tu'rli etip ko'rsetiw de bir biri menen ten'dey. Bir birine o'tiw hal ten'lemeleri ja'rdeminde a'melge asırıladı.



İzobarlıq protseste gazdin' berilgen massasının' ko'lemi temperaturanın' o'zgerisine baylanışlı sızıqlı tu'rde o'zgeredi, Yag'nıy

$$V_t = V_0(1 + \alpha_v t).$$

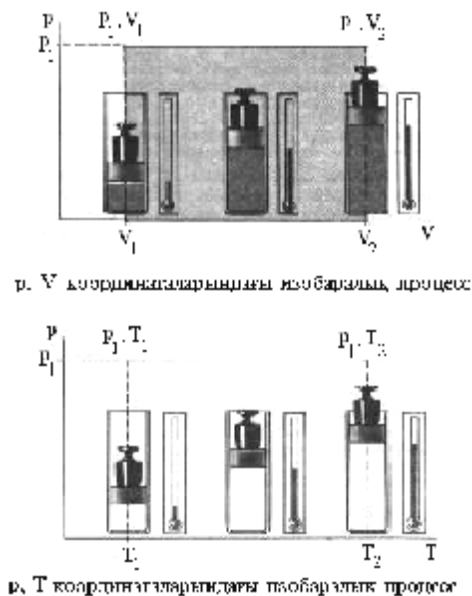
Bul formulada  $V_t$  gazdin'  $t$  temperaturadag'ı ko'lemi,  $V_0$  gazdin' temperatura  $0^\circ\text{C}$  bolg'andag'ı ko'lemnin' ma'nisi,  $\alpha_v$  proportsionallıq koeffitsient. Eksperimentler eger suwdın' eriw temperaturasını  $0^\circ$ , al qaynaw temperaturasını  $100^\circ$  dep alsaq  $\alpha_v = 1/273.13^\circ = 0.0036613 \text{ grad}^{-1}$  ge ten' bolatug'inlig'in ko'rsetedi.

Gey-Lyussak nızamı boyınsha  $t = -273.13^\circ\text{C}$  temperaturada gazdin' ko'lemi tolıq jog'alıwı kerek. Bul gazdin' o'zinin' jog'alıwına sa'ykes keledi. Bul jag'daydın' o'zi de Gey-Lyussak nızamının' barlıq temperaturalar da orın almaytug'inlig'inan derek beredi. Haqıyqatında da  $t = -273.13^\circ\text{C}$  temperaturag'a shekem salqınlatıl'g'anda barlıq gazler da'slep suyıqlıqqa, al keyin qattı deneye aylanıp ketedi ha'm bunday haldag'ı zatlar ushın Gey-Lyussak nızamı orınlanbaydı.

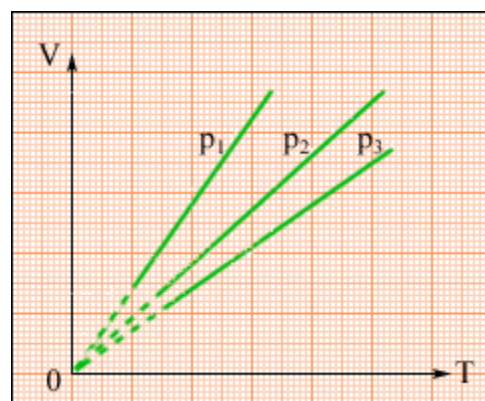
**İzoxoralı protsess.** Bul turaqlı ko'lemde ju'retug'in protsess bolıp tabıladı.  $V = \text{const}$ . İzoxoralı protseste islengen jumıs nolge ten', Yag'nıy

$$A = \int_{(1)}^{(2)} p dV = 0. \quad (18-3)$$

**İdeal gazlerde ko'lem turaqlı bolg'anda basım temperaturag'a tuwrı proportsional** (SHarl nızamı). İdeal emes gazler ushın SHarl nızamı da'l orınlanbaydı. Sebebi bul jag'dayda gazge barilgen energiyanın' bir bo'legi molekularlar arasındag'ı ta'sirlesiw energiyanın o'zgertiwi ushın jumısaladı.



2-14 su'wret.

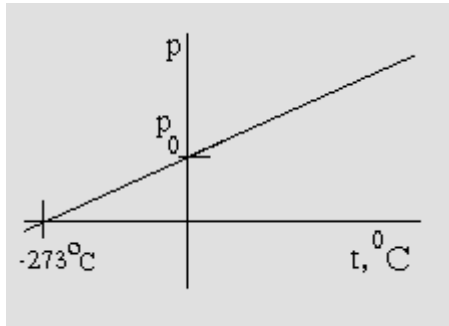


İzobaralardıń (V,T) tegisligindegi qa'siyetleri ( $p_3 > p_2 > p_1$ ).

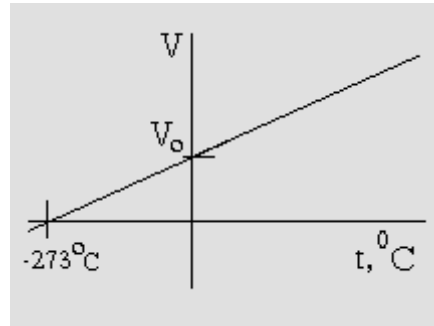
TSelsiya shkalasındag'ı temperaturalar ushın SHarl nızamı bılay jazıladı:

$$p_t = p_0(1 + \alpha_p t).$$

Bul formuladag'ı  $p_t$  gazdin'  $t$  temperaturadag'ı basımı,  $p_0$  temperatura nolge ten' bolg'andag'ı basımı,  $\alpha_p$  turaqlı koeffitsient. Eger suwdın' eriw temperaturasın  $0^0$ , al qaynaw temperaturasın  $100^0$  dep alsaq  $\alpha_p = 1/273.13^0 = 0.0036613 \text{ grad}^{-1}$  ge ten' boladı.



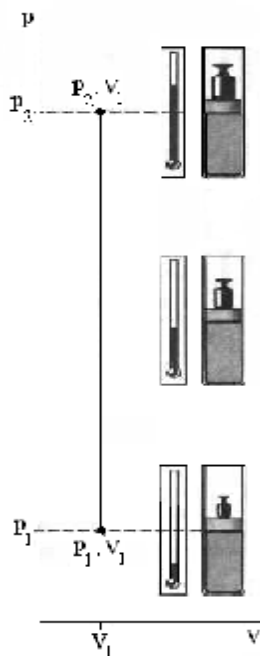
2-15 su'wret. SHarl nızamı grafıgı



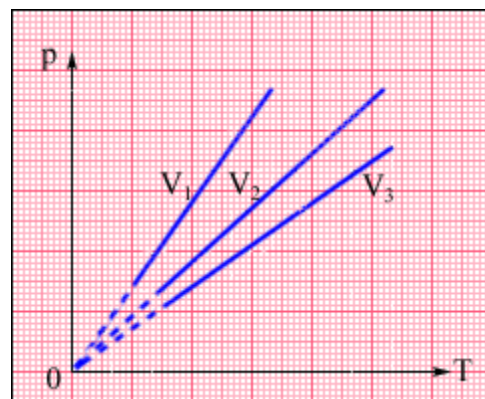
2-16 su'wret. Gey-Lyussak nızamı grafıgı

SHarl nızamı boyınsha  $t = -273.13^0\text{C}$  temperaturada gazdin' basımının' tolıq jog'alıwı kerek. Bul gazdin' o'zinin' jog'alıwına sa'ykes keledi. Bul jag'daydın' o'zi de SHarl nızamının' barlıq temperaturalar da orın almaytug'ınlıg'ınan derek beredi. Haqıyqatında da  $t = -273.13^0\text{C}$  temperaturag'a shekem salqınlatılğ'anda barlıq gazler da'slep suyıqlıqqa, al keyin qattı deneg'e aylanıp ketedi ha'm bunday haldag'ı zatlar ushın SHarl nızamı orınlanbaydı.

Joqarıda keltirilgen eki nızamda da eger suwdın' eriw temperaturasın  $0^0$ , al qaynaw temperaturasın  $100^0$  dep alıng'an temperaturalar shkalasında  $\alpha_v = \alpha_p = 1/273.13^0 = 0.0036613 \text{ grad}^{-1}$  ekenligi ko'rinip tur. Al to'mende TSelsiya shkalası menen temperaturalardıq absolyut termodinamikalıq shkalası arasında  $0 \text{ K} = 273.13^0\text{C}$  baylanısınin' bar ekenligi da'lillenedi.



2-17 su'wret.  $p, V$  koordinatalarındag'ı izoxoralıq protsess.



$(p, T)$  tegisligindegi izoxoralardıń qa'siyetleri ( $V_3 > V_2 > V_1$ ).

**İzotermalıq protsess.** Bul protsess turaqlı temperaturada ju'redi.  $T = \text{const}$ . Jumıs:

$$A = \int_{(1)}^{(2)} p dV = RT \int_{(1)}^{(2)} \frac{dV}{V} = RT \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right). \quad (18-4)$$

Temperatura o'zgermeginlikten bul protseste ideal gazdin' ishki energiyasi o'zgermeydi. Snoliqtan izotermalıq protseste sistemag'a berilgen jıllılıq tolıg'ı menen jumıs islewge jumısaladı.

**Temperatura turaqlı bolg'anda gazdin' berilgen massasın' basımı onın' ko'lemine keri proporsional.** Bul Boyle-Mariott nızamı dep ataladı. Yag'nıy

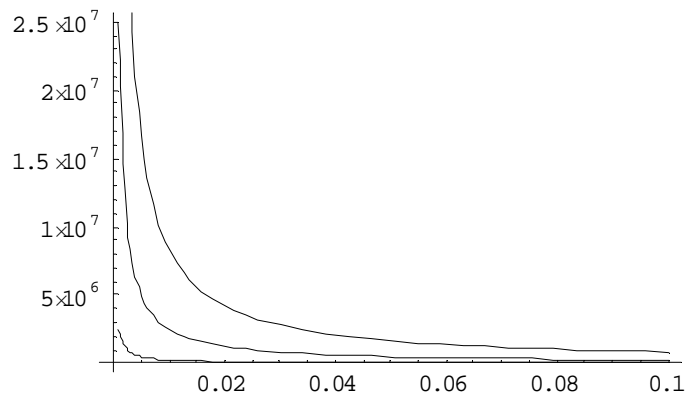
$$pV = \text{const.}$$

Temperatura turaqlı bolg'anda gazdin' berilgen m massası menen p basımı menen V ko'lemi arasındag'ı g'a'rezlilik grafik tu'rinde ten' qaptallı giperbola menen su'wretlenedi (su'wrette ko'rsetilgen). Bul sıızıqtı **izoterma** dep ataydı. Boyle-Mariott nızamı juwıq tu'rdegi nızam bolıp tabıladı. Real gazlerdin' barlıg'ı da u'lken basımlardı bul nızamdag'ıg'a qarag'anda az qısıladı. A'dette o'jire temperaturalarında ha'm shaması atmosfera basımına jaqın basımlarda gazlerdin' ko'pshiligi Boyle-Mariott nızamına jetkilikli tu'rde bag'madı. Al basım 1000 at bolg'anda, misalı, azot ushin bul nızamnan awıqtıw 2 esege barabar boladı.

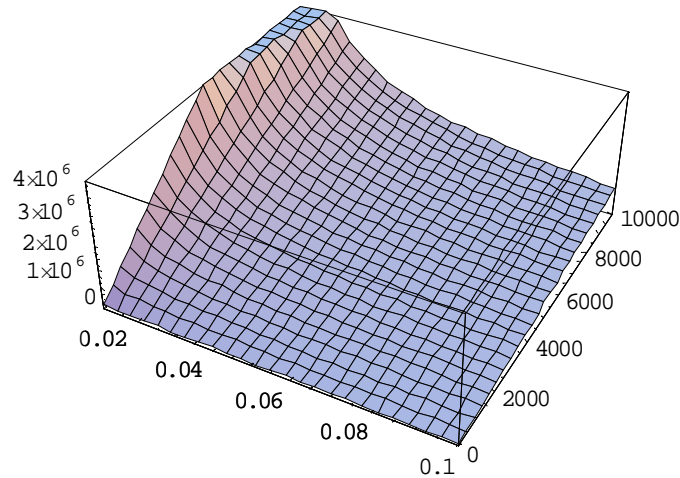
Biz ayqın mısaldı ko'reyik. Meyli  $T_1 = 300 \text{ K}$ ,  $T_2 = 3000 \text{ K}$ ,  $T_3 = 10000 \text{ K}$  temperaturaların alayıq. Ko'lem V ushin  $0.001 \text{ m}^3$  ten  $0.1 \text{ m}^3$  ge shekemgi ma'nislerdi beremiz. Bunday jag'dayda Mathematica 5 programmalaw tili ushin

$$\text{Plot}\{ \{R*T_1/V, R*T_2/V, R*T_3/V\}, \{V, 0.001, 0.1\} \}$$

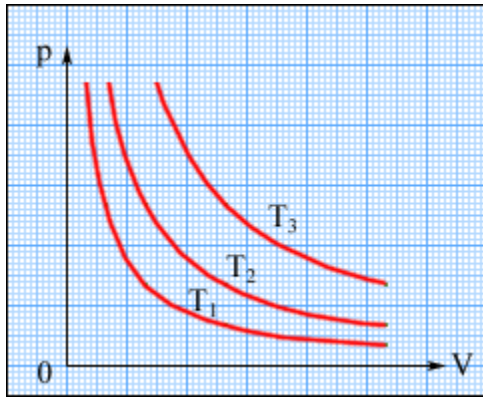
tu'rindegi programmanı jazamız. Kompyuter mına grafikti beredi:



Endi p, V ha'm T shamaların' u'shewi de o'zgermeli bolsın ha'm olardıń ekewi mına sheklerde o'zgersin: V ko'lemi  $0.01 \text{ m}^3$  ten  $0.1 \text{ m}^3$  ke shekem ha'm T temperaturası 0 den 10000 gradusqa shekem. Bunday jag'dayda basım p qalğan eki parametr V ha'm T lardıń funksiya sıpatında tabıladı. Sa'ykes programma  $\text{Plot3D}[R*T/V, \{V, 0.01, 0.1\}, \{T, 0, 10000\}]$  tu'rine iye bolıp, kompyuterdegi esaplawlar



grafigin beredi.



(p, V) tegisligindegi izotremalardin' semeystvosı ( $T_3 > T_2 > T_1$ )

**Adiabatalı protsess.** Bul protseste sırtqı ortalıq penen *jıllıq almasıw* bolmaydı. Sonlıqtan bul protsess ushın temodinamikanın' birinshi baslaması bılay jazıladı:

$$C_v dT + p dV = 0. \quad (18-5)$$

$dV > 0$  de  $dT < 0$  ekenligi ko'rinip tur. Demek ken'eyiwde jumıs gazdin' ishki energiyası esabınan islenedi, gaz qısılg'anda gaz u'stinen islegen jumıs gazdin' ishki energiyasın arttırıw ushın jumısaladı.

Adiabata ten'lemesi dep adiabatalıq protsestege parametrlerdi baylanıstıratug'ın ten'leme bolıp tabıladı. Usı ten'lemenı keltirip shıg'aramız.

İdeal gaz ushın ten'lemeden T ushın to'mendegidey an'latpa shıg'arıladı:

$$T = \frac{pV}{C_p - C_v}. \quad (18-6)$$

Bul jerde Meyer ten'lemesi  $R = C_p - C_v$  paydalanılğ'an.

(18-5) ti  $C_v T$  g'a bo'lip ha'm  $\gamma = C_p / C_v$  dep belgilep ( $\gamma$  -adiabata ko'rsetkishi dep ataladı) tabamız:

$$dT/T + (\gamma - 1) * dV/V. \quad (18-7)$$

Bul ten'lemeni integrallap ha'm potentsiallap tabamız:

$$TV^{\gamma-1} = \text{const.} \quad (18-8)$$

ha'm V o'zgeriwshillerine o'tiw ushin (18-8) den hal ten'lemesinen  $T = pV/R$  di qoyamız ha'm to'mendegi ten'lemeni alamız:

$$pV^{\gamma} = \text{const.} \quad (18-9a)$$

Sol sıyaqlı

$$T^{\gamma} p^{\gamma-1} = \text{const.} \quad (18-9b)$$

Adiabatalıq protseste islengen jumıs bılay esaplanadı:

$$A = \int_{(1)}^{(2)} p dV = p_1 V_1^{\gamma} \int_{(V_1)}^{(V_2)} \frac{dV}{V^{\gamma}} = \frac{p_1 V_1^{\gamma}}{1-\gamma} (V_2^{-\gamma+1} - V_1^{-\gamma+1}) = \frac{RT_1}{\gamma-1} \left[ 1 - \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \right]. \quad (18-10)$$

Bul an'latpada  $p_1 V_1 = RT_1$  ekenligi esapqa alıng'an.

Sonın' menen birge  $\left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} = \frac{T_2}{T_1}$  ekenliginen (18-10) dı bılay tu'rlandiremiz:

$$A = \frac{R(T_1 - T_2)}{\gamma - 1}. \quad (18-11)$$

**Politroplıq protsess.** Joqarıda keltirilgen barlıq protsessler ulıwmalıq ayırmashılıqqa iye - olardıń barlıg'ında da jıllılıq sıyımlıg'ı turaqlı bolıp qaladı. İzoxoralıq ha'm izobaralıq protsesler jıllılıq sıyımlıqları sa'ykes  $C_V$  ha'm  $C_p$  g'a ten'. İzotermalıq protseste ( $dT = 0$ ) jıllılıq sıyımlıg'ı  $\pm \infty$  ge ten'. Al adiabatalıq protseste jıllılıq sıyımlıg'ı nolge ten'.

Jıllılıq sıyımlıg'ı turaqlı bolıp qalatug'ın protsess **politrop protsess** dep ataladı. İzobaralıq, izoxoralıq, izotermalıq ha'm adiabatalıq protsessler politropalıq protsesstin' dara ko'rinisleri bolıp tabıladı. Politrop protsesstin' grafikalıq su'wreti bolg'an iymeklik **politropa** dep ataladı.

Jıllılıq sıyımlıg'ı  $C$  nın' turaqlı bolıp qalıwı ushin termodinamikanın' birinshi baslaması to'mendegidey tu'rge iye bolıwı kerek:

$$CdT = C_V dT + p dV. \quad (18-12)$$

(18-7) ni alıw ushin (18-5) ti ne qalg'an bolsaq, (18-12) ni de sonday o'zgerislerge ushıratamız:

$$\frac{dT}{T} + \frac{C_p - C_V}{C_V - C} \frac{dV}{V} = 0. \quad (18-13)$$

(18-13) ni integrallap

$$TV^{n-1} = \text{const.} \quad (18-14)$$

Bul jerde

$$\frac{C_p - C_v}{C_v - C} = n - 1.$$

Bul  $T$ ,  $V$  o'zgermelileridagi **politropa ten'lemesi** dep ataladi. Bul ten'lemeden  $T = pV/R$  formulasidan  $T$  ni jog'altip

$$pV^n = \text{const} \quad (18-15)$$

ten'lemesini alamiz. Bul jerde  $n = \frac{C - C_p}{C - C_v}$  **politropa ko'rsetkishi** dep ataladi.

$C = 0$  ha'm  $\gamma = n$  de (18-15) ten adiabatliq,  $C = \infty$ ,  $n = 1$  de izotermal,  $C = C_p$ ,  $n = 0$  de izobarliq,  $C = C_v$ ,  $n = \pm\infty$  de izoxoralik protsessler ten'lemeleri alinadi.

$n > 1$  bolg'an jag'daylarda qisilg'anda ideal gaz qizadi, al  $n < 1$  de qisiluv protsessinde ideal gaz salqinlaydi. Haqiqatida da (18-14) den  $n > 1$  de ko'lem kishireygende  $T$  ning artatug'inlig'i, al  $n < 1$  de (da'reje ko'rsetkishi teris ma'niske iye ha'm sonliqtan on' da'rejega iye  $V$  bo'lshektin' bo'limine tu'sedi)  $V$  ning kemeyuvi menen  $T$  ning da kemeyatug'inlig'i ko'rinib tur.

### Endi misallar keltiremiz.

1. Da'slepki temperaturasi  $T_0 = 400$  K, ko'lemi  $V_0 = 10$  l bolg'an geliy adiabatliq rejimde keneytiledi. Na'tiyjeda onin' basimi  $p_0 = 5 \cdot 10^6$  Pa dan  $p = 2 \cdot 10^5$  Pa g'a shekem kishireyedi. Geliyding aqirg'i ko'lemi menen temperaturasi aniqlan'iz.

Adiabatliq ken'eyiw ushin minag'an iymiz:

$$pV^\gamma = p_0 V_0^\gamma.$$

Bul jerde geliy ushin  $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = 5/3 = 1,66$ . Bunnan aqirg'i ko'lem bilayinsha aniqlanadi:

$$V = \frac{p_0}{p} V_0^\gamma = (25)^{0,6} \cdot 10 \text{ l} = 69 \text{ l}.$$

Baslang'ish ha'm aqirg'i hallar ushin ideal gazding ten'lemesini jazip

$$p_0 V_0 = \nu RT, \quad p V = \nu RT$$

ekenligine iye bolamiz. Bul ten'lemelerding shep ha'm on' ta'replerini ag'zama-ag'za bo'lip

$$T = \frac{pV}{p_0 V_0} T_0 = \frac{2 \cdot 69}{50 \cdot 10} 400 \text{ K} = 110,4 \text{ K}$$

ekenligin alamız.

w. Endi gazlerdegi sestin' tezligin anıqlayıq.

Mexanikada gazlerdegi ses tolqınların' tarqalıw tezligi ushın to'mendegidey formula alınadı:

$$c = \sqrt{\frac{dP}{d\rho}}.$$

Bul jerde  $\rho$  arqalı gazdin' tıg'ızlıq'ı belgilengen. Basım  $P$  bolsa tıg'ızlıq  $\rho$  penen temperatura  $T$  g'a da baylanışlı bolg'anlıqtan  $\frac{dP}{d\rho}$  tuwındısın qanday ma'niste tu'siniwimiz kerek degen soraw

kelip shıg'adı. Nyuton basım tıg'ızlıq penen Boyle-Mariot nızamı boyınsha  $P/\rho = \text{const}$  tu'rinde baylanışqan dep esapladı. Demek ses tolqınındag'ı qısılğ'an ha'm ken'eygen orınlarda gazdin' temperaturası da'rha'l ten'lesedi, sestin' tarqalıwı izotremalıq protsess dep esaplawımız kerek.

Bunday boljaw durıs bolatug'ın bolsa  $\frac{dP}{d\rho}$  nın' ornına dara tuwındı  $\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_T$  nı alıwımız kerek.

Sonlıqtan  $c = \sqrt{\frac{dP}{d\rho}}$  formulası Nyuton formulasına o'tedi:

$$c_N = \sqrt{\frac{P}{\rho}} = \sqrt{\frac{RT}{\mu}}.$$

Bul formulada  $\mu$  arqalı gazdin' molekualıq salmag'ı belgilengen.  $c_N$  degi  $N$  indeksi sestin' tezliginin' Nyuton formulası menen anıqlang'anlıg'ın bildiredi. Hawa ushın  $\mu = 28.8$ ,  $T = 273$  K bolg'anda  $c_N = 280$  m/s, al ta'jiriybe bolsa  $c = 330$  m/s ekenligin beredi.

Bunday ayırmanın' orın alıwı Laplas (1749-1827) ta'repinen saplastırıldı. Ol gazde ses tolqını tarqalg'anda jıllılıq o'tkizishlikтин' ta'sirinin' bolmaytug'inlig'in, sonlıqtan jıllılıq almasıwının' orın almaytug'inlig'in ko'rsetti. Sonlıqtan gazlerdegi ses tolqınların' taralıwı adiabatalıq protsess bolıp esaplanadı (Nyuton boyınsha izotremalıq protsess ekenligin esletip o'temiz). Bunday jag'daylarda  $\gamma PdV + VdP = 0$  adiabata ten'lemesinen paydalanamız. Bul ten'lemege ko'lem  $V$  nın' ornına tıg'ızlıq  $\rho \sim 1/V$  nı paydalansaq

$$\gamma PdP - \rho dP = 0.$$

Bunnan adiabatalıq protsess ushın

$$\frac{dP}{d\rho} = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_{ad} = \frac{\gamma P}{\rho} = \gamma \left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_T.$$

Sonlıqtan Nyuton formulası ornına Laplas formulası alınadı:

$$c_1 = \sqrt{\gamma \frac{P}{\rho}} = c_N \sqrt{\gamma}.$$

Hawa ushın  $\gamma = 1.4$  ekenligin bilemiz. Sonlıqtan  $T = 273$  K temperaturada

$$c_1 = 280\sqrt{1.4} \text{ m/s} = 330 \text{ m/s}$$

ha'm bul shama ta'jiriybede aling'an shama'ga sa'ykes keledi.

$c_1$  din'  $c_N$  ge qatnasının'  $\sqrt{\gamma}$  g'a ten' ekenligi joqarıda ko'rinip tur. Sonlıqtan

$$\gamma = (c / c_N)^2 = (c_1 / c_N)^2.$$

Bul formula  $\gamma$  ni eksperimentte anıqlaw ushın tiykar bola aladı.

**Gazdegi protsesslerdin' ju'riwi sa'ykes sırtqı sharayatlardın' jaratılıwı menen ta'miyinlenedi. Bunday jag'dayda gazdi ten'salmaqlıq hallar arqalı izbe-iz o'tiwge ma'jbu'rleymiz dep ayta alamız. O'z-o'zine qoyıl'gan ideal gaz tek g'ana sheksiz u'lken ken'islikte tarqap ketiwden basqa qa'biletlikke iye emes. Al real gazde jag'day basqasha boladı. Bunday gaz ko'p na'rsege qa'biletli. Mısalı rawajlanıwının' belgili etapında A'lem tolıg'ı menen gaz ta'rizli zat penen tolg'an bolsa kerek.**

## 19-§. İdeal gaz entropiyası

*İdeal gaz entropiyası. Entropiyanın' fizikalıq ma'nisi. İdeal gazler protseslerindeki entropiyanın' o'zgerisin esaplaw.*

Termodinamikanın' birinshi baslaması an'latpasının' eki ta'repine de T g'a bo'lip alamız:

$$\frac{\delta Q}{T} = C_v \frac{dT}{T} + \frac{p}{T} dT. \quad (19.1)$$

$\frac{dT}{T} = d \ln T$ ,  $\frac{dV}{V} = d \ln V$  ekenligi esapqa alıp ha'm joqarıdag'ı ten'lemege  $\frac{p}{T} = \frac{R}{V}$  ten'ligin qoyıp alamız:

$$\frac{\delta Q}{T} = d(C_v \ln T + R \ln V). \quad (19.2)$$

Bul ten'liktin' on' ta'repi torlıq differentials. Demek shep ta'repi  $\frac{\delta Q}{T}$  de tolıq differentials bolıp tabıladı. Differentialsı  $\frac{\delta Q}{T}$  bolıp tabılatug'ın hal funktsiyası entropiya dep ataladı ha'm S belgisi menen belgilenedi. Solay etip

$$dS = \frac{\delta Q}{T}. \quad (19.3)$$

*Ten' salmaqlı emes, qaytımsız protsessler ushın dS ti dQ ha'm T arqalı an'latıw durıs bolmaydı.*



(19.3) entropiyanın' absolyut ma'nisin emes, al onın' o'zgerisin beredi. Bul formulanın' ja'rdeminde sistema bir haldan ekinshi halg'a o'tkende entropiyanın' qanshag'a o'zgeretug'inlig'ı esaplawg'a boladı. Sonlıqtan da entropiyanı iqtıyarlı additiv turaqlı da'llikke shekem anıqlang'an dep esaplaymız. Usıg'an baylanıslı entropiyanı anıqlawdag'ı jag'day energiyanı anıqlawdag'ı jag'dayg'a sa'ykes keledi. Fizikalıq ma'niske entropiyanın' o'zi emes, al *entropiyalardıń ayırması* iye boladı. Ayırım hallardag'ı entropiyanın' ma'nisin sha'rtli tu'rde nolge ten' dep alıw qabil etilgen. Bunday jag'dayda entropiya an'latpasın integrallawdan kelip shıg'atug'ın iqtıyarlı turaqlınnıń ma'nisin anıqlap alıw mu'mkin.

Absolyut temperatura  $T$  g'a bo'lingen sistema ta'repinen alıng'an jıllılıq mug'darın a'dette *keltirilgen jıllılıq mug'darı* dep ataydı.  $\delta Q/T$  sheksiz kishi protsesste alıng'an elementar keltirilgen jıllılıq mug'darı, al  $\int \frac{\delta Q}{T}$  integralı bolsa shekli protsesste alıng'an *keltirilgen jıllılıq mug'darı* dep ataladı.

Qa'legen kvazistatikalıq aylanbalı protsesste sistema ta'repinen alınatug'ın *keltirilgen jıllılıq mug'darı* nolge ten'. Usınday anıqlamag'a ekvivalent bolg'an anıqlama bılayınsha aytiladı:

Sistema ta'repinen kvazistatikalıq jol menen alıng'an *keltirilgen jıllılıq mug'darı* o'tiw sistemanın' bir haldan ekinshi halg'a o'tiw jolınan g'a'rezsiz bolıp, tek g'ana sistemanın' da'slepki ha'm keyingi halları boyınsha anıqlanadı.

Demek sistemanın' entropiyası iqtıyarlı turaqlı da'lliginde anıqlang'an hal funktsiyası bolıp tabıladı. Anıqlama boyınsha ten' salmaqlı bolg'an eki 1 ha'm 2 hallarındag'ı entropiyalardıń ayırması sistemanı 1-haldan 2-halg'a o'tkeriw ushın kerekli bolg'an keltirilgen jıllılıq mug'darına ten'. Solay etip 1- ha'm 2-hallarda entropiyalar  $S_1$  ha'm  $S_2$  arqalı belgilenip anıqlama boyınsha

$$S_1 - S_2 = \oint_{1 \rightarrow 2} \frac{\delta Q}{T}.$$

Solay etip anıqlama boyınsha

$$S = \int_{KBCT} \frac{\delta Q}{T}.$$

Bul jerde integral sistemanı sha'rtli tu'rde da'slepki hal dep atalatug'ın haldan biz qarap atırg'an halg'a o'tkeretug'ın iqtıyarlı kvazistatikalıq protsess ushın alınadı.  $S$  tin' differentsialı ushın

$$dS = \oint \frac{\delta Q}{T} \bigg|_{kvst}$$

an'latpasına iye bolamız.  $\delta S$  dın' qanday da bir funktsiyanın' differentsialı emes ekenligin atap o'tilgen edi. Biraq  $dS = \oint \frac{\delta Q}{T} \bigg|_{kvst}$  formulası sistema ta'repinen kvazistatikalıq jol menen alıng'an

$\delta Q$  jıllılıg'ı  $T$  g'a bo'lingennen keyin hal funktsiyası - entropiyanın' tolıq differentsialına aylanadı.

Mısal retinde ideal gaz molekularının' bir molinin' entropiyasın esaplaymız.

İdeal gaz qatnasatug'ın sheksiz kishi kvazistatikalıq protsess ushın

$$\delta Q = C_v dT + p dV = C_v(T) dT + RT \frac{dV}{V}$$

an'latpasın jazamız.

Bunnan

$$dS = \frac{\delta Q}{T} = C_v(T) \frac{dT}{T} + R \frac{dV}{V},$$

$$S = \int C_v(T) \frac{dT}{T} + R \ln V.$$

Eger jıllılıq sıyımlıg'ı  $C_v$  temperaturadan g'a'rezsiz bolsa an'latpa jen'il integrallanadı:

$$S = C_v \ln T + R \ln V + \text{const}.$$

Eger gazdin' v moli ushın jazatug'ın bolsaq mına an'latpanı alamız:

$$S = \nu C_v \ln T + \nu R \ln V + \text{const}.$$

Bul an'latpa alıng'anda gazdegi molekulalar sanı o'zgermeydi dep esaplang'anlıg'ın umıtpawımız kerek. Sonlıqtan entropiya ushın jazılğ'an an'latpadag'ı **additiv turaqlı gazdegi bo'leksheler sanına g'a'rezli bolıwı mu'mkin**. Bul turaqlı anıqlag'anda entropiya S ti bo'leksheler sanına (yamasa moller sanı  $\nu$  ge) proporsional etip alıw kerek. Bul sha'rtke to'mendegidey an'latpa sa'ykes keledi:

$$S = \nu \int C_v \ln T + R \ln \frac{V}{\nu} + \text{const}.$$

yamasa

$$S = \frac{N}{N_{AB}} \int C_v \ln T + R \ln \frac{V}{\nu} + \text{const}.$$

Eki an'latpada da qawsırma ishindegi additiv shamalar gazdegi bo'leksheler sanına baylanışlı emes. Sonın' menen bul an'latpalar bo'leksheler sanı turaqlı emes, al o'zgermeli bolg'an gazler ushın da durıs na'tiyje beredi.

Eger kvazistatikalıq protsess adiabatlıq protsess bolıp tabılaturg'ın bolsa  $\delta Q = 0$ , sog'an sa'ykes  $dS = 0$ ,  $S = \text{const}$ . Demek kvazistatikalıq adiabatlıq protsess turaqlı entropiyada ju'retug'ın protsess bolıp tabıladı. Solıqtan bunday protsesstı **izoentropiyalıq** protsess dep te ataydı.

**Entropiyanın' fizikalıq ma'nisi.** (19.2) formulasın izotermalıq protsestege entropiyanın' o'zgerisin esaplaw ushın qollanamız. Bul jag'dayda gazdin' energiyalıq halı o'zgerissiz qaladı, al xarakteristikalırdın' mu'mkin bolg'an o'zgerisleri ko'lemnin' o'zgerisine baylanışlı. Bul jag'day ushın

$$dS = R d \ln V \quad (19.4)$$

ha'm, sa'ykes

$$\underset{(1)}{\partial} dS = R \underset{(1)}{\partial} d \ln V. \quad (19.5)$$

Integrallawdan keyin

$$S_2 - S_1 = R (\ln V_2 - \ln V_1) = R \ln \frac{V_2}{V_1}. \quad (19.6)$$

Bul formulani bunnan bilay tu'rlandiriv ushın ten' salmaqlıq haldag'ı gaz iyelep turg'an ko'lem menen ken'isliktegi mikrohalla sanı arasındag'ı baylanıstı paydalanıw kerek. Bul baylanıs (5-6) formulası  $[\Gamma_0 = N!/(N - n)!]$  menen beriledi. Bir moldegi bo'leksheler sanı Avagadro sanı  $N_A$  g'a ten'. Sonlıqtan (19.6) g'a kiriwshi  $V_1$  ha'm  $V_2$  ko'lemleri ushın (5-6) formula to'mendegi tu'rge iye boladı:

$$\Gamma_{01} = \frac{N_1!}{(N_1 - N_A)!}, \quad \Gamma_{02} = \frac{N_2!}{(N_2 - N_A)!}. \quad (19.7)$$

Bul jerde  $N_1 = \frac{V_1}{l^3}$ ,  $N_2 = \frac{V_2}{l^3}$ ,  $l = 10^{-10}$  m. Sonlıqtan (5-11) Stirling formulasın paydalanıp

$$\frac{\Gamma_{02}}{\Gamma_{01}} = \frac{N_2! (N_1 - N_A)!}{N_1! (N_2 - N_A)!} \times \frac{(N_2/e)^{N_2} [(N_1 - N_A)/e]^{N_1 - N_A}}{(N_1/e)^{N_1} [(N_2 - N_A)/e]^{N_2 - N_A}}. \quad (19.8)$$

an'latiye bolamız

Ku'shli qısılmag'an gaz izertlenedi. Onda  $N_1 \gg N_A$ ,  $N_2 \gg N_A$ . Sonlıqtan da'rejedegi  $N_1$  menen  $N_2$  ge salıstırg'anda  $N_A$  nı esapqa almawg'a boladı. (19.8) din' ornına alamız:

$$\frac{\Gamma_{02}}{\Gamma_{01}} \times \frac{N_2!}{N_1!} \frac{\partial^{N_A}}{\partial} = \frac{V_2!}{V_1!} \frac{\partial^{N_A}}{\partial}. \quad (19.9)$$

(18-9) dı logarifmlese

$$\ln \frac{V_2}{V_1} = \frac{R}{N_A} \times \ln \frac{\Gamma_{02}}{\Gamma_{01}}. \quad (19.10)$$

Bul an'latpanı (18-6) g'a qoysaq

$$S_2 - S_1 = \frac{R}{N_A} \times \ln \frac{\Gamma_{02}}{\Gamma_{01}} = k \ln \Gamma_{02} - k \ln \Gamma_{01}. \quad (19.11)$$

Bul an'latpada  $\frac{R}{N_A} = k$  arqalı Boltsman turaqlısı belgilengen.

(19.11) formulasının' tu'ri minaday pikirdin' tuwılıwına alıp keledi:

**Entropiya qarap atırg'an maktrohaldı payda etetug'ın mikrohalla sanının' logarifmi menen anıqlanadı:**

$$S = k \ln \Gamma. \quad (19.2)$$

Bul ten'lik Boltsman formulası dep ataladı.

Joqarıda keltirilgen talqılawlar Boltsman formulasının' da'lili bolıp tabılmaıdı. Bul formula: 1) ideal gaz ha'm ken'isliktegi mikrohalla; 2) qaytımlı protsessler ushın durıs. (19.12) ge ıqtıyarlı turaqlı sandı qosıp qoyıw mu'mkin. Biraq bul turaqlı sannıq ma'nisin biz nolge ten' dep esapladıq.

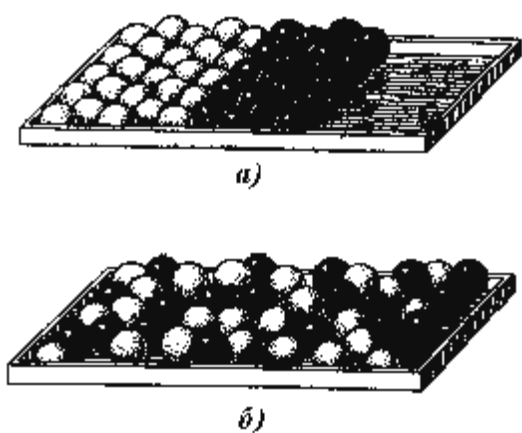
(19.12)-formula entropiyag'a ko'rgizbeli tu'r beredi:

Sistema qansha da'rejede ta'rtpke salıng'an bolsa, makrohaldı payda etetug'ın mikrohalla sani sonshama da'rejede az boladı. Demek entropiya sistemanın' ta'rtpke salınıwının' o'lshegi bolıp tabıladı. Sistema ten' salmaqlıq halg'a kelgende entropiya o'zinin' maksimum ma'nisine jetedi.

**Demek o'z-o'zine qoyılg'an sistema ten' salmaqlıq halına qaray qozg'aladı, Yag'ny o'z-o'zine qoyılg'an sistemada entropiyanın' ma'nisi kemeymeydi. Bul termodinamikanın' ekinshi baslamasının' anıqlamaların' biri bolıp tabıladı.**

Entropiya menen sistemadag'ı ta'rtipsizliktin' baylanısı haqqında birqansha mısallar keltiremiz.

Mexanikalıq energiyanı jıllılıq energiyasına aylandırıw ta'rtpi qozg'alıs energiyasın ta'rtipsiz qozalıs energiyasına aylandırıw bolıp tabıladı. Bir birine qarama-qarsı bolg'an bul eki protsesstin' ten'dey huqıqqa iye emes ekenligin an'sat tu'siniwge boladı. Ta'rtpi qozg'alıs energiyasın ta'rtipsiz qozg'alıs energiyasına aylandırıw ta'rtipsiz qozg'alıs energiyasın ta'rtpi ozg'alıs energiyasına aylandırıwdan salıstırmas da'rejede jen'il.



2-18 su'wret. Ta'rtp penen ta'rtipsizlik  
arasındag'ı  
qaytımsızlıqtı sa'wlelendiretug'ın su'wret.

Kelesi misal bul jag'daydı an'sat tu'sindiredi. Qara ha'm aq sharikler salıng'an qutını ko'z aldımızg'a keltiremiz (su'wrette ko'rsetilgen). Da'slep qara sharikler qutının' bir ta'repinde, al aq sharikler qutının' ekinshi yarımında jaylasqan bolsın. Qutını silksek sharikler aralasıp ketedi. Qutını a'ıwayı sikiw shariklerdi tolıq ta'rtipsizlikke alıp keldi. Biraq usınday silkiw menen shariklerdin' jayg'asıwlarındag'ı ta'rtpi qayta tikley almaymız.

Bunday o'zine ta'n qaytımsızlıq qa'legen molekullıq sistemada anıq ko'rinedi.

Usı qubılıs penen jıllılıq protsesslerdin' qaytımsızlıg'ı baylanıslı: bunday protsessler ta'rtipsızlıkların' artıwı bag'ıtında ju'redi. Demek jıllılıq protsesslerinin' qaytımsızlıg'ı ta'rtip penen ta'rtipsızlıqtın' qaytımsızlıg'ı menen tikkeley baylanıslı eken dep juwmaq shıg'aramız.

**İdeal gaz protseslerindeki entropiyanın' o'zgeriwin esaplaw.** Esaplaw (19.3) ti esapqa alıw menen (19.2) tiykarında ju'rgiziledi:

$$dS = d(C_V \ln T + R \ln V). \quad (19.13)$$

İzotermalıq protseste entropiyanın' o'zgerisi (19.6) formulası ja'rdeminde a'melge asırıladi. Ko'lem u'lkeygende entropiya o'sedi, kishireygende - kemeyedi. Bul na'tiyjeni an'sat tu'siniwge boladi: ko'lem u'lkeygende bo'leksheler ushın orınlar, demek mikrohollar sanı ko'beyedi.

İzoxoralı protseste ( $dV=0$ )

$$S_2 - S_1 = C_V \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (19.14)$$

temperaturanın' o'siwi menen entropiya u'lkeyedi. Bul na'tiyje bılayınsha tu'sindiriledi: temperatura ko'terilgende bo'lekshelerin' ortasha energiyası o'sedi, sonlıqtan mu'mkin bolg'an energiyalıq hallar sanı artadı.

Adiabatalıq protseste (19.13) ten alamız

$$S_2 - S_1 = C_V \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1}. \quad (19.15)$$

Sonın' menen birge

$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1}, \quad \gamma = \frac{C_p}{C_V}.$$

Sonlıqtan  $\ln \frac{T_2}{T_1} = (\gamma-1) \ln \frac{V_1}{V_2} = -(\gamma-1) \ln \frac{V_2}{V_1}$ . Onda (19.15) mına tu'rge keledi ( $-C_p + C_V + R = 0$  ekenligi esapqa alınadı):

$$S_2 - S_1 = \left[ -C_V \left( \frac{C_p}{C_V} - 1 \right) + R \right] \ln \frac{V_2}{V_1} = 0. \quad (19.6)$$

Demek adiabatalıq qaytımlı protseste entropiya o'zgermeydi.

***Gazdin' adiabatalıq ken'eyiwinde ko'lemnin' u'lkeyiwine baylanıslı entropiya o'sedi, biraq usın' menen qatar baqlanatug'ın temperaturanı to'menlewi saldarınan entropiya kemeyedi ha'm usı eki tendentsiya bir birin tolıg'ı menen ten'lestiredi.***

Eger sistema entropiyaları  $S_1$  ha'm  $S_2$  bolg'an eki sistemadan turatug'ın bolsa onda bunday sistemanın' entropiyası

$$S = S_1 + S_2.$$

Demek entropiya additiv hal funksiyası bolıp tabıladı. Sistemanın entropiyası usı sistemani qurawshı sistemalardıń entropiyalarınń qosındısına ten’.

*Sistemanın entropiyası qanday da bir qaytımlı protseste sistemag’a ta’sir etiwshi sırtqı sharayatlardıń ta’sirinde o’zgeredi. Sırtqı sharayatlardıń entropiyag’a ta’sir etiw mexanizmi to’mendegilerden ibarat: sırtqı sharayatlar sistemanın jetisiwi ushın mu’min bolg’an mikrohاللardı ha’m olardıń sanın anıqlaydı. Sol mikrohاللar sheklerinde sistema ten’salmaqlıq halına jetedi, al entropiyası sa’ykes ma’niske iye boladı. Sonlıqtan entropiyanın ma’nisi sırtqı sharayatlardıń o’zgeriwi menen o’zgeriske ushıraydı ha’m sırtqı sharayatlarg’a sa’ykes keliwshi maksimalıq ma’nisine jetedi.*

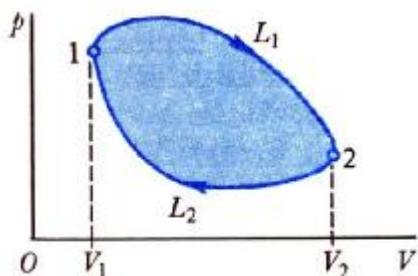
*Entropiya berilgen makrohalg’a sa’ykes keliwshi mikrohاللar sanının logarifmi menen anıqlanadı.*

*Ten’salmaqlıq halda entropiya maksimal ma’nisine jetedi. Sebebi ten’salmaqlıq halda termodinamikalıq itimallıq maksimal ma’niske iye. Bunnan o’z-o’zine qoyılg’a izolyatsiyalang’an sistemanın entropiyası sırtqı sharayatlarg’a sa’ykes keliwshi maksimum ma’nisine jetkenshe o’sedi.*

## 20-§. Tsikllıq protsessler

*Tsikl jumısı. Paydalı ta’sir koeffitsienti. Karno tsikli. Karno tsiklinin paydalı ta’sir koeffitsienti. Entropiya ja’rdeminde paydalı ta’sir koeffitsientin esaplaw. Kelvin ta’repinen termodinamikanın ekinshi baslamasının usınılıwı. Klauzius ta’repinen termodinamikanın ekinshi baslamasının usınılıwı. Salqınlatıw mashinası ha’m qızdırg’ısh. Birdey jılılıq bergish ha’m jılılıq qabil etiwshilerge iye Karno tsikli boyınsha islewshi mashinalardıń paydalı ta’sir koeffitsienti. Temperaturalardıń absolyut termodinamikalıq shkalası.*

**Anıqlaması:** Sistema o’zinin da’slepki halına qayıp keletug’ın protsess tsikllıq protsess dep ataladı. Tsikl protsessler diagrammasında tuyıq iymeklik tu’rinde su’wretlenedi (20-1 su’wrette ko’rsetilgen). Tsikldı saat strelkasının ju’riw bag’ıtında da, og’an qarama-qarsı bag’ıtta da o’tiw mu’min. Sonlıqtan za’ru’r jag’daylarda bag’ıttı strelka menen belgilew kerek. Mısalı  $L_1$  menen  $L_2$  sızıqları 1- ha’m 2-hاللardı tutastırıwshı sızıqlar bolıp tabıladı.



20-1 su’wret. Tsikl

**Tsikl jumısı.** 1-hاللdan baslap saat strelkası bag’ıtında ju’rip tsikldı a’melge asıramız. Usında islengen jumıs:

$$A = \oint_{L_1}^{(2)} p dV + \oint_{L_1}^{(1)} p dV. \quad (20.1)$$

Birinshi integral  $V_1, V_2, 2, L_1$  sızığ'ı 1 noqatı ha'm  $V_1$  menen qorshalg'an maydang'a ten'. Al ekinshi integral bolsa  $V_1, V_2, 2, L_2$  sızığ'ı 1 noqatı,  $V_1$ menen qorshalg'an maydang'a ten' ha'm belgisi teris. Sonlıqtan  $A$  jumısının' ma'nisi  $L_1$  ha'm  $L_2$  cızıqları menen shegaralang'an maydang'a ten'.

Bul paragraftag'ı tsiklg'a berilgen anıqlama, jumıstın' shaması tek g'ana ideal gazge tiyisli bolıp qalmay, barlıq jag'daylardı da o'z ishine qamtıydı. Eger termodinamikanıq birinshi baslamasının' an'latpasının' eki ta'repin de qarap atırg'an tsikl boyınsha integrallasaq

$$\oint \delta Q = \oint dU + \oint p dV. \quad (20.2)$$

İntegral tuyıq kontur boyınsha alınadı. Toliq differentsialdan tuyıq kontur boyınsha aling'an integral

$$\oint dU = U_1 - U_1 = 0. \quad (20.3)$$

(20.3) ti esapqa alıp (20.2) ni bılay jazamız

$$\oint \delta Q = \oint p dV = A. \quad (20.4)$$

Bul an'latpanın' ma'nisi: *Tsikldag'ı islengen barlıq jumıs sistemag'a berilgen jıllılıq esabınan orınlanadı. Tsikldın' bir bo'liminde jıllılıq sistemag'a beriledi, ekinshi bo'liminde sistemadan alınadı. Tsikldı saat tilinin' qozg'alısı bag'ıtında sho'lkemlestirse, sistemag'a berilgen jıllılıq mug'darı sistemadan aling'an jıllılıq mug'darınan artıq boladı. Bul jag'dayda sistema on' jumıs isleydi.*

Al tsikldı saat tili qozg'alısı bag'ıtına qarama-qarsı bag'ıtta 1-noqattan 2-noqatqa qaray da'slep  $L_2$  sızığ'ı menen ju'rip,  $L_1$  sızığ'ı menen qayıtıp keliw menen sho'lkemlestirse islengen jumıs absolyut ma'nisi boyınsha da'slepki jag'daydag'ıday, al belgisi teris belgige iye boladı. *Bunday jag'dayda sistemanın' o'zi jumıs islemeydi, al sistema u'stinen jumıs islenedi. Sistema jumıstı jıllılıqqa aylandıradı: tsikldın' bir bo'liminde sistemag'a jıllılıq kelip tu'sedi, al ekinshi bo'liminde sistemadan kirgen jıllılıqqa qarag'anda ko'birek jıllılıq shıg'adı. Sistemanın' o'zi tsikldan keyin o'zinin' da'slepki halına qayıtıp keledi.*

Tsikldın' ha'r bir noqatında sistemanın' temperaturası hal ten'lemesi tiykarında anıqlanadı. Uliwma jag'dayda temperatura noqattan noqatqa o'tkende o'zgeredi, ha'r bir noqatta temperatura sa'ykes termostat ta'repinen ta'miynlenedi. Sonlıqtan sistema ta'repinen tsikldın' payda etiliwi ushın sistemanı o'zgermeli temperaturag'a iye termostatqa qoyıw yamasa bir termostattan basqa temperaturalı termostatqa o'tiwı ko'z aldımızg'a keltiriwimiz kerek. Ekinshi ko'z-qaras ko'rgizbelirek. Sebebi bul jag'dayda turaqlı tu'rde paydalanılatug'ın jıllılıq beriwshi ha'm jıllılıq qabıl etiwshi du'zilisler haqqında aytıwg'a mu'mkinshilik boladı.

Tsikldın' qaysı noqatında sistema jıllılıq alatug'inlig'ı, qaysısında jıllılıq beretug'inlig'ın aytıw qıyın. Printsipinde a'piwayı juwap beriwge boladı: sistema termostatqa  $\delta Q < 0$  bolg'an noqatlarda jıllılıq qabıllag'ıshqa jıllılıq beredi, al  $\delta Q > 0$  noqatlarda jıllılıq beriwshi du'zilisten

jillılıq aladı. Yag'niy  $dU + pdV < 0$  bolg'an jag'dayda sistema jillılıq beredi,  $dU + pdV > 0$  bolg'anda jillılıq aladı.

Tsikldag'ı sistemanın' jillılıq beretug'in noqatları menen jillılıq alatug'in noqatların ayırıp turatug'in noqat  $dU + pdV = 0$  ten'lemesin sheshiw arqalı anıqlanadı. Bul sheshim tsikldin' tu'rine, hal ten'lemesine g'a'rezli bolıp an'satlıq penen alınbaydı. To'mende bul noqatlardı grafikalıq jol menen alıwg'a tırısamız.

**Paydalı ta'sir koeffitsienti.** Tsikllıq protsesti orınlawshı sistema o'zinin' a'hmiyeti boyınsha termostattan alatug'in jillılıqtı jumısqa aylandırıwshı mashina bolıp tabıladı. Termostattan aling'an jillılıqtın' jumısqa aylang'an bo'limi qanshama ko'p bolsa mashina sonshama *effektivli* boladı. Mashinanın' effektivligi bir tsiklda islengen jumıs A nın' termostattan aling'an jillılıq mug'darı  $Q^{(+)}$  qa qatnası bolg'an paydalı ta'sir koeffitsienti  $\eta$  menen ta'riplenedi:

$$\eta = \frac{A}{Q^{(+)}}. \quad (20.5)$$

$Q^{(+)}$  termostatlardan sistemag'a berilgen jillılıq. Bul shamanın' belgisi on'. (20.4) formulasın bılay ko'shirip jazamız:

$$\oint \delta Q = \int_{(+)} \delta Q + \int_{(-)} \delta Q = Q^{(+)} + Q^{(-)}. \quad (20.6)$$

Bul jerde  $\int_{(+)}$  ha'm  $\int_{(-)}$  integralları tsikldin' sistemag'a sa'ykes jillılıq kelip tu'setug'in ha'm

jillılıq alıp ketiletug'in ushastkalar boyınsha aling'an.  $Q^{(-)}$  arqalı mashinadan shıg'ıwshı jillılıq mug'darı (belgisi teris) belgilengen. (20.6)-an'latpanı esapqa aling'an jag'dayda paydalı ta'sir koeffitsienti bılay jazıladı:

$$\eta = \frac{Q^{(+)} + Q^{(-)}}{Q^{(+)}} = 1 + \frac{Q^{(-)}}{Q^{(+)}}. \quad (20.7)$$

**Bul shama barlıq waqıtta da birden kishi, sebebi  $Q^{(-)}$  teris belgige iye.**

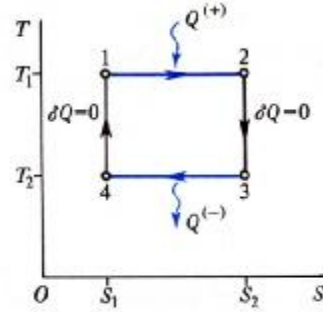
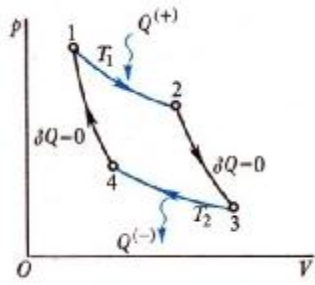
**Karno tsikli.** Karno tsikli ha'm temperaturalarındag'ı eki izotermadan ha'm eki adiabatadan turadı. Tsikldin' bag'ıtı strekalar menen ko'rsetilgen. Karno tsiklin orınlaw ushın eki termostat kerek. Joqarı temperaturalı termostatı *jillılıq beriwshi*, al salıstırmalı to'men temperaturag'a iye termostat *jillılıq qabıllawshı* dep ataladı. Adiabatalıq ushastkalar arqalı o'tkende sistema sırttan izolyatsiyalang'an bolıwı sha'rt.

İdeal gaz jag'dayında ha'm lerdi an'sat esaplawg'a boladı. 1-2 ushastkasındag'ı jillılıq beriwshi du'zilisten aling'an jillılıq

$$\eta = \frac{Q^{(+)} + Q^{(-)}}{Q^{(+)}} = 1 + \frac{Q^{(-)}}{Q^{(+)}} = RT_1 \ln \frac{V_1}{V_2}. \quad (20.8)$$

İzotermalıq protsestege ishki energiyanın' o'zgerisinin' nolge ten' ekenligi esapqa aling'an. 3-4 ushastkada sistema jillılıqtı jillılıq qabıllag'ısh du'ziliske beredi.





20-2 su'wret. a) Karno tsikli. B) T ha'm S o'zgermelilerindegi Karno tsikli sxeması.

$$Q^{(-)} = \oint_{(3)}^{(4)} \delta Q = RT_2 \ln \frac{V_4}{V_3}. \quad (20.9)$$

TV<sup>γ-1</sup> = const ten'lemesinen

$$T_1 V_2^{\gamma-1} = T_2 V_3^{\gamma-1}, \quad T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_4^{\gamma-1}. \quad (20.10)$$

Bul eki an'latpanin' shep ta'replerin shep ta'replerine, on' ta'replerin on' ta'replerine ag'zama-ag'za bo'lip, iye bolamiz:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}. \quad (20.11)$$

Demek

$$\ln \frac{V_2}{V_1} = - \ln \frac{V_4}{V_3}. \quad (20.12)$$

(20.7) formulası (20.8), (20.9) ha'm (20.12) lardi esapqa alg'anda bilay jazıladı:

$$\mu = 1 + \frac{T_2}{T_1}. \quad (20.13)$$

**Bul formula qaytımli Karno tsikli ushın durıs.**

**Paydali ta'sir ko'effitsientin entropiya ja'rdeminde esaplaw.** Entropiyanın' aniqlaması boyınsha

$$\delta Q = T dS. \quad (20.14)$$

Sonliqtan

$$Q^{(+)} = \oint_{(1)}^{(2)} \delta Q = T_1 \oint_{(1)}^{(2)} dS = T_1 (S_2 - S_1), \quad Q^{(-)} = \oint_{(3)}^{(4)} \delta Q = T_2 \oint_{(3)}^{(4)} dS = T_2 (S_4 - S_3). \quad (20.15)$$

Adiabatalıq qaytımlı protseste entropiyanın' o'zgermeytug'ınlıg'ının esapqa alıp  $S_2 = S_3$ ,  $S_1 = S_4$  ekenligine iye bolamız ha'm sonlıqtan:

$$\eta = 1 + \frac{T_2(S_4 - S_3)}{T_1(S_2 - S_1)} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (20.16)$$

Bul formula (19-13) penen sa'ykes keledi.

**Sistemag'a berilgen jıllılıq tolıg'ı menen islengen jumıs ushın jumsalatug'ın ko'p sanlı protsessler bar. Biraq bunday protsessler tsikllıq emes ha'm sonlıqtan olar haqqında ga'p etilgen joq.**

**Tsikldag'ı entropiyanın' tolıq o'zgerisi nolge ten' bolg'anlıqtan sistemag'a kelip tu'siwshi entropiya sistemadan shıg'ıp ketken entropiyag'a ten' bolıwı kerek. Bul sistemag'a tek jıllılıq kelip tu'setug'ın, al jıllılıq shıg'ıp ketpeytug'ın tsikldın' bolmaytug'ınlıg'ın bildiredi. Sonlıqtan mashinanın' paydalı ta'sir koeffitsienti barlıq waqıtta birden kishi.**

**Tsiklda orınlang'an barlıq jumıs sistemag'a berilgen jıllılıqtın' esabınan orınlanadı.**

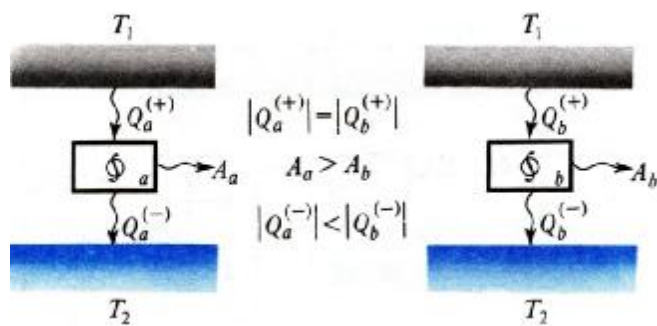
**Tek g'ana bir jıllılıq rezervuarı menen jıllılıq almasıwdın' na'tiyjesinde birden bir na'tiyjesi jumıs islew bolg'an tsikllıq protsesstin' ju'zege keliwi mu'mkin emes (termodinamikanın' ekinshi baslamasının' Kelvin ta'repinen ayılıwı).**

**Birden bir na'tiyjesi to'men qızdırılğ'an deneden joqarı qızdırılğ'an denegе jıllılıqtın' o'tiwi bolıp tabılátug'ın tsikllıq protsesstin' ju'zege keliwi mu'mkin emes (termodinamikanın' ekinshi baslamasının' Klauzius ta'repinen ayılıwı).**

## 21-§. Temperaturaların' absolyut termodinamikalıq shkalası

**Birday jıllılıq beriwshi ha'm jıllılıq qabıllawshılarg'a iye Karno tsiklı menen isleytug'ın qaytımlı mashinalardıń paydalı ta'sir koeffitsienti. Karnonın' birinshi teoremasının' mazmunı to'mendegiden ibarat: *Karno tsiklında islewshi barlıq mashinalar birdey paydalı ta'sir koeffitsientine iye boladı.***

Bul jerde qa'teliklerge jol qoymaslıq ushın biz mına jag'daydı atap o'temiz: Barlıq qaytımlı mashinalar birdey paydalı ta'sir koeffitsientine iye degen ga'p ayılıp atırg'an joq, al Karno tsiklı menen isleytug'ın berilgen jıllılıq beriwshi ha'm berilgen jıllılıq alıwshılarg'a iye barlıq qaytımlı mashinalandıń paydalı ta'sir koeffitsientleri birdey dep tastıyıqlanıp atır. Bıqıtyarlı qaytımlı tsiklda eki temperaturag'a iye termostat penen shekleniwge boladı ha'm joqarıda keltirilgen tastıyıqlaw bunday tsikllerge tiyisli bolmaydı.



21-1 cu'wret. Ha'r kıylı paydalı ta'sir koefitsientine iye a ha'm b mashinaları:

$$\eta_a > \eta_b.$$

Basqa so'z benen aytqanda Karnonin' birinshi teoremasi bılayınsha da ayıldı: **Karno tsiklinin' paydalı ta'sir koefitsienti tsikldi ju'zege keltiriwshi du'ziliske ha'm paydalanılatug'ın zattın' ta'biyatına baylanışlı emes.**

Solay etip endi formulasının' ja'rdeminde mınanı tastıyın'laymız: Karno tsiklinin' paydalı ta'sir koefitsienti tsikldi ju'zege keltiriwshi du'ziliske ha'm paydalanılatug'ın zattın' ta'biyatına baylanışlı emes, al jıllılıq beriwshi menen jıllılıq qabıl etiwshi du'zilislerdin' temperaturaların' qatnasına g'a'rezli. Paydalı ta'sir koefitsienti barlıq waqıtta da birden kishi shama ha'm birge jıllılıq qabıllawshi du'zilistin' temperaturası nolge umtılg'anda jaqınlasadı.

Paydalı ta'sir koefitsientinin'

$$\eta = \frac{Q^{(+)} + Q^{(-)}}{Q^{(+)}} = 1 + \frac{Q^{(-)}}{Q^{(+)}} \quad (21.1)$$

ekenligi ha'm onın' temperaturası bolg'an jıllılıq beriwshi ha'm temperaturası bolg'an jıllılıq qabıl etiwshi du'zilislerine iye bolg'an barlın' qaytımlı mashinalar ushın birdey bolatug'ınlg'ı da'lillengen edi. Sonlıqtan qatnası tek g'ana ha'm temperaturaların' funktsiyası boladı. Demek

$$\frac{Q^{(-)}}{Q^{(+)}} = f(T_2, T_1). \quad (21.2)$$

Bul jerde T emperikalıq shkaladag'ı temperatura.

T<sub>1</sub> menen T<sub>2</sub> temperaturaları arasındag'ı intervaldag'ı T<sub>3</sub> temperaturalı bazı bir dene bolsın. Bul dene T<sub>2</sub> temperaturasına salıstırg'anda jıllılıq beriwshi, al T<sub>1</sub> temperaturasına salıstırg'anda jıllılıq qabıllag'ısh bolıp xızmet etiwı mu'mkin. Bul deneni 20-1 su'wrette ko'rsetilgendey etip qollanamız. a ha'm b mashinaları qaytımlı mashinalar bolıp tabıladı.

a ha'm b qaytımlı mashinalar paydalı ta'sir koefitsienti mashinanın' paydalı ta'sir koefitsientine ten' bir qaytımlı mashinanı payda etedi. Bul

$$Q_a^{(+)} = Q_c^{(+)}, \quad Q_b^{(-)} = Q_c^{(-)}, \quad Q_a^{(-)} = -Q_b^{(+)}, \quad A_a + A_b = A_c. \quad (21.3)$$

(21.2)-an'latpa bul mashinalar ushın mınaday tu'rge iye boladı:

$$\frac{Q_c^{(-)}}{Q_c^{(+)}} = f(t_2, t_1), \quad \frac{Q_a^{(-)}}{Q_a^{(+)}} = f(t_3, t_1), \quad \frac{Q_b^{(-)}}{Q_b^{(+)}} = f(t_2, t_3). \quad (21.4)$$

Bunnan (21.3) ti esapqa alıp

$$f(T_2, T_1) = \frac{Q_c^{(-)}}{Q_c^{(+)}} = \frac{Q_b^{(-)}}{Q_b^{(+)}} = - \frac{\frac{Q_b^{(-)}}{Q_b^{(+)}}}{\frac{Q_a^{(-)}}{Q_a^{(+)}}} = \frac{f(T_2, T_3)}{f(T_3, T_1)}. \quad (21.5)$$

Bul ten'liktin' on' ta'repi  $T_3$  shamasına baylanıssız. Sonlıqtan (21.5) tegi qısqaratug'ınday funktsiya bolıwı kerek. Bul

$$f(T_2, T_1) = - \frac{\varphi(T_2)}{\varphi(T_1)} \quad (21.6)$$

ten'liginin' orınlanıwının' kerek ekenligin ko'rsetedi. arqalı jan'a funktsiya belgilengen. Solay etip Karno tsiklındag'ı jıllılıq mug'darlarınan' qatnası

$$\frac{Q^{(-)}}{Q^{(+)}} = - \frac{\varphi(T_2)}{\varphi(T_1)} \quad (21.7)$$

tu'rinde bolatug'ınlıg'ın ko'rdik.

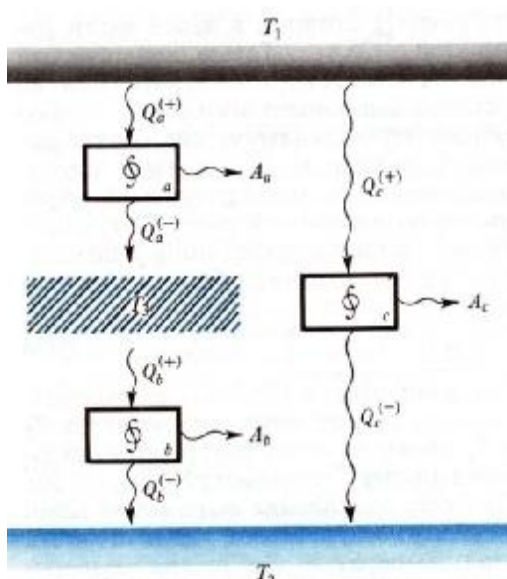
$\frac{Q^{(-)}}{Q^{(+)}} = - \frac{\varphi(T_2)}{\varphi(T_1)}$  *qatnası temperaturalardıń empirikalıq shkalasınan g'a'rezsiz anıq ma'niske iye boladı. Sonlıqtan Kelvin bul qatnastı sa'ykes absolyut termodinamikalıq temperaturalardıń qatnasında etip alıwdı usındı, Yag'nıy*

$$\frac{\varphi(T_2)}{\varphi(T_1)} = \frac{T_2}{T_1}. \quad (21.8)$$

(21.8) boyınsha alıng'an temperaturalar shkalası **absolyut termodinamikalıq shkala**, al **absolyut termodinamikalıq temperatura** dep ataladı. Ayqın empirikalıq shkaladan g'a'rezli emes bolg'anlıqtan bul shkala absolyut shkala bolıp tabıladı. Bul shkalanı keltirip shıg'arg'anda ulıwmalıq termodinamikalıq qatnaslar paydalanılğ'anlıqtan termodinamikalıq shkala dep ataladı. Absolyut termodinamikalıq temperatura ja'rdeminde Karno tsikli menen isleytug'ın mashınanın' paydalı ta'sir koeffitsienti (21.1) bilay jazıladı

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (21.9)$$

(20.13) tegi temperaturası ideal gaz termometri boyınsha anıqlang'an edi. Sonlıqtan (20.13)-ha'm (21.9)-an'latpalardıń birdey ekenligi bul formulalardag'ı temperaturalardıń birdey ekenligin da'llileydi. Demek usı waqıtqa shekemgi bayanlawda  $T$  ha'ripi menen belgilengen temperaturalardıń barlıg'ı da termodinamikalıq temperatura bolıp tabıladı.



21-2 su'wret. Temperaturaların termodinamikalıq shkalasın anıqlaw ushın arnalg'an sızılma.

**Teris temperaturalar.** Anıqlama boyınsha temperatura bo'lekshenin' ortasha kinetikalıq energiyasına proporsional bolıwı kerek. O'z gezeginde teris ma'nisli kinetikalıq energiyanın' bolmaytug'ınlg'ına baylanıslı teris ma'nisli temperaturanın' da bolıwı mu'mkin emes. Bo'lekshelerinin' qozg'alısınin' tek kinetikalıq energiyasın o'z ishine alatug'ın atomlıq sistemalarda da teris ma'nisli teperaturanın' bolıwı fizikalıq ma'niske iye bolmaydı.

Ekinshi ta'repten temperaturanın' bo'lekshelerdin' energiyalar boyınsha bo'listiriliwin ta'ripleytug'ın shama ekenligin de ko'rdik. Mısalı Boltsman bo'listiriliwi formulasın bılayınsha jaza alamız

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{U}{kT}\right)$$

Bul formula jıllılıq ten'salmaqlıg'ı jag'dayında energiyası U bolg'an bo'lekshelerdin' salıstırmalı sanı bolg'na  $\frac{n}{n_0}$  shamasın beredi. Bul san tek g'ana temperaturag'a baylanıslı bolıp tur.

Boltsman formulası  $n = n_0 \exp\left(-\frac{U}{kT}\right)$  temperaturag'a teris ma'niske iye bolıwg'a «mu'mkinshilik beredi». Eger  $U=kT$  bolsa n shaması shamasınan e ese kishi boladı ( $n=n_0 e^{-1}$  ha'm  $n_0=en$ ).

Joqarıdag'ı formulanı logarifmlep  $\ln \frac{n}{n_0} = -\frac{U}{kT}$  an'latpası alamız. Sonlıqtan

$$T = -\frac{U}{k \cdot \ln(n/n_0)}.$$

Bul an'latpadan  $n < n_0$  bolg'anda  $T > 0$  ekenligi ko'rinip tur.

Eger  $n > n_0$  ten'sizligi orın alatug'ın sistema payda ete alsaq, bunday sistemadag'ı temperaturanın' ma'nisi teris bolg'an bolar edi.

Klassikalıq nızamlarg'a bag'ınatug'ın sistemalarda teris ma'niske iye temperaturlardı payda etiw mu'mkin emes. Teris ma'niske iye temperaturalar kvant sistemalarında alınıwı mu'mkin.

**Teris ma'nisli absolyut termodinamikalıq temperaturanın' bolıwı mu'mkin emes. Biraqta teris ma'nisli absolyut termodinamikalıq temperatura bazı bir fizikalıq situatsiyalardı talqılaw ushın paydalı bolg'an tu'sinik bolıp tabıladı.**

**Paydalanıp atırg'an jumıs islewshi deneden (paydalanıp atırg'an zattın' ta'biyatınan) g'a'rezsiz Karno tsikli boyınsha isleytug'ın barlıq qaytımlı mashinalar birdey paydalı ta'sir koeffitsientine iye boladı.**

## 22-§. Termodinamikanın' ekinshi baslaması

Karnonın' ekinshi teoreması. Klauzius ten'sizligi. Entropiya. Termodinamikanın' ekinshi baslaması. Termodinamikanın' ekinshi baslamasının' statistikalıq ekenligi. Qaytımsız protseslerdegi entropiyanın' o'zgeriwi. Jumıs islewdegi entropiyanın' tutqan ornı. Termodinamikanın' ekinshi baslaması.

**Karnonın' ekinshi teoreması.** Karno tsikli menen islewshi qaytımsız mashinanın' paydalı ta'sir koeffitsienti tap sonday jıllılıq beriwshi ha'm jıllılıq qabıl etiwshi du'zilisleri bar qaytımlı mashinanın' paydalı ta'sir koeffitsientinen barlıq waqıtta kem bolatug'ınlıg'ın an'sat da'lillewge boladı. Bul jag'dayda birdey Karno tsikli boyınsha isleytug'ın qaytımlı ha'm qaytımsız mashinalardıń paydalı ta'sir koeffitsientlerin salıstırıw haqqında ga'ptin' ketip atırg'anlıg'ın esletip o'temiz. Sonın' menen birge paydalı ta'sir koeffitsienti qaytımlı bolg'an jag'dayda qaytımsız bolg'an jag'daydag'ıdan kem bolg'an basqa tsiklde islewshi ko'p sandag'ı mashinalardıń bar ekenligine dıqqat awdaramız.

Endi *Karnonın' qaytımlı tsiklinin' paydalı ta'sir koeffitsientinin' temperaturaları Karno tsiklindag'ı qızdırg'ısh ha'm salqınlatqıshlardın' temperaturaları menen birdey bolg'an qızdırg'ısh ha'm salqınlatqıshları bar basqa qa'legen qaytımlı tsikldin' paydalı ta'sir koeffitsientinen u'lken bolatug'ınlıg'ın* da'llilleyemiz. Bul ushın T ha'm S o'zgeriwshilerindegi tsikllardıń su'wretinen paydalanamız. Karno tsiklinen basqa tsikl iymekligi  $A_1A_2A_3A_4$  tuwrı mu'yeshligi ishine sızılǵ'an.  $\delta Q = TdS = dU + dA$  formulasınan tsikl boyınsha integrallawdan keyin  $\oint dU = 0$  ekenligin esapqa alıp:

$$\oint \delta Q = \oint TdS = \oint dU + \oint dA = A.$$

Bul jag'dayda Karno tsikli ushın iye bolamız:

$$A_K = \oint TdS = T_1 \int_{A_1}^{A_2} dS + T_2 \int_{A_3}^{A_4} dS = T_1(S_2 - S_1) + T_2(S_1 - S_2) = (T_1 - T_2)(S_2 - S_1).$$

Jumısalg'an jıllılıq mug'darı

$$Q^{(+)} = \int_{A_1}^{A_2} dS = T_1 \int_{A_1}^{A_2} dS = T_1 (S_2 - S_1).$$

Sonlıqtan Karno tsiklinin' paydalı ta'sir koeffitsienti

$$\eta_K = A_K / Q_K^{(+)} = (T_1 - T_2) / T_1 = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

Bul formulani burin da alg'an edik.

Karno tsiklin su'wretleytug'in tuwrı mu'yeshliktin' ishindegı basqa mashinanın' tsikli ushın alamız:

$$A = \oint TdS = \sigma = (T_1 - T_2)(S_1 - S_2) - \sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3 - \sigma_4 = A_K - \Delta_{1234},$$

$$\Delta_{1234} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4.$$

Usı mashina ta'repinen alıng'an jıllılıq

$$Q^{(+)} = \int TdS = T_1(S_2 - S_2) - \sigma_1 - \sigma_4 = Q_K^{(+)} - \Delta_{14}. \quad \Delta_{14} = \sigma_1 + \sigma_4.$$

Sonlıqtan

$$\eta = A / Q^{(+)} = \{A_K - \Delta_{1234}\} / \{Q_K^{(+)} - \Delta_{14}\}$$

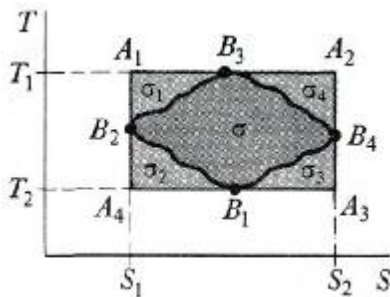
$A_K = \eta_K Q^{(+)}$  ekenligi esapqa alıp bul ten'likti tu'rlandiremiz:

$$\begin{aligned} \eta &= \{\eta_K Q_K^{(+)} - \Delta_{14} - \Delta_{23}\} / \{Q_K^{(+)} - \Delta_{14}\} = \\ &= \{\eta_K (Q_K^{(+)} - \Delta_{14}) + \eta_K \Delta_{14} - \Delta_{14} - \Delta_{23}\} / \{Q_K^{(+)} - \Delta_{14}\} = \\ &= \eta_K - \Delta_{14}(1 - \eta_K) / \{Q_K^{(+)} - \Delta_{14}\} - \Delta_{23} / \{Q_K^{(+)} - \Delta_{14}\}. \end{aligned}$$

$\Delta_{23} = \sigma_2 - \sigma_3$ . Demek  $\eta \leq \eta_K$ .

$\eta = \eta_K$  ten'ligi  $\Delta_4 = 0$  ha'm  $\Delta_{23} = 0$  bolg'anda orınlanadı. Bul jag'dayda tsikl Karno tsikli bolıp tabıladı. Teorema da'lılilendi.

Karnonın' ekinshi teoremasının' mazmunın matematikalıq tu'rde jazamız.



2-22 su'wret.

Qaytımlı Karno tsikli boyınsha jumıs islewshi mashinanın' paydalı ta'sir koeffitsientinin' maksimallıg'ın tu'sindiriw ushın arnalg'an su'wret.

Barlıq jag'dayda da paydalı ta'sir koeffitsienti

$$\eta = [Q^{(+)} + Q^{(-)}] / Q^{(+)} = 1 + \frac{Q^{(-)}}{Q^{(+)}}$$

tu'rinde jazıladı. Al sonday jıllılıq beriwshi ha'm jıllılıq qabıl etiwshi du'zilisleri bar qaytımlı mashına ushın

$$\eta = 1 - T_2/T_1$$

tu'rinde jazılatug'ın edi. Joqarıda da'llilengen teorema matematikalıq tu'rde bılayınsha jazıladı:

$$1 + \frac{Q^{(-)}}{Q^{(+)}} \leq 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (22-1)$$

Qaytadan o'zgeretin'kirep jazsaq

$$\frac{Q^{(-)}}{Q^{(+)}} \leq - \frac{T_2}{T_1}. \quad (22-2)$$

«-» belgisi  $Q^{(-)}$  menen  $Q^{(+)}$  nin' belgilerinin' ha'r qıylılıg'ına baylanışlı.

$$Q^{(+)} / T_1 + Q^{(-)} / T_2 \leq 0 \quad (22-3)$$

tu'rinde ko'shirip jazılğ'an (23-2) Karno tsikli ushın **Klauzius ten'sizligi** dep ataladı. **Ten'lik belgisi qaytımlı protseske qoyladı.** Bul ten'sizlikti ıqtıyarlı tsikl ushın ulıwmalastırıwğ'a ha'm ten'lik belgisinin' tek g'ana qaytımlı protsessler ushın qoyıwğ'a bolatug'ınlıg'ın da'llilew mu'mkin.

Bazı bir jıllılıq qabıl etkish ha'm jıllılıq bergishke iye Karno tsikli boyınsha islewshi qaytımsız mashınanın' paydalı ta'sir koeffitsienti sonday jıllılıq qabıl etkish ha'm jıllılıq bergishke iye Karno tsikli boyınsha islewshi qaytımlı mashınanın' paydalı ta'sir koeffitsientinen barlıq waqıtta da kishi boladı.

İzolyatsiyalang'an sistemalardağ'ı protsesslerde entropiya kishireymeydi. İzolyatsiya etilmegen sistemalarda protsesslerdin' xarakterine baylanışlı entropiyanın' u'lkeyiwi da, kishireyiwi de, o'zgermey qalıwı da mu'mkin.

Karno tsikli boyınsha islewshi qaytımlı mashınanın' paydalı ta'sir koeffitsientinin' maksimal ekenligi tek g'ana mashınanın' qaytımlı ekenligine baylanışlı emes, al sistemag'a jıllılıq tek bir maksimallıq temperaturada berilip, tek bir minimallıq temperaturada sistemadan alnatug'ınlıg'ına da baylanışlı.

İzolyatsiyalang'an sistemadağ'ı entropiyanın' kemeymewi aqırğ'ı esapta sistemanı en' itimal halg'a alıp keletug'ın onın' mikrohollarının' ten'dey itimallıqqa iye ekenliginde.

Joqarıda keltirilip shıg'arılğ'an ten'sizlikti ıqtıyarlı tsiklge ulıwmalastıramız ha'm ten'lik belgisinin' tek qaytımlı tsikl ushın qoyılatug'ınlıg'ın da'llileymiz.

**Klauzius ten'sizligi.** Sxeması su'wrette ko'rsetilgendey jumıs isleytug'ın qurılıstı qaraymız.  $T_1$  rezervuarı turaqlı temperaturag'a iye boladı. Bul rezervuardan alnatug'ın  $\delta Q^{(+)}$  jıllılıg'ı 1 arqalı



belgilengen qaytımlı mashinasına da'wirli tu'rde beriledi. O'z tsiklında bul mashina  $\delta A_1$  jumısın isleydi ha'm T temperaturada  $\delta Q$  jıllılıg'ın 2 arqalı belgilengen tsikllıq mashinasına bersin. Bul qaytımlı yamasa qaytımsız qa'legen tsikllıq mashina bolsın ha'm bir tsikl islesin. Ulıwma tu'rde aytqanda temperatura T turaqlı bolıp qalmaydı ha'm 2 sanı menen belgilengen mashina menen qorshag'an ortalıqtag'ı bolatug'ın protsesslerge baylanıslı. 2 arqalı belgilengen mashina o'z tsikli dawamında  $A_2$  jumısın islesin. 1 arqalı belgilengen mashinanın' tsikli orınlanatug'ıtsn waqıt 2 arqalı belgilengen mashinanın' tsikli orınlanatug'ın waqıttan salıstırmas ese kishi (bunnan bılay qısqaqlıq ushın 1 mashina ha'm 2 mashina dep belgileymiz). Sonlıqtan 1 mashinanın' bir tsikli dawamında T temperaturasın turaqlı dep esaplaw mu'mkin.

1 mashina o'zinin' parametrleri boyınsha 2 mashinanın' jumıs islewin ta'miyinley alatug'ın bolıwı sha'rt.

1 mashinanın' bir tsikl barısında islegen jumısı

$$\delta A_1 = \delta Q^{(+)} \left(1 + \frac{T}{T_1}\right) = \delta Q^{(+)} \frac{T}{T_1} \left(\frac{T_1}{T} - 1\right) = \delta Q^{(+)} \left(\frac{T_1}{T} - 1\right) = \delta Q \left(\frac{T_1}{T} - 1\right). \quad (22-4)$$

Bul jerde (22-2) formulası esapqa alıng'an. Bul formulada 1 qaytımlı mashina ushın ten'lik belgisi alıng'an. Eger 2 mashinag'a kelip tu'setug'ın bolsa  $\delta Q$  jıllılıg'ının' belgisi on' ma'niske iye boladı.

2 mashinanın' bir tsiklde islegen jumısı  $A_2$  ulıwmalıq bolg'an (22-3) formula tiykarında bılayınsha beriledi:

$$A_2 = \oint \delta Q. \quad (22-5)$$

2 mashinanın' tolıq bir tsiklinde islengen jumıs

$$A = \oint \delta Q_1 + A_2 = \oint (\delta A_1 + \delta Q) = T_1 \oint \frac{\delta Q}{T}. \quad (22-6)$$

Bul ten'likti tolıg'ıraq tu'sindiriw kerek.  $\oint \delta Q_1$  integralında 2 mashinanın' 1 tsikli dawamında a'melge asatug'ın 1 mashinanın' ko'p tsikli boyınsha integrallaw na'zerde tutılğ'an. Al  $\oint (\delta A_1 + \delta Q)$  integralında 2 mashinanın' bir tsikli boyınsha integrallaw na'zerde tutılğ'an.

Kelvin printsipi boyınsha eki mashinadan turatug'ın sistema tsikldin' birden bir na'tiyjesi bolg'an jumıs isley almaydı. Bul tsiklda sistemadan jıllılıqtın' shıg'ıwı joq (shtrixlang'an sızıq penen usı eki mashina da, usı eki mashinanın' jumıs islewi menen baylanıslı bolg'an barlıq du'zilisler qorshalg'an, demek anqlama boyınsha shtrixlang'an sızıqtan jıllılıqtın' shıg'ıwı orın almaydı). Demek

bunday sistemanın' jumıs islewinin' birden bir mu'mkinshiligi sistemag'a jıllılıqtın' kelip tu'siwi bolıp tabıladı yamasa en' aqırg'ı esapta sistema ta'repinen islengen jumıstın' nolge ten' bolıwı orın aladı:  
 $A \leq 0$ .

(22-6) tiykarında ha'm  $T_1 = \text{const} > 0$  bolg'anlıqtan bul ten'sizlik

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0 \quad (22-7)$$

tu'rine iye boladı. Bul 2 mashina ta'repinen orınlang'an iqtıyarlı tsiklge tiyisli bolıp **Klauzius ten'sizligi** dep ataladı ha'm qa'legen tsikl ushin orınlanadı.

Qaytımlı mashinalar ushin (22-7) de ten'lik belgisin alıw kerekligin, al qaytımsız mashinalar ushin eki belginin' de orın alatug'ınlig'in da'lillewge boladı. Solay etip

Qaytımlı protsessler ushin (22-7) Klauzius ten'sizligindegi ten'lik belgisi, al qaytımsız protsessler ushin eki belgi de orın aladı.

(22-7) an'latpası qaytımlı protsessler ushin 1854-jılı R.YU.Klauzius ha'm V.Tomson ta'repinen alındı. Al qaytımsız protsessler ushin bul an'latpanı 1862-1865 jılları Klauzius tiykarladı. Olar ta'repinen

ilimge jıllılıqtın' energıyanın' basqa formalarına o'tiw qa'biletligi sıpatında «entropiya» termini endirildi.

Qaytımlı protsessler ushin (22-7) mınaday tu'rge iye:

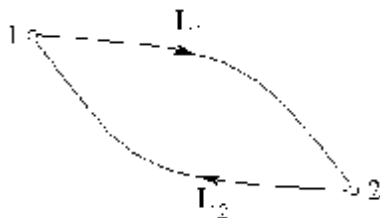
$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0. \quad (22-8)$$

Demek bul jerde integral astında  $\oint \frac{\delta Q}{T}$  tolıq differentsialı tur:

$$\frac{\delta Q}{T} = dS. \quad (22-9)$$

Bul jerde S arqalı entropiya belgilengen.

Demek joqarıda keltirilip shıg'arılğ'an ideal gaz ushin entropiya tu'sinigi iqtıyarlı jag'daylar ushin da durıs boladı eken. Entropiya ushin 2-19 paragrafta da ideal gaz ushin ayılğ'anlardın' barlıg'ı da durıs boladı.



2-23 su'wret.

Tuyıq sistemalardag'ı entropiyanın' kemeyeytug'ınlig'in da'lillew ushin arnalg'an su'wret.

**Termodinamikanın' ekinshi baslaması.** Meyli tuyıq sistema (basqa sistemalardan izolyatsiyalang'an sistema) bazı bir protsesste su'wrette ko'rsetilgen 1 halnan 2 halına o'tetug'ın bolsın. Qaytımlı protsess ja'rdeminde sistemanı 2 halnan 1 halına qaytaramız. Bul ushin sistemanın' izolyatsiyalang'anlıg'ın joq qılıwımız kerek. 1 halına qayıtıp keliw na'tiyjesinde Klauzius ten'sizligin qollanıw mu'mkin bolğ'an tsikl payda boldı:

1 den 2 ge o'tiwde  $L$  jolında sistema izolyatsiyalang'an edi. Sonlıqtan bul jol ju'rilgende alıng'an jıllılıq  $\delta Q$  nolge ten' ha'm sa'ykes integral da nolge ten'. Ekinshi ta'repten 2 den 1 ge qaytıwda (23-9) g'a sa'ykes integral astında turg'an an'latpadag'ı  $\delta Q/T = dS$  dep esaplaw mu'mkin. Onda (23-10) nan alamız:

$$\int_{L_2}^{(1)} \frac{\delta Q}{T} = \int_{L_2}^{(1)} dS = S_1 - S_2 \leq 0$$

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \int_{L_1}^{(2)} \frac{\delta Q}{T} + \int_{L_2}^{(1)} \frac{\delta Q}{T} \leq 0. \quad (22-10)$$

yamasa

$$S_2 \leq S_1.$$

Demek

Tuyıqlang'an sistema entropiyası  $S_1$  ge ten' bolg'an 1 halınan entropiyası  $S_2$  bolg'an 2 halına o'tkende entropiya o'sedi yamasa o'zgermey qaladı. Bul jag'day  $\frac{\delta Q}{T} = dS$  formulası menen an'latılatur'ın entropiyanı bar boladı dep tastıyıqlaw menen birdey bolg'an termodinamikanın' ekinshi baslamasının' mazmunın quraydı.

Qısqaraq tu'rde termodinamikanın' ekinshi baslaması bılayınsha ayıladı:

Tuyıqlang'an sistemalardag'ı protsesslerde entropiya kemeymeydi. Bul tastıyıqlaw tek g'ana izolyatsiyalang'an sistemalar ushın durıs. Protstesstin' xarakterine baylanıslı izolyatsiyalanbag'an sistemalarda entropiyanın' o'siwi de, o'zgermey qalıwı da, kemeyiwi de mu'mkin.

İzolyatsiyalang'an sistemalarda entropiya tek qaytımlı protsesslerde g'ana o'zgermey qaladı. Qaytımsız protsesslerde entropiya kemeymeydi. O'z o'zine qoyılğ'an izolyatsiyalang'an sistemalarda protsessler qaytımsız ju'retug'ınlg'ı, **izolyatsiyalang'an sistema entropiyasının' barlıq waqıtta o'setug'ınlg'ın, al entropiyanın' o'siwi sistemanın' termodinamikalıq ten' salmaqlıqqa jaqınlag'anlg'ın bildiredi. Sistemanın' ten'salmaqlıq halg'a jaqınlawının' en' itimal halg'a jaqınlaw ekenlign eske tu'siremiz.**

## 23-§. Termodinamikanın' ekinshi baslamasına berilgen anıqlamalar

Biz da'slep termodinamikanın' birinshi ha'm ekinshi baslamaları haqqında ulıwma tu'rde talqılaw beremiz.

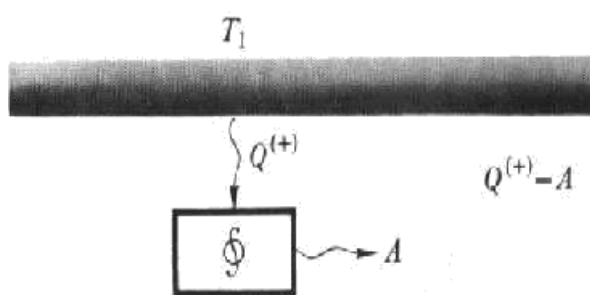
Termodinamikanın' birinshi baslaması ta'biyatta protsesslerdin' bag'ıtı haqqında heshqanday mag'lıwmat bermeydi. İzolyatsiyalang'an sistema ushın birinshi baslama barlıq protsesslerde usı sistemanın' energiyasının' turaqlı bolıp qalıwın talap etedi. Eger sistemanın' eki halın 1- ha'm 2-

hallar dep belgilesek birinshi baslama sistemanın' 1-haldan 2-ge yamasa 2-haldın' 1-halg'a o'tiwi haqqında ayta almaydı. Ulıwma alg'anda birinshi baslamanın' ja'rdeminde izolyatsiyalang'an sistemada qanday da bir protsesstin' bolatug'ınlıg'ı yamasa bolmaytug'ınlıg'ı haqqında hesh na'rse aytıw mu'mkin emes.

Meyli adiabatalıq izolyatsiyalang'an sistema bir biri menen ta'sirlesetug'in, biraq basqa deneler menen ta'sir etise almaytug'in eki deneden turatug'in bolsın. Bunday jag'dayda usı eki dene arasındag'ı jıllılıq almasıwı  $Q_1 = -Q_2$  sha'rtine bag'ınadı. Bir dene ta'repinen alıng'an  $Q_1$  jıllılıg'ı ekinshi dene ta'repinen berilgen  $-Q_2$  jıllılıg'ına ten'. Jıllılıqtın' qay bag'ıtta o'tetug'ınlıg'ın termodinamikanın' birinshi baslaması ayta almaydı. Jıllılıqtın' to'men qızdırılğ'an deneden joqarı qızdırılğ'an deneg'e o'tiwi birinshi baslamag'a qayshı kelmes edi. Temperaturanın' sanlıq ta'repi termodinamikanın' birinshi baslaması ushın jat ma'sele bolıp tabıladı. Sonlıqtan birinshi baslama temperaturanın' ratsional bolğ'an shkalaların' birewine de alıp kelmedi.

Termodinamikanın' birinshi baslaması bolsa protsesslerdin' bag'ıtı tuwralı aytıwg'a mu'mkinshilik beredi. Biraq ekinshi baslamanın' a'hmiyeti tek usının' menen juwmaqlanbaydı. Ekinshi baslama temperaturanın' sanlıq o'lishemi haqqındag'ı ma'selenin' sheshiliwine ha'm termometrlık dene menen termometrın' qurılısınan g'a'rezsiz bolğ'an ratsional temperaturalıq shkalanı payda etiwge alıp keledi. Ekinshi baslama birinshi baslama menen birgelikte denelerdin' ko'plegen makroskopiyalıq parametrleri arasındag'ı da'l sanlıq qatnaslardı ornatağı. Usınday da'l qatnaslardın' barlıg'ı *termodinamikalıq qatnaslar* dep ataladı.

Termodinamikanın' ekinshi baslamasının' tiykarın salıwshı frantsuz injeneri menen fizigi Sodi Karno bolıp tabıladı. Ol jıllılıqtın' jumısqa aylanıw sha'rtlerin izertledi. Biraq ol teplorod ko'z-qarasında turg'anlıqtan termodinamikanın' ekinshi baslamasına da'l anıqlama bere alg'an joq. Anıqlama beriw XIX a'sirdin' ortalarında nemis fizigi Rudolf Klauzius ha'm shotlandiya fizigi Vilyam Tomson (lord Kelvin) ta'repinen bir birinen g'a'rezsiz tu'rde berildi. Olar termodinamikanın' ekinshi baslamasını anıqlaytug'in tiykarg'ı postulattı qa'liplestirdi ha'm bul postulattan baslı na'tiyjelerdi shıg'ardı.



2-24 su'wret.

Kelvin formulirovkasındag'ı termodinamikanın' ekinshi baslamasının' sxema tu'rindagi sa'wleleniwi. Bul su'wrette ko'rsetilgen protsesstin' a'melge asıwı mu'mkin emes.

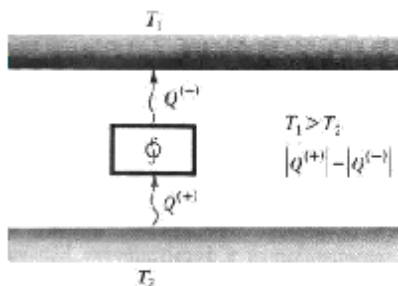
Termodinamikanın' ekinshi baslamasına V.Tomson (lord Kelvin) 1851-jılı anıqlama tu'rinde berdi. (20-7) formulası paydalı ta'sir koeffitsientinin' 1 den artıq bolmaytug'ınlıg'ın ko'rsetedi. Biraq bul formula paydalı ta'sir koeffitsientinin' 1 ten' bolıwının' mu'mkinligin baykarlamaydı. Eger  $\delta Q^{(-)} = 0$  bolsa p.t.k. 1 ge ten' bolıwı kerek. Bul jag'dayda mashinag'a kelip tu'sken jıllılıq tolıg'ı menen jumısqa aylanıwı sha'rt. *Kelvin printsipi* dep kelesi tastıyıqlawg'a aytamız:

Bir jıllılıq rezervuari menen jıllılıq almasıw arqalı jumıs atqaratug'in tsikllıq protsess mu'mkin emes. Bazı bir mug'dardag'ı jıllılıqtın' jumısqa aylanıwı belgili bir mug'dardag'ı jıllılıqtın' qızdırg'ıshtan salqınlatqıshqa beriliwi menen a'melge asadı.

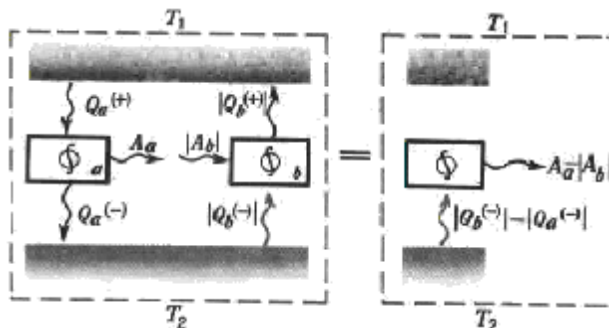
Ja'ne bir anıqlama Klauzius ta'repinen 1850-jılı berilip, to'mendegiden turadı:

Birden bir na'tiyjesi to'men qizdirilg'an deneden joqari qizdirilg'an deneg'e jilliliq beriw bolip tabilatug'in tsiklliq protsesstin' ju'zege keliwi mu'mkin emes.

Bul aniqلامada termodinamikanin' ekinshi baslamasinin' durislig'ı anıq ko'rinedi. Salqın deneden o'zinen o'zi jilliliq bo'linip shıg'ıp usı jilliliqtin' temperaturası joqari bolg'an deneg'e beriliwi mu'mkin emes.



2-25 su'wret. Termodinamikanin' ekinshi baslamasinin' Klauzius boyınsha sa'wleleniwi. Bul su'wrette sa'wlelengen protsesstin' a'melge asıwı mu'mkin emes.



2-26 su'wret. Termodinamikanin' birinshi baslamasına Kelvin ha'm Klauzius ta'repinen berilgen anıqlamalardin' ekvivaletliligin da'llillewge qollanilatug'in su'wret.

Eki anıqlama da ekvivalent bolıp tabıladı. Ha'tte Kelvinnin' o'z formulirovkasin Klauzius formulirovkasinan tek forması jag'ınan parqlanatıg'ınan atap o'tti.

## 24-§. Termodinamikalıq potentsiallar ha'm termodinamikalıq ornıqlılıq sha'rtleri

**Matematikanın' bazı bir formaları.** Meyli  $z = z(x, y)$  formulası menen baylanısқан  $x$ ,  $y$ ,  $z$  o'zgeriwshileri bar bolsın.

Keltirilgen formula u'sh o'zgeriwshinin' ekewinin' bir birinen g'a'rezsiz ekenligin, al u'shinshi o'zgeriwshinin' ekewinin' funktsiyası ekenligin bildiredi.  $z = z(x, y)$  tu'rindgi jazıw g'a'rezsiz o'zgeriwshilerdin'  $x$  ha'm  $y$  ekenligin, al g'a'rezli o'zgeriwshi shamanın' - funktsiyanın'  $z$  ekenligin an'g'artadı. Biraq sol ten'demeni  $x$  qa,  $y$  ke ha'm  $z$  ke qarata da shashiw mu'mkin. Bunday jag'daydı to'mendegidey jazıwılarg'a iye bolamız

$$\begin{aligned}x &= x(y, z), \\y &= y(z, x).\end{aligned}$$

Bul jag'dayda g'a'rezsiz o'zgeriwshiler sıpatında sa'ykes  $y$ ,  $z$  yamasa  $z$ ,  $x$  alınadı. Solay etip g'a'rezsiz shamalardı saylap alıw bizin' qa'lewimizge baylanışlı boladı.

$z$ ,  $x$  ha'm  $y$  lerdin' tolıq differentsialları to'mendegidey tu'rge iye:

$$\begin{aligned}dz &= \frac{\partial z}{\partial x} dx + \frac{\partial z}{\partial y} dy, \\dy &= \frac{\partial y}{\partial x} dx + \frac{\partial y}{\partial z} dz,\end{aligned} \tag{A-1}$$

$$dx = \frac{\partial x}{\partial y} dy + \frac{\partial x}{\partial z} dz.$$

Termodinamikada bolsa ha'r qıylı hal funktsiyalarının' tolıq differentsialları menen is alıp barıladı. Sonın' menen birge g'a'rezsiz o'zgeriwshiler sıpatında o'zgeriwshilerdin' ha'r qıylı jupları alınıwı mu'mkin. Meyli x, y yamasa x,z shamalarına g'a'rezli bolg'an bazı bir F funktsiyasına iye bolayıq. Bunday jag'daylarda bul funktsiyalardıń tolıq differentsialları to'mendegidey tu'rlerge iye boladı:

$$dF = \frac{\partial F}{\partial x} dx + \frac{\partial F}{\partial y} dy ,$$

$$dF = \frac{\partial F}{\partial x} dx + \frac{\partial F}{\partial z} dz.$$

Usı eki an'latpada da birdey bolg'an  $\frac{\partial F}{\partial x}$  shaması qatnasadı. Biraq eki an'latpadag'ı bul tuwındının' ma'nisi pu'tkilley ha'r qıylı. Birinshi an'latpada  $\frac{\partial F}{\partial x}$  tuwındısı u traqlı bolg'anda, al ekinshi an'latpada z turaqlı bolg'anda alıng'an. Termodinamikada qa'telik jiberiwdi boldıraw ushin tuwındı qawsırmag'a alıp, turaqlı shamanı to'mendegi indeks tu'rinde jazadı. Mısalı joqarıda keltirilgen an'latpalar termodinamikada bılay jazıladı:

$$dF = \left( \frac{\partial F}{\partial x} \right)_y dx + \left( \frac{\partial F}{\partial y} \right)_x dy ,$$

$$dF = \left( \frac{\partial F}{\partial x} \right)_z dx + \left( \frac{\partial F}{\partial z} \right)_x dz.$$

Endi qa'teliktin' jiberiliwi mu'mkin emes ha'm

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial F}{\partial y} \right)_x \neq \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial F}{\partial x} \right)_y$$

ekenligi ko'rinip tur.

Eger usı sha'rtti paydalanatug'ın bolsaq (A1) an'latpalarınan dara tuwındılar arasındag'ı to'mendegidey qatnaslardı alıw mu'mkin:

$$\left( \frac{\partial x}{\partial y} \right)_z * \left( \frac{\partial y}{\partial z} \right)_x * \left( \frac{\partial z}{\partial x} \right)_y = - 1.$$

Eger dF tin' tolıq differentsial ekenligi ha'm

$$d\Phi = Pdx + Qdy$$

tu'rinde jazılatug'ınlig'ı, sonday-aq P menen Q lardıń x penen u tin' belgili funktsiyaları bolsa anıqlama boyınsha ha'm tolıq differentsiallardın' qa'siyetlerinen

$$P = \left( \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)_y, \quad Q = \left( \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)_x, \quad \left( \frac{\partial P}{\partial y} \right)_x = \left( \frac{\partial Q}{\partial x} \right)_y.$$

**Termodinamikaliq funktsiyanın' anıqlaması.** Hal funktsiyaları **termodinamikaliq funktsiyalar** dep ataladı. Termodinamikaliq funktsiyalardıń sanı og'ada ko'p. Egerde termodinamikaliq funktsiyalardıń birewi belgili bolsa, onda usı funktsiyanın' qanday da bir funktsiyası da termodinamikaliq hal funktsiyası bolıp tabıladı. Haldı ta'ripleytug'ın  $p$ ,  $V$ ,  $T$  dan basqa ishki energiya  $U$ , entalpiya  $H$  ha'm entropiya  $S$  dep atalıwshı hal funktsiyaları belgili.

**Termodinamikaliq birdeylik.** Termodinamikanın' birinshi baslaması  $\delta Q = TdS$  ekenligin esapqa alg'anda bılaj jazıladı

$$TdS = dU + pdV. \quad (24.1)$$

Barlıq qaytımlı protseslerde orınlanatug'ın bolg'anlıqtan bul ten'lik termodinamikaliq birdeylik (ten'lik, barabarlıq, tojdestvo) bolıp tabıladı. Termodinamikaliq potentsiallardı tiykarınan usı ten'lik tiykarında alamız.

**Erkin energiya yamasa Gelmgolts funktsiyası.** Hal funktsiyaların' sanı og'ada ko'p bolsa da, joqarıda aytılp o'tilgen funktsiyalardan basqa hal funktsiyaların' birazı ma'seleler sheshkende a'hmiyetke iye emes bolıp shıg'adı. Biraq termodinamikaliq hal funktsiyaları arasında ayırıqsha a'hmiyetke 1882-jılı Gelmgolts ta'repinen keltirilip shıg'arılǵ'an erkin energiya « iye boladı. (24.1) di bılaj ko'shirip jazamız

$$\delta A = pdV = -dU + TdS.$$

İzotermalıq protsesste ( $T = \text{const}$ ) sistema ta'repinen islengen jumıs bılajınsha jazılıwı mu'mkin:

$$\delta A = -d(U - TS) = -dF. \quad (24.2)$$

Demek izotremalıq protsestege islengen sheksiz kishi jumıs tolıq differentsial, al shaması keri belgi menen alıng'an erkin energiyanın' o'zgerisine ten' eken:

$$F = U - TS. \quad (24.3)$$

(24.3) ke sa'ykes erkin energiya hal funktsiyaların' funktsiyası bolg'anlıqtan bul erkin energiyanın' o'zi de hal funktsiyası bolıp tabıladı.

*İzotremalıq protseste erkin energiya potentsial energiyanın' ornın iyeleydi. Teris belgi menen alıng'an onın' o'zgerisi islengen jumısqa ten'. Bul tek izotermalıq protseste orın aladı. Bıqtıyarlı protseste jumıs erkin energiyanın' o'zgerisine ten' emes.*

**Gibbstin' termodinamikaliq funktsiyası.** Bul funktsiya

$$G = F + pV = H - TS \quad (24.4)$$

ten'ligi tu'rinde anıqlanadı. Bul jerde

$$H = U + pV$$

U, H, F, G termodinamikaliq funktsiyalarinin' barlig'in da p, V, T, S o'zgeriwshilerinin' ekewinin' funktsiyasi sypatında ko'rsetiw mu'mkin. Basqa so'z benen aytqanda p, V, T, S o'zgeriwshileri eki qatnas - hal ten'lemesi ha'm termodinamikaliq ten'lik penen baylanisqan. Sonliqtan olardin' ekewi g'ana g'a'rezsiz bolıwı mu'mkin.

Termodinamikaliq funktsiyalardin' toliq differentsialların esaplaymız. dU toliq differentsiali

$$dU = TdS - pdV. \quad (24.5)$$

Qalg'anları an'sat esaplanadı:

$$dH = dU + pdV + Vdp = TdS + Vdp. \quad (24.6)$$

$$dF = -SdT - pdV. \quad (24.7)$$

$$dG = -SdT + Vdp. \quad (24.8)$$

Keyingi to'rt ten'likten

$$\begin{aligned} T &= \left( \frac{\partial U}{\partial S} \right)_V, \quad -p = \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_S, \quad \left( \frac{\partial T}{\partial V} \right)_S = - \left( \frac{\partial p}{\partial S} \right)_V, \\ T &= \left( \frac{\partial H}{\partial S} \right)_p, \quad V = \left( \frac{\partial H}{\partial p} \right)_S, \quad \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_S = - \left( \frac{\partial V}{\partial S} \right)_p, \\ -S &= \left( \frac{\partial F}{\partial T} \right)_V, \quad -p = \left( \frac{\partial F}{\partial V} \right)_T, \quad \left( \frac{\partial S}{\partial V} \right)_T = - \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_V, \\ -S &= \left( \frac{\partial G}{\partial T} \right)_p, \quad V = \left( \frac{\partial G}{\partial p} \right)_T, \quad \left( \frac{\partial S}{\partial p} \right)_T = - \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p. \end{aligned} \quad (24.9)$$

Bul ten'likler **Maksvell qatnasları** dep ataladı.

**Termodinamikaliq potentsiallar.** (24.5) formuladan eger U ishki energiya S ha'm V ulıwmalasqan koordinatalar [Yag'nıy  $U = U(S, V)$  tu'rinde] arqalı an'latilg'an potentsial energiya sypatında qaralatug'in bolsa T menen r nın' ulıwmalastırıl'g'an ku'shlerdin' ornın iyeleytug'inlig'ı ko'rinip tur. Bul  $U(S, V)$  nı **termodinamikaliq potentsial** dep qarawg'a mu'mkinshilik beredi. Biraq bul jag'daydin' (ishki energiya U ushın) tek g'ana g'a'rezsiz o'zgeriwshiler sypatında entropiya S penen ko'lem V aling'anda duris bolatug'inlig'in esletip o'temiz. G'a'rezsiz o'zgeriwshiler basqasha saylap aling'anda basqa funktsiyalar termodinamikaliq funktsiyalarg'a aylanadı. Joqarıda keltirilgen formulalarda (S, p) o'zgeriwshilerine qarata entalpiya H, (T, V) o'zgeriwshilerine qarata erkin energiya F, al (T, p) o'zgeriwshilerine qarata Gibbstın' termodinamikaliq potentsiali G termodinamikaliq potentsial bolıp tabiladı.

**Ishki energiyanın', entalpiyanın' ha'm entropiyanın' differentsiallarının' basqa tu'ri.** Ha'r qıylı o'zgeriwshilerde dU, dH ha'm dS differentsialların joqarıda keltirilgen tu'rlerden basqa tu'rlerde ko'retiwge mu'mkinshilik tuwadı. Misalı zattın' ishki energiyası tek temperatura ha'm ko'lemnin' funktsiyası, Yag'nıy  $U = U(T, V)$  dep qabil etiledi. Sonliqtan

$$dU = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_V dT + \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_T dV = C_V dT + \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_T dV.$$



Bul jerde anıqlama boyınsha  $C_v = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_v$ .

Usı alıng'an an'latpa ha'm  $TdS = dU + pdV$  formulasınan

$$dS = \frac{dU}{T} + \frac{p}{T} dV = C_v \frac{dT}{T} + \left[ \frac{1}{T} \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_T + \frac{p}{T} \right] dV.$$

Ekinshi ta'repten entropiyanı (T,V) nın' funksiya dep qarap, Yag'nıy  $S=S(T,V)$  dep esaplap, alamız:

$$dS = \left( \frac{\partial S}{\partial T} \right)_v dT + \left( \frac{\partial S}{\partial V} \right)_T dV.$$

Keyingi eki an'latpadan

$$\frac{C_v}{T} = \left( \frac{\partial S}{\partial T} \right)_v, \quad \left( \frac{\partial S}{\partial V} \right)_T = \frac{1}{T} \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_T + p \right].$$

Keyingi ten'lik Maksvell qatnaslarınan  $\left( \frac{\partial S}{\partial V} \right)_T = \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v$  qatnasın paydalansaq to'mendegi formulag'a alıp keledi:

$$\left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_T = T \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v - p.$$

Bul an'latpa joqarıdag'ı  $dU$  ushın jazılğ'an an'latpanı bılayınsha ko'rsetiwge mu'mkinshilik beredi:

$$dU = C_v dT + [T \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v - p] dV.$$

Tap usınday esaplawlar entropiya menen entalpiyanın' differentsialları ushın to'mendegidey formulalardıń orın alatug'ınlg'ın ko'rsetedi:

$$dS = C_v \frac{dT}{T} + \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v dV,$$

$$dH = C_p dT + [V - T \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p] dp.$$

Keyingi ten'likte anıqlama boyınsha  $C_p = \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_p$ .

Eger g'a'rezsiz o'zgeriwshiler sıpatında T menen p alınsa entropiya differentsialı mınag'an ten':

$$dS = C_p \frac{dT}{T} - \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p dp.$$

**Jılılıq sıymılıqları ushın formulalar.**

$$dS = C_v \frac{dT}{T} + \frac{\alpha}{\beta} \frac{dp}{T} dV,$$

ha'm

$$dS = C_p \frac{dT}{T} - \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p dp.$$

An'latpaların bir biri menen salıstırıw arqalı alamız:

$$C_v \frac{dT}{T} + \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v dV = C_p \frac{dT}{T} - \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p dp,$$

bunnan

$$C_p - C_v = T \left[ \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v + \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \frac{\partial p}{\partial T} \right].$$

Bul jerde  $C_p - C_v$  ayırması  $p = \text{sonst}$  bolg'anda ko'lem o'zgergende de,  $V = \text{sonst}$  bolg'anda basım o'zgergende de birdey bolıp o'zgeredi. Bul jag'day en' keyingi an'latpadan

$$(C_p - C_v)_v = T \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v,$$

$$(C_p - C_v)_p = T \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p$$

ekenliginen ko'rinip tur.  $C_v dT + p dV = 0$  ten'lemesinen

$$\left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v = - \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \left( \frac{\partial p}{\partial V} \right)_T.$$

Sonlıqtan  $S_p - S_v$  ushın jazılğ'an en' keyingi an'latpa keyingi eki an'latpa tiykarında bılay jazıladı:

$$C_p - C_v = -T \frac{\left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p^2}{\left( \frac{\partial V}{\partial p} \right)_T}. \quad (j.c)$$

**Zatlardı tolıq termodinamikalıq ta'riplew ushın za'ru'rli bolg'an eksperimentallıq mag'lıwmatlar.** Keyingi formula burınraq  $dU$ ,  $dH$  ha'm  $dS$  ushın alıng'an an'latpalar menen birgelikte eger  $p$ ,  $U$ ,  $T$  lardıń ha'mmesi ha'm  $C_v$  menen  $C_p$  lardıń birewi belgili bolsa  $U$ ,  $H$ ,  $S$  lerdi printsipinde anıqlawg'a mu'mkinshilik beredi. Ekinshi ta'repten  $U$ ,  $H$ ,  $S$  ler arqalı an'latılattug'ın bolg'anlıqtan erkin energiya  $F$  ha'm Gibbs funktsiyası  $G$  (ekewi de) anıqlanıwı mu'mkin. Solay etip zattı termodinamikalıq jaqtan tolıq ta'riplew mu'mkinshiligi tuwıladı. Ha'zir ga'tpin' tek taza zatlar haqqında aytılp atıg'anlıg'ın aytıp o'temiz.

Eger ayqın fazadag'ı taza zattı alıp qarasaq (mısalı puw yamasa suyuqlıq tu'rinde) bunday zat ushın eksperimentte ko'p sanlı o'lshewler yamasa juwıq tu'rde teoriyalıq esaplawlar ja'rdeminde  $p = p(T, V)$  hal ten'lemesi du'ziledi. Bunnan keyin eksperimentte jıllılıq sıyımlıqları ushın mag'lıwmatlar alıw kerek. Bul mag'lıwmatlar (j.c) formulası menen birlikte zattın' barlıq termodinamikalıq qa'siyetlerin tolıq ta'riplew mu'mkinshiligin beredi.

Tap usınday jollar menen real zatlardıń termodinamikalıq kestelerin aladı.

**Termodinamikalıq ornıqlılıqtın' tiykarg'ı kriteriyi.** Adiabatalıq jaqtan izolyatsiyalang'an sistemanın' ten' salmaqlıq halı entropiyanın' maksimum ma'nisinde ju'zege keledi. Bul oyımızda jıllılıq berilmey yamasa alınbay a'melge asatug'ın o'tiwdin' a'melge asıwı mu'mkin bir birine sheksiz jaqın jaylasqan hallar kishi entropiyag'a iye bolatug'ınlıg'ın bildiredi. Termodinamikanın' ekinshi baslaması bunday hallarg'a o'tiwge tıyım saladı. Bul o'z gezeginde *adiabatalıq jaqtan izolyatsiyalang'an sistemanın' halı entropiyanın' maksimum bolg'anında ornıqlı bolatug'ınlıg'ın bildiredi.*

Termodinamikalıq ornıqlılıqtın' ulıwmalıq teoriyası 1875-1878 jılları amerika fizigi D.Gibbs ta'repinen islenip shag'ıldı. Ol izolyatsiyalang'an sistemanın' to'mendegidey za'ru'r ha'm jetkilikli sha'rtlerin taptı:

- 1) energiyasına ta'sir jasamaytug'ın sistemanın' barlıq o'zgerislerinde entropiyanın' variatsiyaları bolmaydı yamasa teris ma'niske iye boladı;
- 2) entropiyasına ta'sir jasamaytug'ın sistemanın' barlıq o'zgerislerinde energiyanın' variatsiyaları bolmaydı yamasa teris ma'niske iye boladı

Variatsiya dep matematikada g'a'rezsiz o'zgeriwshinin' kishi awısıwına aytadı.

**Turaqlı ko'lem ha'm entropiyag'a iye sistema ushın ornıqlılıq kriteriyi.** (24.7) Klauzius ten'sizligi  $\oint \frac{\delta Q}{T}$  (24.10) dı esapqa alg'anda sistemadag'ı sheksiz kishi qaytımsız protsess ushın bılayınsha jazıladı:

$$\delta Q < TdS$$

Bul sha'rtti termodinamikanın' birinshi baslamasın na'zerde tutıp bılayınsha jazamız:

$$dU + - TdS < 0$$

Entropiya menen ko'lem turaqlı bolg'anda ( $dV = 0$ ,  $dS = 0$ )

$$dU < 0$$

g'a iye bolamız. Demek bul sistemada ishki energiyanın' kemeyiwi menen bolatug'ın protsessler ju'redi eken. Solay etip **ishki energiya minimumg'a ten' bolg'andag'ı hal en' ornıqlı boladı.**

**Turaqlı basım menen turaqlı entropiyadag'ı ornıqlılıq kriteriyi.** Bul jag'dayda ten'sizligi ornına ten'sizligine iye bolamız. Demek sistemada tek entalpiyanın' kemeyiwi menen ju'retug'ın protsessler orın aladı. Demek **entalpiya minimum bolatug'ın hal ornıqlı boladı.**

**Turaqlı ko'lem menen turaqlı temperaturadag'ı ornıqlılıq kriteriyi.** ,  $T = 0$  bolg'anda ten'sizligi tu'rine iye boladı. Demek sistemada tek erkin energiya kemeyetug'ın protsessler ju'redi. Solay etip **hal erkin energiyanın' minimumında ortıqlı boladı.**

**Turaqlı temperatura menen turaqlı basımg'a iye sistemanın' ornıqlılıq kriteriyi.** Termodinamikalıq potentsial ushın jazılǵ'an (24.2) an'latpası ja'rdeminde  $dU + - TdS < 0$  ten'sizligi to'mendegidey tu'rge endiriledi:

$$dG - SdT + V < 0.$$

Turaqlı temperatura menen basımda

$$dG < 0 .$$

Demek sistemada termodinamikalıq potentsialdın' kemeyiwi menen ju'retug'ın protsessler ju'redi ha'm **termodinamikalıq potentsialdın' minimumında hal ornıqlı boladı.**

**Le SHatale-Braun printsipi.** Bul paragraftın' aqırında frantsuz ilimpazı Le-SHatale (1850-1936) ta'repinen 1884-jılı keltirilip shıǵ'arılǵ'an, keyinirek 1887-jılı nemis fizigi Braun (1850-1918) ta'repinen ken'eytilgen printsip penen tanısamız. Bul printsip turaqlı tu'rdegi ornıqlılıq payda etilgen sistemanı sırtqı ta'sirlerdin' sebebinen sol ornıqlılıq haldan shıǵ'arg'anda ju'zege keletug'ın protsesslerdin' bag'ıtın anıqlawg'a mu'mkinshilik beredi. Le-SHatale-Braun printsipi termodinamikanın' ekinshi baslaması sıyaqlı a'hmiyeti ken' emes. Mısalı bul printsip ju'zege keletug'ın protsesslerdin' sanlıq ta'repi haqqında hesh na'rse ayta almaydı. Bul printsiptin' paydalanıw ushın sırtqı tu'siriletug'ın ta'sirlerdin' saldarınan shıǵ'arılatus'ın **ornıqlı ten'salmaqlıq haldın' bolıwı** sha'rt. Onı sistemalardı ornıqlıraq hallarg'a o'tkeretug'ıtsn protsessler ushın qollanıwǵ'a bolmaydı (mısalı partlanıw ushın).

Le-SHatale-Braun printsipi elektrodinamikadag'ı ken'nen belgili induktsiyalıq toqtın' bag'ıtın anıqlaytug'ın Lents qa'desin ulıwmalastırıwdın' na'tiyjesinde ketirilip shıǵ'arılǵ'an.

Sistemanı ten' salmaqlıq haldan shıǵ'arsaq bul sistemada sistemanı ten' salmaqlıq halg'a qaytarıwǵ'a tırsatug'ın faktorlar payda boladı. Haldın' ornıqlılıǵ'ı usı faktorlardın' payda bolıwına baylanıslı. Bul faktorlardın' payda bolıwının' o'zi ornıqlı hallardın' bar bolıwınan kelip shıǵ'adı. Le-SHatale-Braun printsipinin' mazmunı to'mendegiden ibarat:

**Eger ornıqlı termodinamikalıq ten' salmaqlıqta turg'an sistemag'a usı haldan shıǵ'arıwǵ'a bag'ıtlang'an sırtqı faktorlar ta'sir etse, sistemada sırtqı ta'sirdin' sebebinen payda bolg'an o'zgerislerdi joq qılıwǵ'a bag'darlang'an protsessler payda boladı (ju'zege keledi).**

**Adiabatalıq izolyatsiyalang'an sistemanın' halı entropiyanın' ma'nisi maksimal bolg'anda ornıqlı.**

**Ko'lemi ha'm entropiyası turaqlı bolg'an sistemanın' halı ishki energiyanın' ma'nisi minimum bolg'anda ornıqlı.**

Turaqli basimg'a ha'm entropiyag'a iye sistemanin' halı entalpiyanin' minimumında ornıqlı.

Turaqli ko'lemge ha'm temperaturag'a iye sistemanin' halı erkin energiyanın' ma'nisi minimum bolg'anda ornıqlı.

Turaqli temperatura ha'm basimg'a iye sistemanin' halı Gibbstin' termodinamikalıq potentsialı minimum bolg'anda ornıqlı.

## 25-§. Molekulalardag'ı baylanis ku'shleri

Molekulalardag'ı baylanis ku'shleri. İonlıq baylanis. Kovalentlik baylanis. Qattı denelerdegi molekulalar arasındag'ı ku'shler. Suyıqlıqlardıń qurılısı. Van-der-Vaals ku'shleri. Molekulalar arasındag'ı o'z-ara ta'sirlesiw potentsialı. Molekulalar sisteması. Suyıq ha'm gaz ta'rizli hallar.

**Molekulalar arasındag'ı o'z-ara ta'sirlesiw ku'shleri tartısıw ku'shleri, biraq kishi aralıqlarda iyterisiw ku'shleri bolıp tabıladı. O'z-ara ta'sir etisiw na'tiyjesi molekulalardıń ortasha kinetikalıq energiyası menen molekulalar arasındag'ı ta'sir etisiwge sa'ykes keletug'ın ortasha potentsial energiya arasındag'ı qatnasqa baylanışlı. Suyıq hal molekulalardıń ortasha tolıq energiyasının' teris ma'niske shekem kemeygende ju'zege keledi.**

Atomdag'ı elektronlar yadrolar a'tirapında kulon ku'shleri ta'sirinde uslap turıladı. Tolıg'ı menen alg'anda atom elektrlik jaqtan neytral. Molekulalar atomlardan turadı. Molekulalardag'ı atomlardı uslap turatug'ın ku'shler de ta'biyatı boyınsha elektrlik ku'shler bolıp tabıladı. Bul ku'shlerdin' payda bolıwı quramalıraq. Molekulalardag'ı atomlar arasındag'ı baylanıstın' tiykarınan eki tu'ri bar.

**İonlıq baylanis.** Geypara jag'daylarda elektrlik jaqtan neytral bolg'an atom basqa sorttag'ı atomnıń elektronların o'zine tartıp alıp teris zaryadqa iye iong'a aylanadı. Bir elektrondı tartıp alg'an atom bir valentli iong'a, eki elektrondı tartıp alg'an atom eki valentli iong'a aylanadı. Al elektronnı jog'altqan atom da o'z gezeginde on' zaryadlı iong'a aylanadı.

Zaryadı ha'r qıylı belgige iye ionlar arasındag'ı o'z-ara tartısıw ku'shi (Kulon ku'shi) elektrlik jaqtan neytral molekulalardıń payda bolıwın ta'miyinleydi.

Usınday molekulalar sıpatında NaCl molekulasın ko'rsetiw mu'mkin. Bul molekulanı ionlar tu'rinde bılay jazıw mu'mkin  $\text{Na}^+\text{Cl}^-$ .  $\text{Na}^+$  menen  $\text{Cl}^-$  ionları arasındag'ı tartısıw potentsial energiyası (CI sistemasında)

$$E_p(r) = - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon r_0}. \quad (25-1)$$

$r_0$  ionlar arasındag'ı ten' salmaqlıq aralıq. SGS sistemasında bul formula a'piwayı tu'rge iye boladı:

$$E_p(r) = - \frac{e^2}{r_0}. \quad (25-1')$$

Bul energiya menen bir qatarda on' ma'niske iye ionlar arasındag'ı o'z-ara iyterisiw energiyası da bar (iyterisiw ha'r bir ionnıń belgili bir ko'lemdi iyelewine baylanıslı, ion menen iyelengen ko'lemge basqa ionlar kire almaydı). Usı iyterisiw na'tiyjesinde ionlar bir birine kishi aralıqlarg'a jaqınlasa almaydı. İyterisiw ku'shleri kishi qashıqlıqlarda u'lken ma'niske iye bolıp, qashıqlıq u'lkeygende tez kishireydi. NaCl molekulasının' dissotsiatsiyası ushın (24-1) formulasınan minaday an'latpa alamız:

$$\Delta E = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_0}. \quad (25-2)$$

$r_0$  din' gaz ta'rizli haldag'ı o'zgerisi ushın  $r_0 = 2.5 \cdot 10^{-10}$  m. Demek  $\Delta E \approx 9 \cdot 10^{-19}$  Dj. Bul shama eksperimentke 5 protsentlik da'llikte sa'ykes keledi. Usınday usıl menen basqa molekular ushında qanaatlandırılıqtay na'tiyjeler alınadı.




**Fizikalıq ko'z-qaras boyınsha ionlıq baylanıs elektronnıń zaryadına eselik zaryadlar almasıw arqalı a'melge asadı.**

**Eger elektronnıń zaryadına pu'tin san eselenbegen zaryad almasıw bolg'an jag'daylarda kovalentlik baylanıs du'ziledi.**

**Kovalentlik baylanıs.** İonlıq baylanıs ko'p sandag'ı molekular dın' qalay payda bolatug'ınlig'ı tu'sindire almaydı. Onday molekular sıpatında, misalı,  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $N_2$  molekuların ko'rsetiwge boladı. Bul molekular dın' quramındag'ı atomlardın' ekewi de ten' huıqlı. Sonlıqtan olardıń birewi on', ekinshisi teris zaryadlanadı dep ayta almaymız. Usınday molekular dıag'ı atomlar arasındag'ı baylanıs *kovalent baylanıs* dep ataladı.

Kovalent baylanıstı tu'siniw tek kvant mexanikası ja'rdeminde a'melge asırıladı. Biraq bul baylanıstın' fizikalıq ma'nisi klassikalıq fizika tiykarında da beriliwi mu'mkin.

Eki on' zaryad bir birinen iyteriledi. Usı eki birdey bolg'an zaryadtın' ortasına absolyut ma'nisi boyınsha eki on' zardtın' qosındısına ten' teris zaryadlang'an bo'leksheni jaylastırayıq. Bunday jag'dayda teris zaryad ta'repinen on' zaryadlang'an bo'lekshelerge on' zaryadlang'an bo'lekshelerdin' iyterisiw ku'shinen 4 ese u'lken bolg'an tartısıw ku'shi ta'sir etedi. Na'tiyjede on' zaryadlang'an bo'lekshalarge olardı jaqınlastıratug'ın ku'sh ta'sir etedi. Teris zaryadqa on' zaryadlar ta'repinen ta'sir etetug'ın ku'shler o'z-ara ten'lesedi. Kovalentlik baylanıs tap usınday jollar menen a'melge asadı. Bunday baylanıs penen eki kislorod atomınan molekulanın' payda bolıwı ushın baylanıs du'ziwshi eki atom sırtqı elektron qabıg'ında jaylasqan elektronlardan ortalıqqa elektronların shıg'aradı.

Birdey belgige iye zaryaqqa iye bo'leksheler bir biri menen iyterisedi.	
Eger on' zaryadlı bo'leksheler ortasına absolyut shaması on' zaryadtay bolg'an teris zaryadlı bo'leksheler orналаstırılsa on' zaryadlang'an bo'lekshelerge iyterilisiw ku'shinen 4 ese artıq bolg'an tartısıw ku'shi ta'sir etedi.	
Na'tiyjede on' zaryadlang'an bo'lekshelerdi bir birine jaqınlatıwıg'a umtıldıratug'ın (tartılıs) ku'shi payda	

boladı.	
---------	--

**Qattı denelerdeki molekullar aralıq ku'shler.** Qattı haldag'ı molekullar arasındag'ı baylanıs energiyası olardin' jıllılıq qozg'alısın' kinetikalıq energiyasınan artıq bolg'an jag'dayda qa'liplesedi. Na'tiyjede erkin energıyanın' minimumına sa'ykes keliwshi kristallıq qurılıs payda boladı.

İonlıq ha'm kovalentlik baylanıslar atomlardı tek molekullarda uslap turıwda g'ana emes, al molekullar menen atomlardı qattı denelerde uslap turıwda a'hmiyetke iye boladı.
---

Eger kristallıq qurılıs kovalent baylanıs esabınan payda bolsa, bunday kristallar kovalent kristallar dep ataladı (almaz, germaniy ha'm kremniyge usag'an yarım o'tgizgish kristallar). Baylanıs ionlıq baylanıs tiykarında payda bolg'an kristallardı ionlıq kristallar dep esaplaymız. Kovalent baylanıstın' payda bolıw mexanizmi atomlar ta'repinen ortag'a shıg'arılğan elektronlardın' kristallıq pa'njereni payda etiwshi ayqın atom yamasa molekula menen tıg'ız baylanıspag'anlıg'ın ko'rsetedi. Bul jag'dayda baylanıstı payda etiwshi elektronlar ionlar arasında tarqaladı. A'dette bul elektronlar ionlar aralıqlarında baylanıs bag'ıtları dep atalatug'ın bag'ıtlarda kontsentratsiyalang'an boladı. İonlıq kristallarda elektronlıq bult ionlardın' a'tirapında jıylang'an, al ionlar arasında bunday ionlar derlik bolmaydı.

**Suyıqlıqlar qurılısı.** Gazler menen suyıqlıqlarda molekullar bir biri menen statsionar, ornıqlı baylanıs penen baylanıspag'an. Molekullar o'zlerinin' salıstırmalı orınların o'zgerte aladı. Gazlerdegi molekullar arasındag'ı qashıqlıqlardın' ortasha ma'nisi u'lken ha'm bir birine salıstırg'anda olar o'zlerinin' orınların tez o'zgerte aladı.

Suyıqlıqlarda molekullar arasındag'ı qashıqlıq az, molekullar suyıqlıq iyelegen ko'lemde tıg'ız etip toltırıp turadı ha'm bir birine salıstırg'andag'ı orınların a'ste-aqırılıq penen o'zgetedi. Salıstırmalı uzaq waqıtlar ishinde molekullar birigip molekullar assotsiatsiyaların payda ete aladı. Bul molekullar o'zinin' qa'siyetleri boyınsha qattı denelerdi eske saladı.
--

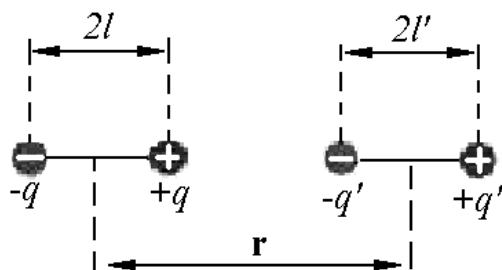
Solay etip suyıqlıqlar o'zinin' qurılısı ha'm molekulları arasındag'ı baylanısları boyınsha gazlerdin' qa'siyetlerine de, qattı denelerdin' qa'siyetlerine de iye boladı. Sonlıqtan suyıqlıqlar teoriyası salıstırma tu'rde quramalı ha'm to'men izertlengen.

**Van-der-Vaals ku'shleri.** Salıstırmalı u'lken qashıqlıqlarda molekullar arasında Van-der-Vaals ku'shleri dep atalatug'ın tartılıs ku'shleri ta'sir etedi.

Quramındag'ı teris ha'm on' zaryadları bir birine salıstırg'anda awısqanda neytral molekula elektrlik jaqtan dipolge aylanadı.
--

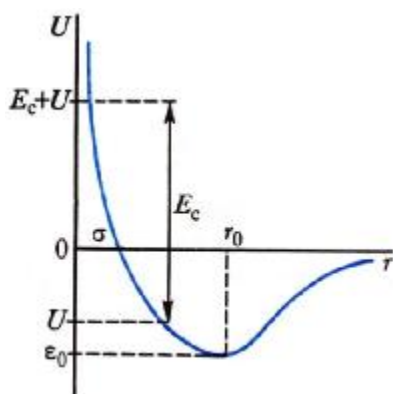
Dipol elektr momenti menen ta'riplenedi. Dipol momenti zaryad mug'darı menen usı zaryadlar arasındag'ı qashıqlıqtın' ko'beymesine ten' ( $p = e \cdot d$ ). Dipol o'zinin' a'tirapında elektr maydanın payda etedi ha'm sol maydan arqalı basqa dipollar menen ta'sir etisedi.

Turaqlı dipol momentine iye molekullar boladı. Bunday molekullardı polyar molekullar dep ataymız. Olar jaqınlasqanda ha'r qıylı zaryadları menen qarap turatug'ınday bolıp bir birine salıstırg'anda burıladı. A'dette polyar molekullar o'z-ara tartıladı. Bunday ku'shlerdi **dipollıq-orientatsiyalıq** dep ataymız.



2-27 su'wret. Van-der-Vaals ku'shlerinin payda bolıwın tu'sindiretug'ın su'wret.

**Molekulalar arasındag'ı ta'sir etisiwdin' potentsialı.** Kishi qashılıqlarda molekulalar arasında iyterisiw ku'shleri orın aladı. İyterisiw molekulalardıń belgili bir ko'lem iyeleytug'ınlıg'ının, bul ko'lemge basqa molekulalardıń kiriwine jol qoyılmaıtug'ınlıg'ının na'tiyjesi bolıp tabıladı. Bul iyterisiw ku'shleri molekulalardıń o'lsheplerindey aralıqlarda orın aladı.



2-28 su'wret.

Molekulalıq o'z-ara ta'sirlesiw potentsialı.

Potentsial energiyanıń r qashılıqlıqqa baylanışlı o'zgerisi su'wrette ko'rsetilgen.  $r > r_0$  qashılıqlarında molekulalar arasında tartısıw ku'shleri ta'sir etedi, al  $r < r_0$  qashılıqlarda iyterisiw ku'shi orın aladı.  $E_n(r)$  ushın da'l ta'ripleme tek g'ana ayqın molekula ushın beriliwi mu'mkin. Barlıq molekulalar ushın  $E_n(r)$  ge universal formula joq. A'dette  $E_n(r)$  funktsiyası to'mendegi formula ja'rdeminde approktsiyalanadı:

$$E_p = \frac{a_1}{r^n} - \frac{a_2}{r^m} \quad (25-3)$$

Bul formuladag'ı  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $n$  ha'm  $m$  real potentsial ushın saylap alınadı. İzertlewler ko'pshilik jag'daylarda  $n = 12$ ,  $m = 6$ , ayqın atomlar ushın aling'an  $a_1$  menen  $a_2$  lerde qanaatlandırılıq na'tiyje alinatug'ınlıg'ın ko'rsetedi, Yag'nıy

$$E_p(r) = 4\epsilon_0 \left[ \left( \frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left( \frac{\sigma}{r^6} \right) \right]. \quad (25-5)$$

Suyıqlıqlar ha'm gazler teoriyasında ken'nen qollanılatug'ın bul potentsial **Lennard-Djons potentsialı** dep ataladı.

Van-der-Vaals ku'shi to'mendegi formula menen beriledi:

$$F(r) \sim \frac{1}{r^7}, \quad (25-6)$$

Yag'nıy bul ku'sh qashılıqlıqqa baylanışlı ju'da' tez kemeyedi. Sa'ykes potentsial



$$E_p(r) \sim \frac{1}{r^6}.$$

Demek

Van-der-Vaals ku'shleri zaryad almasiw pu'tkilley bolmaytug'in jag'daylarda payda boladi.

**Molekulalar sistemaları. Suyiq ha'm gaz ta'rizli hallar.** Molekulalar arasindagi o'z-ara tartisw potentsial energiyasi teris ma'niske iye.

Eger sistema molekulalarinin' kinetikalq ha'm potentsial energiyalarinin' qosindisi on' shama bolg'an jag'dayda o'z erkine qoyilg'an molekulalar bir birinen sheksiz u'lken aralıqlarg'a qashiqlassiwg'a umtiladi. Bul gazdin' ken'eyiwge umtiliwina sa'ykes keledi.

Gaz qisilg'anda tıg'ızlıg'ı artadı ha'm molekulalar arasindagi ortasha qashıqlıq kishireydi. Usının' menen birge (24-5) ke sa'ykes potentsial energiya da kemeyedi.

*Eger ortasha kinetikalq energiya ju'da' u'lken bolmag'an jag'dayda sistemadagi' molekulalardin' kinetikalq energiya menen potentsial energiyalardin' qosindisi teris bolatug'in jag'day payda boladi. Molekulalardin' bunday sisteması o'zinshe u'lken ko'lemde tarqala almaydi.*

Bul jag'dayda baylanisqan hal ju'zege keledi. Molekulalar u'lken aralıqlarg'a kete almaydi, al kerisinshe shekli ko'lemde bir birinin' a'tirapında toplanadi. Molekulalar sistemasının' bunday halı suyuq yamasa qattı hal bolıwı mu'mkin. Ko'binese (barqulla emes, al kritikaliq temperaturalaradan to'men temperaturalarda) gaz qisilg'anda suyuq hal payda boladi.

Qisqan jag'dayda gaz halinan suyuq haldin' payda bolıwı molekulalardin' kinetikalq energiyasi ju'da' u'lken bolmag'an jag'dayda a'melge asadi. Belgisi teris bolg'an molekulalar arasindagi' ta'sirlesiw energiyasi shekli ma'niske iye boladi. Sonliqtan jetkilikli da'rejedegi joqari temperaturalarda kinetikalq energiya menen potentsial energiyalardin' qosindisi hesh waqıtta da teris ma'niske iye bolmaydi. Sonliqtan belgili bir temperaturadan joqari temperaturalarda tek qisw joli menen gazdi suyuqlıqqa aylandırw mu'mkin emes. Temperaturanın' usı belgili ma'nisin *kritikalq temperatura* dep ataymız.

Basım azayg'anda protsess keri bag'ıtta rawajlanadı - molekulalar sisteması suyuq haldan gaz ta'rizli halg'a o'tedi.

**Molekulalar arasindagi' ta'sir etisiwdi ta'ripleytug'in universal nızam joq. Bunday ta'sirlesiw molekulalardin' qa'siyetine, ta'sir etisiw sharayatlarına ha'm basqa da ayqın faktorlarga baylanisli. Sonliqtan molekulalar arasindagi' ta'sirlesiw juwıq formulalar ja'rdeminde ta'riplenedi. Bul formulalar qollanıw sheklerine iye boladi.**

**İonlıq baylanis zaryadlar menen tolıq almasiw bolg'anda, al kovalentlik baylanis zaryadlar menen tolıq emes almasiw bolg'an jag'daylarda ju'zege keledi. Van-der-Vaals baylanısı zaryad almasıwsız payda boladi. Metallıq baylanis o'zinin' fizikalq ta'biyatı boyınsha kovalentlik bolıp tabıladı, biraq ko'p elektronlardin' ulıwmalıq elektronlarga aylanıwı menen a'melge asadi.**

Eger molekulaning' ortasha kinetikalik energiyasi ortasha potentsial energiyasining' modulinen kishi bolsa (Yag'niy molekulaning' toliq energiyasi teris shama bolg'anda, toliq energiya = potentsial energiya + kinetikalik energiya) molekulalarning' baylanisqan hali payda boladi. Na'tiyjede suyuqliq yamasa qatti dene qa'liplesedi.

Sorawlar:

Qanday fizikalik faktorlarning' esabidan Van-der-Vaals ku'shinin' shaması aralıqtin' jetinshi da'rejesine kerip proporsional bolip kemeyedi? Ha'rqiylı faktorlar arasındag'ı usı keri jeti da'rejeni bo'listirin'. Ko'pbo'lekshelik ku'shler degenimiz ne ha'm bunday ku'shlerdin' tutqan ornı qanday jag'daylarda u'lken a'hmiyetke iye boladı ha'm qanday jag'daylarda a'hmiyetke iye bolmaydı?

Qanday sebeplerge baylanisli molekulalik kristallar arasında baylanis energiyası ju'da' kishi bolg'an kristallar bar?

## 26-§. Fazalar ha'm fazalik o'tiwler

Fazalar ha'm fazalik o'tiwler. Fazalik ten' salmaqlıq. Polimorfizm. Birinshi ha'm ekinshi a'wlad fazalik o'tiwler.

Faza dep zattin' basqa bo'limlerinen anıq shegara menen bo'lingen makroskopiyalik jaqtan bir tekli bo'limine aytamiz. Sonlıqtan faza sistemadan mexanikalik jollar menen bo'lip alınıwı mu'mkin.

Misal retinde jabıq ıdistag'ı suw menen onın' u'stindegı hawa menen suw puwlarının' aralaspasın ko'rsetiw mu'mkin. Bul sistema **eki fazalı sistema** dep ataladı. Bul zat eki fazadan turadı: **suyıq** (suw) ha'm **gaz ta'rizli** (hawa menen suw puwlarının' aralaspası). Eger hawa bolmag'anda da sistemada eki faza bolg'an bolar edi: suyıq (suw) ha'm gaz ta'rizli (suw puwları). Suwg'a bir kesek muz taslaymız. Bunday jag'dayda sistema u'sh fazalı sistemag'a aylanadı ha'm qatti (muz), suyıq (suw) ha'm gaz ta'rizli (suw puwları) fazalardan turadı. Suwg'a belgili bir mug'dardag'ı spirt qosamız. Fazalar ayırması o'zgermeydi. Sebebi suw spirt penen qosılıp fizikalik jaqtan bir tekli suyuqliq alınadı. Al suwg'a sinap qosılısı sinap suw menen aralaspaydı. Bunday jag'dayda **eki suyıq fazadan** turatug'in sistema alınadı. Gaz ta'rizli faza burıng'ısınsha hawa, suw puwları ha'm sinap puwlarının' aralaspasınan turatug'in bir fazadan turadı. **Solay etip sistemada bir waqıtta bir neshe qatti ha'm suyıq fazalardın' bolıwı mu'mkin. Gazler bir biri menen aralasıp ketetug'in bolg'anlıqtan sistema tek bir g'ana gaz ta'rizli fazadan tura aladı.**

Fazalar haqqındag'ı ta'limattag'ı en' a'hmiyetli ma'selenin' biri bolg'an fazalar arasındag'ı ten' salmaqlıq ma'selesin qarayıq. Bul jerde mexanikalik ha'm jıllılıq ten' salmaqlıg'ın na'zerde tutamiz. Jıllılıq ten' salmaqlıg'ının' ornawı ushın sistemanın' barlıq fazaları birdey temperaturag'a iye bolıwı kerek. Al fazalar arındag'ı shegaranın' ha'r ta'repine tu'sken basımlardın' o'z ara ten'ligi mexanikalik ten' salmaqlıqtın' za'ru'rli sha'rti bolip tabıladı. Bul sha'rt shegara tek tegis bolg'an jag'dayda toliq orınlanadı. İymek shegaralar jag'dayında bet kerimin esapqa alıwg'a tuwra keledi. Mısalı suyuqliq penen onın' puwı arasındag'ı ayırıp turatug'in iymek bette  $P_2 - P_1 = \sigma K$  basımlar ayırması orın aladı ( $K = 1/R_1 + 1/R_2$ ).

Basımlar menen temperaturalardın' ten'ligi sistemanın' ten' salmaqlıqta turg'anlıg'ın bildirmeydi. Sebebi o'z ara tiyisip turg'an fazalar arasında bir birine o'tiwlerdin' bolıwı

mu'mkin. Bunday o'tiwlerdi **fazaliq o'tiwler (fazaliq aylanislar)** dep ataymiz. Fazaliq o'tiwlerdin' na'tiyjesinde bir faza u'lkeyedi, ekinshisi kishireyedi, ha'tte ayırım fazalardın' toliq jog'alıp ketiwi mu'mkin. Ten' salmaqlıq hal barlıq fazalardın' massalarının' o'zgerissiz qalıwı menen ta'riplenedi. Demek fazalar arasındag'ı ten' salmaqlıqtın' ja'ne bir za'ru'rli sha'rtinın' orınlanıwı kerek: **fazalar arasındag'ı o'tiwge qarata ten' salmaqlıq**. Bul sha'rt fazaliq o'tiwler menen fazalar arasındag'ı ten' salmaqlıq haqqındag'ı ta'limattın' tiykarın quraydı.

1- ha'm 2-fazalardan turatug'ın ximiyalıq bir tekli zattan turatug'ın sistemanı qaraymız.  $m_1$  birinshi, al  $m_2$  ekinshi fazalar massaları bolsın.  $\varphi_1$  ha'm  $\varphi_1$  arqalı usı fazalardın' salıstırmalı termodinamikalıq potentsialların belgileyik. Barlıq sistemanın' termodinamikalıq potentsiali  $\Phi = m_1\varphi_1 + m_2\varphi_2$  ge ten' boladı. Sistemanın' temperaturası menen basımı o'zgerissiz qalsın. Tek g'ana basım menen temperaturag'a g'a'rezli bolg'anlıqtan  $\varphi_1$  menen  $\varphi_2$  ler da o'zgerissiz qaladı. Al sistema massası  $m = m_1 + m_2$  qosındısı da o'zgerissiz qaladı. Al  $m_1$  menen  $m_2$  ler fazaliq o'tiwde o'zgeriske ushıraydı. Bul o'zgerisler barısında termodinamikalıq potentsial  $\Phi$  mu'mkin bolg'an kishi ma'niske iye bolıwa qarata umtıladı. Eger  $\varphi_1 > \varphi_2$  bolsa 1-fazanın' 2-fazag'a aylanısı  $\Phi$  tin' kishireyiwi menen ju'redi. Bul aylanıs 1-faza ornıqlı bolg'an 2-fazag'a toliq o'tkenshe ju'redi. Bunday jag'dayda en' aqırında sistema bir fazalı sistemag'a aylanadı, al onın' termodinamikalıq potentsiali en' kishi bolg'an  $m\varphi_2$  shamasına jetedi. Kerisinshe, eger  $\varphi_1 < \varphi_2$  bolg'an jag'dayda 2-faza aqır-ayag'ında 1-fazag'a o'tedi. Tek g'ana

$$\varphi_1(P, T) = \varphi_2(P, T) \quad (26-1)$$

bolg'an jag'dayda g'ana fazalar bir biri menen ten' salmaqlıq halda tura aladı. Sonlıqtan fazalar arasındag'ı ten' salmaqlıq sha'rti olardın' salıstırmalı termodinamikalıq potentsiallarının' ten'liginen ibarat boladı.

Fazaliq o'tiwlerge zatların' agregat halının' o'zgeriwi misal bola aladı. Agregat hal dep zatların' gaz ta'rizli, suyıq ha'm qattı halların tu'sinemiz. Qattı ha'm suyıq hallar **kondensatsiyalang'an hallar** bolıp tabıladı. Puwlanın' menen puwdın' payda bolıwın zatların' kondensatsiyalang'an haldan gaz ta'rizli halına o'tiwi dep ataymız. Keri o'tiwdi kondensatsiya dep ataymız. Zattın' qattı haldan birden gaz ta'rizli halını o'tiwin **sublimatsiya** yamasa **vozgonka** dep ataydı. Qattı haldan suyıq halg'a o'tiwdi **eriw**, al keri o'tiwdi **qatıw** dep ataymız.

Zatların' qattı halı ha'r qıylı **kristallıq modifikatsiyalarda** qa'liplesiwi mu'mkin. Bul qubılıstı **polimorfizm** dep ataymız. Misalı qattı uglerod tiykarınan almaz ha'm grafit tu'rinde baqlanadı. Almaz ha'm grafit kristallıq qurılısı (ha'm usıg'an baylanıslı fizikalıq ha'm ximiyalıq qa'siyetleri) boyınsha parqlanadı. Qa'dimgi muzdın' da ha'r qıylı tu'rleri bar. Qattı haldag'ı temir to'rt tu'rli modifikatsiyag'a iye ( $\alpha$ -,  $\delta$ -,  $\gamma$ - ha'm  $\delta$ -temir).

Ha'r bir fazaliq o'tiw zattın' qa'siyetin ta'ripleytug'ın qanday da bir fizikalıq shamanın' sekiriw menen o'zgeriwi arqalı a'melge asadı. Qa'legen fazaliq o'tiwde salıstırmalı termodinamikalıq potentsial  $\varphi(T, P)$  dın' u'zliksiz bolıp o'zgeretug'inlıg'ı joqarıda ko'rsetilgen edi. Biraq onın' tuwındıları u'ziliske ushırawı mu'mkin.

**Termodinamikalıq potentsial  $\varphi(T, P)$  nın' birinshi ta'rtpili tuwındıları sekiriw menen o'zgeretug'in fazaliq o'tiwler birinshi a'wlad fazaliq o'tiwler dep ataladı. Usı funktsiyanın' birinshi ta'rtpili tuwındıları u'zliksiz, al ekinshi ta'rtpili tuwındıları sekirip o'zgeretug'in fazaliq o'tiwler ekinshi a'wlad fazaliq o'tiwler dep ataladı.**

Da'slep birinshi a'wlad fazalıq o'tiwlerdi qaraymız.

$$s = - \left( \frac{\partial \varphi}{\partial T} \right)_p, \quad v = \left( \frac{\partial \varphi}{\partial P} \right)_T \quad (26-2)$$

bolg'anlıqtan birinshi a'wlad fazalıq o'tiwlerinde salıstırmalı entropiyanın' yamasa salıstırmalı ko'lemnin' yamasa usı eki shamanın' da bir waqıtta sekirmeli o'zgeriwi baqlanadı. Salıstırmalı entropiyanın' sekirmeli o'zgeriwi fazalıq o'tiwdin' jıllılıq energiyasın jutıwı yamasa shıg'arıwı menen a'melge asatug'ınlg'ın bildiredi (mısalı eriw jıllılıg'ı). Massası bir birlikke ten' zattın' 1-fazasın 2-fazag'a kvazistatikalıq jol menen o'tkeriw ushın kerek bolatug'ın jıllılıq mug'darı q bılay esaplanadı:

$$q = T(s_2 - s_1). \quad (26-3)$$

Usı waqıtqa shekem qarap o'tilgen fazalıq o'tiwler (eriw, puwlanıw, qaynaw, vozgonka, kristallanıw) jıllılıqtın' jutılıwı yamasa shıg'arılıwı menen a'melge asadı. Sonlıqtan olar birinshi a'wlad fazalıq o'tiwleri bolıp tabıladı.

Endi ekinshi a'wlad fazalıq o'tiwlerin qaraymız. (26-2)-an'latpalardan bunday o'tiwlerde s penen v shamaların' u'zliksiz bolıp qalatug'ınlg'ın ko'remiz.

***Demek ekinshi a'wlad fazalıq o'tiwleri jıllılıqtı jutıw yamasa shıg'arıw, sonday-aq salıstırmalı ko'lemnin' o'zgeriwi menen a'melge aspaydı. Ekinshi a'wlad fazalıq o'tiwlerinde salıstırmalı termodinamikalıq potentsialdın' barlıq yamasa bazı bir ekinshi ta'rtpi tuwındıları u'ziliske ushıraydı.***

Ha'r bir faza ushın bul tuwındılar u'zliksiz o'zgeretug'ın ma'nislerge iye ha'm to'mendegidey tu'rlerde beriliwi mu'mkin:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial T^2} = - \left( \frac{\partial s}{\partial T} \right)_p = -c_p T,$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial T \partial P} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial P \partial T} = \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p,$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial P^2} = \left( \frac{\partial v}{\partial P} \right)_T.$$

Bul shamalar tek fazalıq o'tiwlerde u'zilike ushıraydı. Bul formulalardan ekinshi a'wlad fazalıq o'tiwleri to'mendegidey shamaların' birewinin' yamasa ekewinin' sekirmeli o'zgerisi menen ju'redi:

1) salıstırmalı jıllılıq sıyımlıg'ı  $c_p$ ;

2) jıllılıqqa ken'eyiw koeffitsienti  $\alpha = \frac{1}{v_0} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p$ ;

3) zattı izotermalıq qısıw koeffitsienti  $\gamma = - \frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial P} \right)_T$ .

Ekinshi a'wlad fazalıq aylanıslarına (o'tiwlerine) misal retinde temirdin', nikeldin', kobaltdın' yamasa magnitlik quymalardıń birinin' *ferromagnit* haldan *paramagnit* halg'a o'tiwin ko'rsetiwge boladı. Bunday o'tiw materialdı qızdırg'anda belgili bir temperaturada ju'zege keledi. Temperaturanın' bul ma'nisin *Kyuri noqatı* dep ataymız. Sırtta magnit maydanı bolmag'an jag'dayda zatlardın' to'mengi temperaturalarda (absolyut nolge jaqın temperaturalarda) asa o'tkizgishlik halg'a o'tiwi de ekinshi a'wlad fazalıq o'tiwlerine misal bola aladı.

Endi fazalıq o'tiwlerdi ta'ripleytug'ın bir qansha ma'seleler keltiremiz.

1-ma'sele. Temperaturası 0°S bolg'an jabıq ıdısta bir mol suw bar (18 g). Usı sistemanın' temperaturasını 100°S g'a shekem joqarılatıw ha'm sonın' menen birge suwdın' barlıg'ı toying'an puwg'a aylanıwı ushın qanshama jıllılıq mug'darın jumsaw kerek? Turaqlı basımda 100°S temperaturada suwdın' qaynaw jılıwı 539 kal/g. 0°S da ha'm ıdıs diyalın'ın' jıllılıq sıyımlıg'ın esapqa almaymız. Sonın' menen birge toying'an puwdın' ko'lemine salıstırg'andag'ı suwdın' ko'lemin esapqa almaymız.

SHeshimi: Qızdırg'anda sistemanın' ko'leminin' o'zgermeytug'ınlıg'ına baylanıslı jumıs islenbeydi. Sonlıqtan beriletug'ın jıllılıq tolg'ı menen sistemanın' ishki energiyasını arttırıwıg'a jumsaladı ha'm sistemanı da'slepki haldan keyingi halg'a o'tkeriw usılına g'a'rezli emes. Bul o'tiwdi eki etapta a'melge asıramız

1. Suwdı 0°S dan 100°S g'a shekem puwlanıw bolmaytug'ınday etip qızdıramız. Bul ushın  $q_1 = 18 \cdot 100 = 1800$  kal/mol jıllılıg'ın beriwimiz kerek.

2.  $t = 100^\circ\text{C}$  turaqlı temperaturasında suwdı puwlandıramız. Bul ushın  $q_2 = u_p - u_j$  jıllılıq mug'darın beriwimiz kerek ( $u_p$  menen  $u_j$  bolsa 100°S da ha'm atmosferalıq basımdıg'ı bir mol puw menen suwdın' ishki energiyaları).  $u_p - u_j$  ayırmasın anıqlaw ushın termodinamikanın' birinshi baslamısının'  $q = u_p - u_j + A$  formulasın qollanamız. Bul jerde  $q$  bir mol ushın puwlanıw jılıwı,  $q = 539 \cdot 18 = 9710$  kal/mol, al  $A$  bolsa turaqlı sırtqı basımdı jen'iw ushın islengen jumıs ( $A = PV_p = RT = 1.98 \cdot 373 = 739$  kal/mol). Solay etip

$$q_2 = u_p - u_j = q - A = 8970 \text{ kal/mol.}$$

$$l = l_1 + l_2 = 1800 + 8970 = 10\,770 \text{ kal/mol.}$$

Endi fazalıq o'tiwlerdin' en' a'piwayılarının' biri puwlanıw menen kondensatsiyanı qaraymız.

## 27-§. Gaz halınan suyıq halg'a o'tiw

Gaz halınan suyıq halg'a o'tiw. Eksperimentallıq izotermalar. Kritikalıq hal. Eki fazalı hal oblasti. Toying'an puw. Toying'an puwdın' tıg'ızlıg'ı. Kritikalıq hallardag'ı zatlardın' qa'siyetleri. Turaqlı ko'lemde temperatura o'zgergende eki fazalı sistemanın' qa'siyeti.

**Eksperimentte anıqlang'an izotermalar.** Qısıw protsessinde eksperimentte anıqlang'an real gazdın' izotermaları to'mendegi su'wrette keltirilgen. Usı diagramma boyınsha T temperaturasındag'ı gazdı qısıw protsesin qaraymız. Gazdı  $V_1$  ko'lemine shekem qısqanda onın'

basımı  $p$  g'a shekem artadı. Ko'lemnin' bunnan bilay kemeyiwinde gazdin' bir bo'limi suyuqliqqa aylanadı, al basım  $p$  turaqlı bolıp qaladı. Demek diagrammadag'ı B dan C g'a shekemgi aralıqta ıdista bir waqıtta gaz de, suyuqliq ta boladı. Gaz benen suyuqliqtı ayırıp turatug'ın bet suyuqliq beti bolıp tabıladı. Fizikalıq jaqtan sistema bo'lingen bir tekli bo'limler fazalar dep ataladı. Demek CB ushastkasında sistema suyuq ha'm gaz fazalardan turadı. B noqatında barlıq ko'lem gaz faza menen toltırılğ'an. B dan C g'a ju'rgende ko'lemnin' gaz faza menen tolg'an bo'legi kemeyedi, al suyuq faza menen tolg'an bo'limi u'lkeyedi. C noqatında barlıq ko'lem  $V_2$  suyuqliq penen toladı. Gazdin' suyuqliqqa aylanıwı tolıg'ı menen pitedi. Ko'lemnin' bunnan bilay kishireyiwi suyuqliqtı qısıw menen a'melge asadı. O'z gezeginde suyuqliq qısıwıg'a u'lken tosıqlıq jasadı. Na'tiyjede basım tez u'lkeyedi.

**Kritikalıq hal.** Temperatura joqarı bolg'anda izotermanın' suyuq ha'm gaz fazalarg'a sa'ykes keliwshi ushastkası kishireyedi.  $T_{kr}$  temperaturada usı ushastka noqatqa aylanadı.

Usı noqatta gaz benen suyuqliq arasındag'ı ayırma jog'aladı. Basqa so'z benen aytqında kritikalıq qnoqatta gaz benen suyuqliq birdey fizikalıq qa'siyetke iye boladı.

Bunday haldı **kritikalıq hal** dep ataymız.  $T_{kr}$ ,  $V_{kr}$  ha'm  $p_{kr}$  shamaların sa'ykes kritikalıq temperatura, ko'lem, basım dep ataymız. Kritikalıq temperaturadan joqarı temperaturalarda gaz basımdı u'lkeytiwdin' saldarınan suyuqliqqa aylanbaydı.

**Eki fazalı hal oblasti.** Su'wrette eki fazalı oblast C, K, B, A noqatları arqalı o'tiwshi shtrixlang'an sızıq penen ayırıp ko'rsetilgen. Gaz ta'rizli haldan suyuq halg'a o'tiw eki jol menen asırıladı: NBCM boyınsha eki fazalı oblast yamasa NN'RM'M arqalı. Ekinshi jag'dayda 4 noqatında eki fazalı oblastsız suyuq halg'a o'tiw a'melge asadı. Bul noqatta suyuq ha'm gaz ta'rizli hallar arasındag'ı ayırma jog'aladı. Biraq usı noqatqa qon'ısı bolg'an noqatlarda suyuqliq penen gazdin' qa'siyetleri ha'r qıylı boladı.

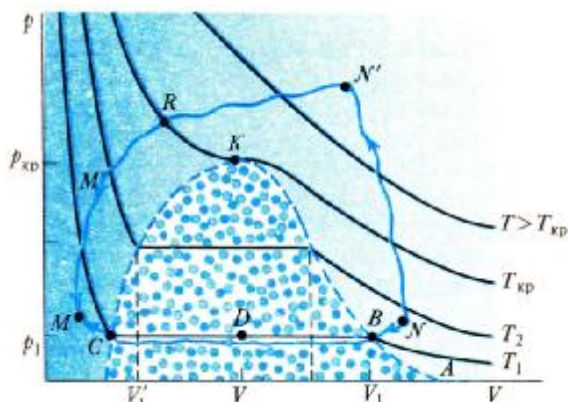
**Toying'an puw.** Eki fazalı sistemada suyuqliq penen puw dinamikalıq ten' salmaqlıqta turadı ha'm bul halg'a anıq basım menen tıg'ızlıq sa'ykes keledi.  $p$  basımı  $T$  temperaturadag'ı toying'an pardın' basımı dep ataladı. Su'wrette temperaturanın' o'siwi menen toying'an puw basımın' da ko'teriletug'ınlıg'ı ko'rinip tur. Berilgen temperaturada «tıg'ızlaw» mu'mkin bolmag'anlıqtan puw toying'an puw dep ataladı.

Kritikalıq noqatta suyuq fazanın' tıg'ızlıg'ı gaz fazanın' tıg'ızlıg'ına ten' boladı. Yag'nıy

$$\rho_{kr} = M/V_{kr}.$$

**Zatlardıń kritikalıq haldag'ı qa'siyetleri.** Kritikalıq noqatta izoterma gorizont boyınsha bag'ıtlang'an. Sonlıqtan  $(\partial p / \partial T)_T = 0$ , Yag'nıy basım (sonın' menen birge tıg'ızlıq) ko'lemnen g'a'rezsiz. Demek ko'lemnin' bar bo'liminde bo'leksheler tıg'ızlıg'ı artsa, bul tıg'ızlıqtı kemeytiwge bag'darlang'an basım payda boladı. Sonlıqtan kritikalıq halda tıg'ızlıq fluktuatsiyaları o'sedi. Bul kritikalıq opalestsentsiya qubılısın' payda bolıwına alıp keledi (tıg'ızlıq fluktuatsiyasın' o'siwinin' na'tiyjesinde kritikalıq halda turg'an zattın' jaqtılıq nurların ku'shli shashıratıwı).

Suyuqliq halınan gaz halına o'tkende turaqlı temperaturada sistemag'a belgili bir mug'darda jıllılıq beriliwi kerek. Bul jıllılıq zattın' fazalıq halın o'zgertiw ushin jumsaladı ha'm **fazalıq aylanıs jıllılıg'ı** yamasa **o'tiwdin' jasırın jıllılıg'ı** dep ataladı.



2-29 su'wret. Real (haqıyqıy) gaz benen suıqlıqtın' izotermaları

Jasırın jıllılıg'ı bo'leksheler arasındag'ı tartısıw ku'shlerin jen'iw ushın jumsaladı. Temperatura joqarılag'an sayın jasırın jıllılıg'mın' ma'nisi kemeyedi. Kritikalıq temperaturada jasırın jıllılıq nolge ten'.

## 28-§. Klapeyron-Klauzius ten'lemesi

**Klapeyron-Klauzius ten'lemesin keltirip shıg'arıw.** Temperaturanın' o'siwi menen toying'an puwdın' basımı da o'sedi. Usı eki shama arasındag'ı baylanıs Klapeyron-Klauzius ten'lemesinde berilgen.

SHeksiz kishi Karno tsiklin qaraymız. Bul tsikldin' izotremaları  $T$  ha'm  $dT$  temperaturalarındag'ı eki fazalı oblast bolsın. Bul tsikldegi jumıs

$$A = (V_1 - V_2) dp. \quad (28-1)$$

Sa'ykes paydalı ta'sir koeffitsienti

$$\eta = A/Q^{(+)} = (V_1 - V_2) dp / Q. \quad (28-2)$$

$Q$  berilgen massadag'ı zattın' o'tiwindegi jasırın jıllılıg'ı. Basqa ta'repten Karno tsikli ushın paydalı ta'sir koeffitsienti

$$\eta = 1 - T_2/T_1 = 1 - (T + dT)/T = dT/T. \quad (28-3)$$

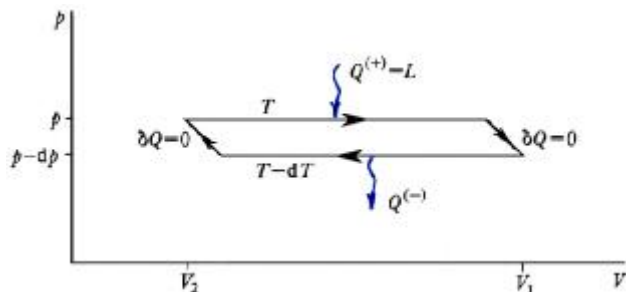
(28-2) menen (28-3) ti ten'lestiriw arqalı

$$dp / dT = Q/[T(V_1 - V_2)]. \quad (28-4)$$

Bul ten'leme **Klapeyron-Klauzius ten'lemesi** dep ataladı. Bul ten'leme eki fazalı sistema ten' salmaqlıq halda turg'an jag'daydag'ı basım menen temperatura arasındag'ı baylanısı beredi. Eger jasırın jıllılıg'ı 1,  $V_2$  ha'm  $V_1$  ko'lemleri belgili bolsa (28-4) ten'lemesi basımdı temperaturanın' funktsiyası sıpatında tabıwg'a boladı.

Molekulalıq ko'z-qarastan suıqlıqtın' puwlınwı ushın jıllılıqtın' ne sebepten kerek ekenligin an'sat tu'siniwge boladı. Suıqlıq molekularının' tezlikleri Maksvell nızamı boyınsha

tarqalg'an. Suyıqlıqtan qorshag'an ortalıqqa tek g'ana ayırım tez qozg'alatug'in molekular uship shıg'ıwı mu'mkin. Tek solar g'ana suyıqlıqtın' beti qatlamındag'ı tartılıs ku'shlerin jen'e aladı. Betlik qatlam arqalı o'tkende molekularların' tezligi kemeyedi ha'm sonın' saldarınan puwdın' temperaturası suyıqlıqtın' temperaturasına ten' boladı. Tez qozg'alatug'in molekular ketip qalg'anlıqtan suyıqlıq salqınlaydı. Sonlıqtan suyıqlıqtın' temperaturasını turaqlı etip uslap turıw ushın sırttan jıllılıq beriw kerek.



2-30 su'wret.

Klapeyron-Klauzius ten'lemesin keltirip shıg'arıwg'a arnalg'an su'wret

Basqa da fazalıq o'tiwlerde de sırttan qosımsha jıllılıqtın' beriliwinin' kerek ekenligi ta'biyiy na'rse. Biraq ha'r ayqın qanday jag'daylarda qubılıstın' mexanizmerinin' ha'r qıylı bolıwı mu'mkin.

Klapeyron-Klauzius ten'lemesi tek puwlanıw ushın emes, al jıllılıqtın' jutılıwı yamasa shıg'arıwı menen ju'retug'in basqa da fazalıq o'tiwler ushın durıs boladı. Mısalı eriw ushın bilay jaza alamız:

$$dp/dT = Q_{23}/[T(v_2 - v_3)].$$

Bul an'latpadag'ı  $Q_{23}$  eriwdin' salıstırmalı jıllılıg'ı,  $v_2$  ha'm  $v_3$  ler suyıq ha'm qattı fazalardın' salıstırmalı ko'lemleri,  $R$  basımındag'ı eriw temperaturası  $T$  arqalı belgilengen.  $Q_{23}$  shaması on' ma'niske iye. Sonlıqtan, eger  $v_2 > v_3$  bolg'an jag'dayda  $dp/dT > 0$ . Bul basımnın' o'siwi menen eriw noqatının' joqarılaytug'ınlig'in bildiredi. Eger  $v_2 < v_3$  bolsa  $dp/dT < 0$ , Yag'nıy basım ko'terilgende eriw temperaturası to'menleydi. Usı awhal suw ushın orınlı boladı.  $0^\circ\text{C}$  da muz benen suwdın' salıstırmalı ko'lemleri arasındag'ı ayırma shama menen

$$v_3 - v_2 = 9.19 \cdot 10^{-2} \text{ sm}^3 \cdot \text{g}^{-1}.$$

Eriw jıllılıg'ı

$$1 = 80 \text{ kal} \cdot \text{g}^{-1} = 3.35 \cdot 10^9 \text{ erg} \cdot \text{g}^{-1}.$$

Bul shamalardı paydalanıp to'mendegini alamız:

$$dp/dT = - 3.35 \cdot 10^9 / (27399.1 \cdot 10^{-2}) = - 1.35 \cdot 10^8 \text{ din} \cdot \text{sm}^{-2} \cdot \text{grad}^{-1} = 134 \text{ atm} \cdot \text{grad}^{-1}.$$

Bul jerde basım bar atmosferag'a u'lkeygende muzdın' eriw temperaturasının' shama menen  $0.0075$  gradusqa to'menleytug'ınlig'ı ko'rinip tur. Al Dyuar bolsa ta'jiriyyede  $0.0072 \text{ grad} \cdot \text{atm}^{-1}$  shamasın aldı. Bul shama esaplang'an shamag'a tolıq sa'ykes keledi.

Klapeyron-Klauzius ten'lemesi ekinshi a'wlad fazalıq o'tiwleri ushın ma'niske iye bolmay qaladı. Bunday jag'dayda (28-5) an'latpasının' on' ta'repindegi bo'lshektin' alımı da, bo'limi de nolge ten'. Sonlıqtan ekinshi a'wlad fazalın' o'tiwin jag'dayında Klapeyron-Klauzius ten'lemesin *Erenfest* (1880-1933) qatnasları menen almasıwımız kerek.



Erenfest qatnasları salıstırmalı entropiya  $s$  tin', salıstırmalı ko'lem  $v$  nın' ekinshi a'wlad fazalıq o'tiwlerindeki u'zliksizliginin' saldarı bolıp tabıladı. Qanday da bir fazanın' salıstırmalı entropiyasın temperatura menen basımnın' funktsiyası dep qarasaq, onın' differentialsalı ushın to'mendegini jazamız:

$$ds = \left( \frac{\partial s}{\partial T} \right)_p dT + \left( \frac{\partial s}{\partial P} \right)_T dP,$$

yamasa

$$\left( \frac{\partial s}{\partial T} \right)_p = \frac{c_p}{T}, \quad \left( \frac{\partial s}{\partial P} \right)_T = - \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p,$$

$$ds = \frac{c_p}{T} dT - \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p dP.$$

Bul qatnastı eki fazanın' ha'r biri ushın jazamız:

$$ds_1 = \frac{c_{1p}}{T} dT - \left( \frac{\partial v_1}{\partial T} \right)_p dP,$$

$$ds_2 = \frac{c_{2p}}{T} dT - \left( \frac{\partial v_2}{\partial T} \right)_p dP.$$

Ten' salmaqlıq iymekliginde  $(T, P)$  ha'm  $(T + dT, P + dP)$  noqatların alayıq. Bunday jag'dayda  $dP/dT$  usı iymektiktin' qıyalıg'ın anıqlıydı. Sonın' menen birge fazalıq o'tiwde  $ds_1 = ds_2$  ekenligin esapqa alsaq to'mendegige iye bolamız:

$$(c_{2p} - c_{1p}) (dT/T) = \left[ - \left( \frac{\partial v_1}{\partial T} \right)_p \right] dP,$$

yamasa qısqasha tu'rde

$$\Delta c_p = T \Delta \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \frac{dP}{dT}. \quad (28-6)$$

Bul an'latpalardag'ı  $\Delta c_p$  menen  $\Delta \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$  lar fazalıq o'tiwlerdegi  $s_R$  shaması menen  $\left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$  shamaların' sekiriwine ten'. (28-6) an'latpası **Erenfesttin' birinshi qatnası** bolıp tabıladı.

Tap usınday jollar menen Erenfesttin' ekinshi qatnası alınadı. Bul jerde salıstırmalı entropiya  $s$  ti temperatura menen salıstırmalı ko'lemnin' funktsiyası dep qaraw kerek. Bul qatnas to'mendegidey tu'rge iye boladı:

$$\Delta c_v = T \Delta \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_v \frac{dv}{dT}. \quad (28-7)$$

U'shinshi qatnastı alıwda salıstırmalı entropiya  $s$  ti  $v$  ha'm  $P$  shamaların' funktsiyası dep qaraw kerek. Sonda:

$$\Delta \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_P = \Delta \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_v \frac{dv}{dP}. \quad (28-8)$$

Erenfestin' keyingi to'rtinshi qatnası salıstırmalı ko'lem  $v$  nın' uzliksizliginen ha'm onı  $P$  menen  $T$  nın' funktsiyası dep qarawdın' na'tiyjesinde alınadı:

$$\Delta \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_P = - \Delta \left( \frac{\partial v}{\partial P} \right)_T \frac{dP}{dT}. \quad (28-9)$$

(28-7), (28-8) ha'm (28-9) qatnaslarında  $\frac{dv}{dT}$ ,  $\frac{dv}{dP}$  ha'm  $\frac{dP}{dT}$  tuwındıları ten'salmaqlıqtın' sa'ykes iymeklikleri boyınsha alınadı.

## 29-§. Van-der-Vaals ten'lemesi

Gazlerdin' qa'siyetlerinin' ideallıqtan o'zgesheligi. Qısılwshılıq. Virial hal ten'lemesi. Van-der-Vaals ten'lemesi. Van-der-Vaals ten'lemesinin' viriallıq forması. Van-der-Vaals ten'lemesi izotreması. Metastabillik hal. Kritikalıq parametrlar.

**Gazlerdin' qa'sietlerinin' ideallıqtan o'zgesheligi.** Gazlerdi eksperimentte izertlewler  $pV$  ko'beymesinin'  $T = \text{const}$  sha'rti orınlang'anda basımnın' u'lken diapazonında turaqlı qalmaytug'ınlıg'ın ko'rsetedi.  $pV$  ko'beymesi basımg'a baylanıslı kishi basımlarda qısılg'ıshlıq, al u'lken basımlarda basımg'a u'lken qarsılıq ko'rsetetug'ın qa'siyetke iye bolatug'ınlıg'ın ko'rsetip o'zgeredi. Basqa so'z benen aytqanda *gazdin' kishi tıg'ızlıqlarında tartılıs ku'shleri, al u'lken tıg'ızlıqlarda iyterisiw ku'shleri ta'sir etedi.*

**Qısılg'ıshlıq.** Turaqlı temperaturadag'ı ko'lemnin' salıstırmalı o'zgeriwi  $\Delta V/V$  menen basımnın' o'zgerisi  $\Delta p$  arasındag'ı  $\chi$  koeffitsienti *izotermalıq qısılwshılıq koeffitsienti* dep ataladı.

$$\Delta V/V = - \chi \Delta p. \quad (29-1)$$

Bunnan

$$\chi = - \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial p} \right)_T. \quad (29-2)$$

İdeal gaz ushın  $\left( \frac{\partial V}{\partial p} \right)_T = - V/p$  ha'm  $\chi = 1/p$ . Eksperimentler kishi basımlarda real gazlerdin' qısılwshılıg'mın' ideal gazdin' qısılwshılıg'man kem ekenligin, al u'lken basımlarda real gazlerdin' qısılwshılıg'mın' ideal gazlerdin' qısılwshılıg'man artıq ekenligin ko'rsetedi.

Suyıqlıqlarda qısılıwshılıq az. Sebebi bul jag'dayda molekularlar bir birine tug'ız etip jaylasadı. Sonın' ushın suyıqlıqtın' ko'lemin o'zgertiw ushın u'lken ku'sh talap etiledi. Mısalı:

Suyıqlıq	Qısılıwshılıq, $10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$
Suw	0.47
Benzin	0.82
Glitserin	0.22
Atseton	1.27

Bul keste suyıqlıqlardıń qısılg'ıshlıg'ı gazlerdin' qısılg'ıshlıg'ınan mın'lag'an ese kishi ekenligin ko'rsetedi.

**Virial hal ten'lemesi.** Hal ten'lemesi molekularlar arasındag'ı o'z-ara ta'sirlesiw nızamına g'a'rezli. Sonlıqtan

Ha'r bir sorttag'ı molekula o'zine ta'n hal ten'lemesine iye boladı. Suyıqlıqlar ha'm real gazler ushın universal hal ten'lemesi joq.

Printsipinde da'l hal ten'lemesi virial hal ten'lemesi tu'rinde ko'rsetiliwi mu'mkin:

$$p V_m = RT + A_1(T)/V_m + A_2(T)/V_m^2 + \dots \quad (29-3)$$

$A_i(T)$  virial koeffitsientler dep ataladı. Bul ten'leme sheksiz ko'p ag'zadan turatug'ın ten'leme bolıp tabıladı. Bul ten'lemenı sheshiw ushın sheksiz ko'p sandag'ı  $A_i(T)$  virial koeffitsientlerin biliwdi talap etedi. Bunday ko'z-qaras penen qarag'anda (27-3) tek teoriyalıq a'hmiyetke iye bolıp, a'meliy esaplawlarda u'lken qıyınshılıqlar payda etedi.

Juwıq hal ten'lemeleri arasında Van-der-Vaals ten'lemesi ken' tu'rde belgili.

**Van-der-Vaals ten'lemesi.** İdeal gaz ten'lemesi bolg'an  $pV = \frac{m}{M}RT$  ten'lemesinde molekularlar arasındag'ı tartısıw ha'm iyerisiw ku'shleri esapqa alınbag'an. Tartısıw ku'shleri molekularlar bir birinen uzaqlasqanda ta'sir etedi. Al iyerisiw ku'shleri bir molekula iyelegen ko'lemge ekinshi molekulanın' kiriwine qarsılıq jasadı. Sonlıqtan **molekularlar arasındag'ı iyerisiw ku'shleri molekulanın' effektiv ko'lemi menen ta'riplenedi.** Gazdin' massasına tuwra proporsional bolg'an molekularların' effektiv ko'lemin  $mb'$  arqalı belgileyemiz. Bul ko'lem esapqa aling'anda hal ten'lemesindegi o'zgeriske ushıraytug'ın ko'lem  $V$  emes, al onın' bo'limi  $V - mb'$  boladı.

Tartısıw ku'shinin' orın alıwı gazge tu'setug'ın qosımsha ishki basımnın' payda bolıwına alıp keledi. Bul qosımsha basımnın' shaması bo'leksheler sanına (kontsentratsiyasına) proporsional bolıwı kerek. O'z gezeginde bul shama  $m/V^2$  salıstırmalı ko'lemge kerı proporsional. Qosımsha basım sırtqı basımnın' kishireyiwin a'melge asıradı.

Usı jag'daylardı esapqa alıp **Van-der-Vaals ten'lemesin** jazamız:

$$(p + \frac{m^2 a'}{V^2})(V - mb') = \frac{m}{M}RT. \quad (29-4a)$$

$a'$  ha'm  $b'$  ha'r qıylı gazler ushın ha'r qanday ma'niske iye bolatug'ın turaqlılar. Bul shamalar **Van-der-Vaals turaqlıları** dep ataladı.

Ten'lemenin' eki ta'repin de m ge bo'lsek

$$(p + \frac{a'}{v^2})(v - b') = R_0 T \quad (29-4b)$$

ten'lemesin alamız. Bul jerde  $v = V/m$  - salıstırmalı ko'lem,  $R_0 = R/M$  - salıstırmalı gaz turaqlısı.

Ko'pshilik jag'daylarda  $a = a'M^2$  ha'm  $b = b'M$  shamaların qollanadı. Bunday jag'dayda  $v = m/M$  ekenligin esapqa alıp:

$$(p + \frac{a}{V_m^2})(V - vb) = vRT \quad (29-4v)$$

ten'lemesin alamız.  $a$  ha'm  $b$  turaqlıları da Van-der-Vaals turaqlıları dep ataladı. Olardı  $a'$  ha'm  $b'$  turaqlıları menen arjastırmaw kerek.  $V_m = V/v$  ekenligi esapqa alıp Van-der-Vaals ten'lemesinin' en' ko'p ushırasatug'ın tu'rin alamız:

$$(p + \frac{a}{V_m^2})(V_m - b) = RT. \quad (29-4g)$$

Virial tu'rde Van-der-Vaals ten'lemesin bılay jazamız:

$$pV_m = RT + \frac{RTb - a}{V_m} + RT \sum_{n=2}^{\infty} \frac{b^n}{V_m^n}. \quad (29-5)$$

İzotermalardı tallaw ushın (29-4g) ten'lemesin basqasha qolaylı etip jazamız. Ten'lemenin' on' ha'm shep ta'replerin  $V_m^2$  qa ko'beytip, qawsırmalardı ashıp iye bolamız:

$$V_m^3 - (b - \frac{RT}{p})V_m^2 + \frac{aV_m}{p} - \frac{ab}{p} = 0. \quad (29-6)$$

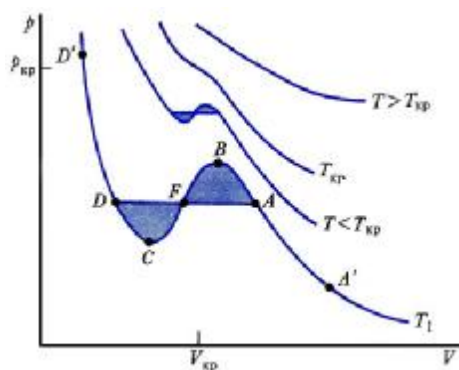
**Van-der-Vaals ten'lemesinin' izotremaları.** Eger (29-6) nı  $T = \text{const}$  sha'rti orınlang'anda sheshetug'ın bolsaq, onda  $p$  nın' ha'r qıylı ma'nislerinde  $V$  u'sh yamasa bir ma'niske iye bolatug'ınlig'ın ko'remiz.

Bul ten'lemeni sheshkende alnatug'ın  $r, V$  tegisligindegi izotermanın'  $p = \text{const}$  tuwrısın bir yamasa u'sh noqatta kesip o'tetug'ınlig'ın bildiredi.

Sonlıqtan Van-der-Vaals ten'lemesi izotermaları su'wrette ko'rsetilgendeı tu'rge iye boladı.  $T_{kr}$  shaması  $p = \text{const}$  tuwrısın u'sh noqattı kesiwshi monotonlı emes izotermanı bir noqatta kesetug'ın monotonlı izotermalardan ayırıp turadı.  $T_{kr}$  izoterması eksperimentte aling'an kritikalıq temperaturadag'ı izotermag'a sa'ykes keledi.  $T < T_{kr}$  temperaturadag'ı izotermalar eksperimentte aling'an izotermalardan basqasha tu'rge iye. İzotermadag'ı A'A ha'm DD' bo'limler gaz ta'rizli ha'm suyıq hallarg'a sa'ykes keledi. AB ha'm SD izotermalarının' qanday

halg'a sa'ykes keletug'inlig'in aniqlaw kerek boladı. Sebebi usı eki ushastkada da  $\partial r/\partial V < 0$  ha'm usı bo'lmırdin' payda bolıwı qadag'an etilmeydi. Eksperimentte bolsa izoterma eki fazalı oblast bolg'an  $T_1 A' A F D D'$  sızıqları boyınsha ju'redi (2-31 su'wret).

AB ha'm SD ushastkalrı asa salqınlatılğ'an puw ha'm asa qızdırılğ'an suyıqlıq oblastına sa'ykes keledi. Asa salqınlatılğ'an puw halı - bul sonday hal, bul halda o'zinin' parametrleri boyınsha sistema suyıq halda bolıwı kerek, biraq qa'siyetleri boyınsha sistema gaz halında qaladı. Al asa qızdırılğ'an suyıqlıq - zat bul halda parametrleri boyınsha gaz halına o'tiwi kerek, biraq qa'siyetleri boyınsha suyıqlıq bolıp qalıwın dawam etedi.



2-31 su'wret.

Van-der-Vaals izotermaları

**Asa salqınlatılğ'an puw ha'm asa qızdırılğ'an suyıqlıq halları absolyut ornıqlı hallar bolıp tabılmaydı. Ha'lsiz sırtqı ta'sirdin' na'tiyjesinde sistema jaqın turg'an turaqlı halg'a o'tedi. Bunday hal metastabil hal dep ataladı.**

**Kritikalıq parametrler.**  $T > T_{kr}$  temperaturalarında (29-6) tek bir haqıyqıy tu'birge, al  $T < T_{kr}$  bolg'anda r nı bazı bir ma'nislerinde u'sh haqıyqıy tu'birge iye boladı. Temperaturanın' joqarılawı menen usı u'sh tu'birdin' ma'nisleri bir birine jaqınlaydı ha'm kritikalıq temperaturada bir ma'niske ten'lesedi. Demek kritikalıq halda (29-6) to'mendegidey tu'rge iye boladı:

$$(V - V_{kr})^3 = V^3 - 3V_{kr}V^2 + 3V_{kr}^2V - V_{kr}^3 = 0. \quad (29-7)$$

(26-6) ha'm (26-7) ten'lemelerin salıstırıw arqalı iye bolamız:

$$V_{kr} = b + RT_{kr}/p_{kr}, \quad 3V_{kr}^2 = a/p_{kr}, \quad 3V_{kr}^3 = ab/p_{kr}. \quad (29-8)$$

(28-8) u'sh belgisizli ( $V_{kr}, p_{kr}, T_{kr}$ ) u'sh ten'lemeler sisteması bolıp tabıladı. Sistemanın' sheshimi:

$$V_{kr} = 3b; \quad p_{kr} = \frac{a}{27b^2}; \quad T_{kr} = \frac{8a}{27rb}. \quad (29-9a)$$

$RT_{kr}/(p_{kr} V_{kr}) = 8/3$  shaması kritikalıq koeffitsient dep ataladı. Haqıyqatında ha'r qıylı gazler ushin kristikalıq koeffitsientler 8/3 ten o'zgeshe ma'niske iye boladı ha'm olardın' barlıg'ı da 8/3 ten u'lken ma'niske iye boladı.

Usılay etip kritikalıq hal parametrleri Van-der-Vaals ten'lemesindegi a ha'm b turaqlıları menen aniqlanadı eken.

Solay etip Van-der-Vaalstin' eki turaqlısı ushin u'sh ten'leme orın aladı eken. Bul ten'lemeler eger  $r$  (29-9a) ja'rdeminde anıqlanatuǵ'ın bolsa qanaatlandırıladı.

Bul ten'lemelerdi  $a$ ,  $b$  ha'm  $r$  ge qarata sheshsek:

$$a = 3p_{kp} V_{kp}^2, \quad b = V_{kp} / 3, \quad R = 8p_{kp} V_{kp} / (3T_{kp}). \quad (29-9b)$$

Bul ten'lemeler ha'r bir individual gaz ushin o'zinin' gaz turaqlısın esaplaw kerek ekenligin ko'rsetedi. Eksperiment bunday gaz turaqlısının' mollik gaz turaqlısınan kishi ekenligin ko'rsetedi.

*Van-der-Vaals ten'lemesine kiriwshi gaz turaqlısı kritikalıq halg'a jaqınlag'anda ha'r bir zat ushin o'zine ta'n ma'niske iye boladı. Bul ma'nis mollik gaz turaqlısınan o'zgeshe. Individuallıq gaz turaqlısının' ma'nisi mollik gaz turaqlısının' ma'nisinen kishi. Bul kritikalıq hal a'tirapında molekulalardıń komplekslerge birigiwine sa'ykes keledi. Kritikalıq haldan alısta Van-der-Vaals ten'lemesinde gaz turaqlısı sıpatında mollik gaz turaqlısın alıw mu'mkin.*

*Molekulaları o'z-ara ta'sirlesiw orın alatug'ın ha'r bir gaz ushin o'zine ta'n hal ten'lemesi bar boladı. Real gazler ushin universal hal ten'lemesi bolmaydı.*

*Sa'ykes hallar nızamı: eger zattın' eki keltirilgen parametrleri birdey bolsa u'shinshi parametri de birdey boladı.*

*Van-der-Vaals ten'lemesindegi basıng'a du'zetiwi engiziw molekulalar arasındag'ı o'z-ara ta'sirlesiw sol molekulalardıń o'lsheplerinen a'dewir u'lken bolg'an aralıqlarg'a tarqalatuǵ'ınlıǵ'ına sa'ykes keledi. Biraq eksperimentler molekulanın' diametrinen bes ese ko'p qashıqlıqlarda tartılıs ku'shlerinin' derlik sezilmeytuǵ'ınlıǵ'ın ko'rsetedi. Sonlıqtan Van-der-Vaals ten'lemesi real gazdın' qa'siyetlerin tek sapalıq jaqtan ta'ripley aladı.*

### 30-§. Djoul-Tomson effekti

Differentsial Djoul-Tomson effektin esaplaw. İntegrallıq effekt. Van-der-Vaals gazindegi Djoul-Tomson effekti. Gazlerdi suyıltıw.

**Djoul-Tomson effektinin' fizikalıq ma'nisi.** Ken'eygende gaz jumıs isleydi. Gaz izolyatsiyalang'an jag'dayda gazdın' ishki energiyası jumıstın' deregi bolıp tabıladı. Eger ishki energiya bo'lekshelerdin' kinetikalıq energiyasınan turatug'ın bolsa gazdın' temperaturası to'menlewi kerek. Eger gazdın' ken'eyiwinde jumıs islenbese temperatura o'zgermegen bolar edi.

Real gazde ishki energiya o'zine potentsial energiyanı da alatug'ın bolg'anlıqtan jag'day basqasha boladı. Molekulalar barlıq waqıtta da qozg'alısta bolg'anlıqtan bo'leksheler arasındag'ı ortasha qashıqlıq ha'm ortasha potentsial energiya haqqında aytıwg'a boladı. Ortasha qashıqlıq tıǵ'ızlıqqa baylanıslı. Tıǵ'ızlıq qanshama ko'p bolsa ortasha qashıqlıq sonshama az boladı. Ortasha qashıqlıq temperaturag'a da baylanıslı: temperatura qanshama joqarı bolsa ortasha qashıqlıq sonshama kemeyedi. Temperatura joqarılag'anda molekulalardıń kinetikalıq

energiyası o'sedi. Sonliqtan soqlig'isw protsessinde olar bir birine jaqinraq keledi ha'm biraz waqitta bir birine jaqin araliqlarda jaylasadi. Usinday jag'daylar orin alg'anda

jilliliq almasiwsiz real gaz ken'eygende onun' temperaturasinin' o'zgeretug'inlig'ı tu'sinikli boladi.

Eger gazdin' tıg'ızlıg'ı ha'm temperaturası jetkilikli da'rejede u'lken bolsa molekullar arasındag'ı ortasha aralıq  $r_0$  24-paragrafta keltirilgen su'wrettegı  $r_0$  den kishi boladı.

Bul jag'dayda ko'lem kishi shamag'a u'lkeygende, al basım kishi shamag'a kishireygende gazdin' temperaturası o'siwi kerek. Eger berilgen basım menen temperaturada ortasha qashılıq  $r_0$  den u'lken bolsa ko'lemnin' azmaz u'lkeyiwinde ha'm sog'an sa'ykes basım kishi shamag'a kishireygende gazdin' temperaturası to'menleydi.

Real gazdin' ko'lemi menen basımının' usınday adiabatlıq o'zgeriwidegi temperaturanın' o'zgeriwi **Djoul-Tomsonnin' differentsial effekti** dep ataladı. Basımın' u'lken ma'nislerge o'zgergeninde temperaturanın' kishi o'zgerislerin qosıp shıg'ıw kerek. Bul qosındı effekt **Djoul-Tomsonnin' integrallıq effekti** dep ataladı.

**Djoul-Tomsonnin' differentsial effektin esaplaw.**  $V_1$  ha'm  $V_2$  ko'lemleridegi gazlerde usı ko'lemlerdi ayırıp turatug'ın diywal arqalı tuwrıdan-tuwrı jillılıq almasıw bolmasın. Barlıq sistema jillılıq o'tkermeytug'ınday etip izolyatsiya etilgen bolsın. Sonliqtan energiyanın' saqlanıw nızamı tiykarında alamız:

$$\Delta U_1 + p_1 \Delta V_1 = \Delta U_2 + p_2 \Delta V_2. \quad (30-1)$$

(30-1) din' eki ta'repinde turg'an ag'za da qarap atırg'an mug'dardag'ı gazdin' entalpiyası bolıp tabıladı. Sonliqtan (30-1) ten'ligi Djoul-Tomson effektinin' turaqlı entalpiyada ju'retug'inlig'in bildiredi. Bul ten'leme gazdin' bazı bir massası ushın to'mendegidey tu'rge iye:

$$H = U + pV = \text{const}. \quad (30-2)$$

G'a'rezsiz o'zgeriwshiler sıpatında  $T$  menen  $p$  nı qabıl etip (30-2) den alamız:

$$dN = \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_p dT + \left( \frac{\partial H}{\partial p} \right)_T dp = 0. \quad (30-3)$$

Entalpiyanın' differentsialı to'mendegi tu'rge iye boladı:

$$dH = C_p dT + \left[ V + \left( V + \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \right) \right]. \quad (30-4)$$

Bul an'latpanı esapqa alsaq

$$\left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_p = C_p, \quad \left( \frac{\partial H}{\partial p} \right)_T = V - T \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \quad (30-5)$$

ekenligi alamız ha'm sog'an sa'ykes (28-3) ten alamız

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_H = \frac{1}{C_p} \left[ T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p - V \right]. \quad (30-6)$$

Bul formula Djoul-Tomsonnıń differentsial effektin ta'ripleydi.

İdeal gaz ushın  $\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p = \frac{R}{p} = \frac{V}{T}$  ha'm, sog'an sa'ykes,  $\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_H = 0$ , Yag'nıy Djoul-Tomson effekti bolmaydı.

**İntegrallıq effekt.** Djoul-Tomson protsessi kvazistatikalıq Djoul-Tomson efektleri izbe-izligi tu'rinde beriliwi mu'mkin. Ha'r bir kvazistatikalıq effektte basım dr shamasına o'zgeredi. Usınday protsessler izbe-izligi ushın

$$T_2 - T_1 = \int_{p_1}^{p_2} \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_H dp = \int_{p_1}^{p_2} \left[ T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p - V \right] dp. \quad (30-7)$$

(30-7) integral Djoul-Tomson effektinin' formulası bolıp tabıladı.

**Van-der-Vaals gazinegi Djoul-Tomson effekti.** Van-der-Vaals ten'lemesi u'shinshi da'rejeli ten'leme bolg'anlıqtan ulıwma jag'dayda  $\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p$  tuwındısın esaplaw quramalı matematikalıq protsedura bolıp tabıladı. Sonlıqtan (30-6) dag'ı a ha'm b larg'a qarata sızıqlı bolg'an ag'zalardı esapqa alalatug'ın jetkilikli da'rejede siyrekletilgen gazdı qaraw menen sheklenemiz.

Van-der-Vaals ten'lemesinin' viriallıq tu'rin jazamız:

$$V = \frac{RT}{p} + \frac{1}{pV} (RTb - a) = \frac{RT}{p} + \frac{1}{RT} (RTb - a) = \frac{RT}{p} + b - \frac{a}{RT}. \quad (30-8)$$

Bul ten'lemeden

$$\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p = \frac{R}{p} + \frac{a}{RT^2} \quad (30-9)$$

ekenligi kelip shıg'adı. Demek differentsial effekt ushın ten'leme to'mendegidey tu'rge iye boladı:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_H = \frac{1}{C_p} \left[ \frac{TR}{p} + \frac{Ta}{RT^2} - \frac{RT}{p} - b + \frac{a}{RT} \right] = \frac{1}{C_p} \left[ \frac{2a}{RT} - b \right]. \quad (30-10)$$



Bul formuladan jetkilikli to'men temperaturada  $\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_H > 0$ , Yag'nıy gaz ken'eygende salqınlardı. Al jetkilikli joqarı temperaturada  $\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_H < 0$ , Yag'nıy gaz ken'eygende qızadı. Gazdin' usınday qa'siyeti Djoul-Tomson effektinin' fizikalıq ma'nisine tolıq sa'ykes keledi.  $\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_H = 0$  ge sa'ykes keliwshi temperatura (usı temperaturada Djoul-Tomson effektinin' belgisi o'zgeredi) **inversiya temperaturası** dep ataladı:

$$T_{inv} = 2a/(Rb). \quad (30-11)$$

Djoul-Tomsonnin' integral effektin esaplaw ushın entalpiyanın' turaqlılıq sha'rti bolg'an  $H = U + pV = \text{const}$  an'latpasınan paydalanamız. Meyli ıdıtın' o'tkeline o'tpesten burın gaz V ko'lemine, al o'tkennen keyin V' ko'lemine iye bolg'an bolsın. Gazdin' da'slepki tıg'ızlıg'ına shek qoymaymız, al keyingi halda jetkilikli da'rejede siyrekletilgen dep esaplaymız. Bunday jag'dayda entalpiyanın' turaqlılıq sha'rtinen

$$C_V T - a/T + rV = C_V T' + p'V' = C_V T' + RT'. \quad (30-12)$$

SHtrixı bar shamalar keyingi halg'a, al shtrixı joqları da'slepki halg'a tiyisli. Van-der-Vaals ten'lemesinen

$$pV = RTV/(V-b) - a/V = RT + bRT/(V-b) - a/b \quad (30-13)$$

ekenligi kelip shıg'adı. Sonlıqtan (28-12) den alamız:

$$T' - T = \Delta T = \frac{1}{C_p} [(RTb/(V-b) - 2a/V)]. \quad (30-14)$$

$C_p = C_V + R$  ekenligi belgili. Bul formula Djoul-Tomsonnin' integrallıq effektinin' formulası bolıp tabıladı. Effektin' belgisi  $\Delta T = 0$  noqatında o'zgeredi, Yag'nıy

$$(RTb/(V-b) - 2a/V = 0, \quad (30-15)$$

$$T = \frac{2a}{Rb} (1 - b/V).$$

**Gazlerdi suylıtw.** Eger gaz kritikalıq temperaturadan to'men temperaturalarda tursa onı qısıw arqalı suyıq halg'a o'tkeriw mu'mkin. Biraq ko'pshilik gazler ushın kritikalıq temperatura ju'da' to'men. Misallar keltiremiz:

geliy 5.3 K;  
vodorod 33 K;  
azot 126.1 K  
kislород 154.4 K.

Gazlerdi normal atmosferalıq basımlarda alıw ha'm saqlaw texnikalıq jaqtan an'satqa tu'sedi. Bunday jag'daylarda atmosferalıq basımdag'ı suyıq halg'a o'tiw temperaturaları:

geliy 4.4 K;  
 vodorod 20.5 K;  
 azot 77.4 K  
 kislorod 90 K.

Gazdi suyiltıw ushın ko'pshilik jag'daydarda to'mendegi usıldı qollanadı:

Komnata temperaturasında gaz izotermalıq jag'dayda bir neshe ju'zlegen atmosfera basımg'a shekem qısıladı (ag'ıp turg'an suwdı qollanıw jolı menen qısılıp atırg'an gazdin' temperaturası turaqlı etip uslap turıladı). Bunnan keyin adiabatlıq jol menen yamasa Djoul-Tomson protsessinde gaz ken'eytilei. Eki jag'dayda da gaz salqınlaydı. Bunnan keyin bul salqınlatıl'g'an gaz joqarı basımg'a shekem qısılg'an gazdin' ekinshi portsiyasın salqınlatıw ushın qollanıladi. Solay etip gazdin' ekinshi portsiyası ken'eygende birinshi portsiyasına salıstırg'anda a'dewir to'men temperaturag'a iye boladı. Usınday jollar menen gazdin' u'shinshi, to'rtinshi ha'm basqa da portsiyaları za'ru'rli temperaturag'a jetkenshe salqınlatıladi.

Haqıyqıy ha'reket etiwshi mashinalarda salqınlatıl'g'an gazdin' portsiyasının' bir bo'limi qısılıw stadiyasına qaytarıladi. Bunnan keyin Djoul-Tomson protsessinde yamasa adiabatlıq ken'eyiw jolı menen salqınlatıladi. Usı protsessler ju'retug'in du'zilis *jıllılıq almastırıwshı* dep ataladı. Adiabatlıq ken'eyiw saldarman gaz salqınlaytug'in du'zilisti *detander* dep ataydı.

**Zatlardıń 0 K qasındag'ı qa'siyetleri.** Jıllılıq sıyımlıg'ı  $C_V$  on' ma'niske iye funktsiya bolg'anlıqtan ishki energiya  $U$  temperaturanın' monotonlı funktsiyası bolıp tabıladi. Temperaturanın' to'menlewi menen ishki energiya kemeyedi ha'm 0 K de o'zinin' en' minimallıq ma'nisine jetedi. Sonlıqtan **0 K de sistemanın' barlıq bo'limlerinin' ishki energiyası o'zinin' minimum ma'nisine jetedi, Yag'nıy sistemanın' qa'legen bo'limi minimal energiyag'a iye tiykarg'ı halında turadı.**

$\delta Q = TdS$  an'latpasınan temperatura to'menlegende entropiyanın' kemeyetug'inlig'ı kelip shıg'adı. O'zinin' kemeyiw barısında entropiya belgili bir ma'niske umtılama degen soraw tuwıladı. Bul sorawg'a *Nerns printsipi* juwap beredi. Bul printsip termodinamikanın' birinshi ha'm ekinshi baslamalarınan keltirilip shıg'arılıwı mu'mkin bolmag'anlıqtan *termodinamikanın' u'shinshi baslaması* dep te ataladı. Entropiya 0 K temperaturag'a jaqınlasqanda entropiya anıq bir shekke umtılatug'in bolg'anlıqtan bul printsip 0 K de sistemanın' bir ten' salmaqlıq haldan ekinshi o'tiwi entropiyanın' o'zgerisisiz a'melge asadı dep tastıyıqlaydı. Bul tastıyıqlawdan

Entropiya 0 K temperaturada sistemanı ta'ripleytug'in parametrlerdin' ma'nislerine g'a'rezli emes.

dep juwmaq shıg'aramız.

Entropiyanın' 0 K temperaturadag'ı ma'nisi anıqlanbag'an. Sonlıqtan bul ma'nisti 0 ge ten' dep qabıl etiw qolaylı boladı.

Usınday etip anıqlang'an entropiya *absolyut entropiya* dep ataladı. Onın' sistemanın' qa'legen halındag'ı ma'nisi

$$S = \int_{T=0}^T \frac{\delta Q}{T}$$

integralın esaplaw arqalı anıqlanadı.

Nernst printsipinen bir qatar a'hmiyetli juwmaqlar shıg'arılıwı mu'mkin. En' da'slep bul printsipten

*0 K temperaturag'a shekli sandag'ı operatsiyalar ja'rdeminde jetiw mu'mkin emes*

ekenligi kelip shıg'adı.

*Real (haqıyqıy) gazde tartılıs ku'shleri menen iyterilis ku'shleri arasında turaqlı qarsı turıw orn aladı. Eger basım bazı bir shamag'a o'zgergende molekulalar arasındag'ı o'z-ara ta'sirlesiw energiyası kemeyetug'ın bolsa gaz qızadı, al sol energiya u'lkeygen jag'dayda gaz salqınlaydı. Bul Djoul-Tomson effektinin' belgisin anıqlaydı. Effekt basımın' ha'r qıylı ma'nislerinde ha'r qıylı belgilerge iye bolıwı mu'mkin.*

*0 K ge jaqınlag'anda sistemanın' barlıq bo'limlerinin' ishki energiyası o'zinin' en' kishi ma'nisine, entropiya - anıq ma'niske iye bolg'an shekke umtıladı. Sistemanı bir ten'salmaqlıq haldan ekinshi ten'salmaqlıq halg'a o'tkizetug'ın protsessler 0 K de entropiyanın' o'zgeriwisiz a'melge asadı.*

*0 K temperaturag'a shekli sanlag'ı operatsiyalar ja'rdeminde jetiw mu'mkin emes (termodinamikanın' u'shinshi baslaması).*

*Djoul-Tomsonnıń differentsial effektinin' belgisi ha'r qıylı basımlarda ha'm temperaturalarda ha'r qıylı boladı. Djoul-Tomsonnıń integrallıq effektinin' belgisi de arametrlerdin' o'zgeriw aymag'ında ha'r qıylı bolıwı mu'mkin.*

## 31-§. Bet kerimi

Erkin betlik energiya. Bet kerimi. Bet keriminin' payda bolıw mexanizmleri. Bet keriminin' a'piwayı ko'rınisleri. Eki suyıqlıq arasındag'ı ayırılıp turıw shegarasındag'ı ten' salmaqlıq sha'rti. Suyıqlıq-qattı dene shegarasındag'ı ten' salmaqlıq sha'rti. İymeygen bet astındag'ı basım. Kapıllıy qubılıslar.

**Erkin betlik energiya.** Suyıq hal molekulalar arasındag'ı o'z-ara tartısıwg'a sa'ykes keliwshi potentsial energiyanın' absolyut ma'nisi kinetikalıq energiyadan ko'p bolg'an jag'dayda payda boladı. Suyıqlıqtag'ı molekulalar arasındag'ı tartılıs ku'shleri molekulanı suyıqlıq iyelep turg'an ko'lemde uslap turıwdı ta'miyinleydi. Solay etip suyıqlıqta onın' ko'lemin sheklep turatug'ın bet payda boladı. Berilgen ko'lemde sheklep turatug'ın bet formag'a baylanıslı boladı. Geometriyadan berilgen ko'lemde sheklep turatug'ın en' minimal betke shar iye ekenligi ma'lim.

*Eger bettin' payda bolıwı izotermalıq jol menen a'melge asırılsa, teris belgisi menen alıng'an potentsial betlik energiya usı betti payda etiw ushin jumsalg'an energiyag'a ten' boladı.*

Ekinshi ta'repten izotermalıq protseslerde potentsial energiyanın' tutqan ornın erkin energiya F iyeleydi. Demek

$$dF = -dA. \quad (31-1)$$

Bul ten'liktegi dA arqalı dF energiyasının' payda bolıwına baylanıslı bolg'an jumstın' ma'nisi belgilengen.

Bettin' bir tekililiginen erkin betlik energiyanın' bettin' maydanına proporsional ekenligi kelip shıg'adı:

$$F = \sigma S. \quad (31-2)$$

Bul formuladag'ı  $\sigma$  betlik erkin energiyanın' salıstırmalı tıg'ızlıg'ı.

**Bet kerimi.** Mexanikadag'ı jag'daydag'ıday sistema en' kem potentsial energiyag'a jetiwge umtıladı. Usınday hal en' ornıqlı hal bolıp tabıladı. Termodinamikada sistema izotermalıq sharayatlarda en' az erkin energiyası bar halg'a jetiwge umtıladı. Sonlıqtan

*suyıqlıqtın' beti qısqarıwg'a umtıladı. Usıg'an baylanıslı suyıqlıqlın' beti boyınsha bet kerimi dep atalıtug'ın ku'shler ta'sir etedi.*

Bul jerde suyıqlıq bet tegisliginde barlıq bag'ıtlar boyınsha izotroplı kerilgen juqa rezina plenka sıpatında qabıl etiledi.

Bet keriminin' bar ekenligi sabın ko'bikleri ja'rdeminde anıq ko'rinedi. Eger su'wrettegi MN jin'ishke sımı su'ykelissiz qozg'alatug'ın bolsa, onda bet kerim ku'shleri bul sımdı MM' ha'm NN' bag'ıtında tartadı ha'm plenka maydanı kemeyedi. Plenkanın' maydanın u'lkeytiw ushin smg'a f ku'shin tu'siriw kerek. Sım on' ta'repke qaray dx aralıg'ına qozg'alg'anda dA = f dx jumısı islenedi. Al sabın plenkasının' maydanı dS = Q dx shamasına u'lkeyedi. Sonlıqtan

$$dF = 2\sigma dS = -f dx = f dS/l. \quad (31-3)$$

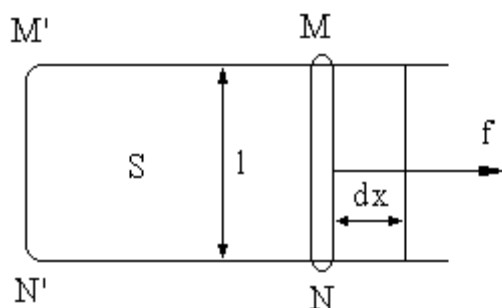
Bul formuladag'ı 2 plenkanın' eki betinin' bar bolg'anlıg'ınan kelip shıqqan;  $f/(2l) = MN$  uzınlıg'ının' bir birligine eki bet ta'repinen ta'sir etetug'ın ku'sh. San shaması boyınsha bul ku'sh betlik erkin energiyanın' tıg'ızlıg'ına ten'. O'lishem birliğı  $1 \text{ Dj/m}^2 = 1 \text{ N/m}$ . Sonlıqtan  $\sigma$  **betlik kerim** dep ataladı. Ha'r qanday suyıqlıqlar ushin  $10^{-2}$  den  $10^{-1} \text{ N/M}$  ge shekemgi ha'r qanday ma'nislerge iye boladı. Mısalı

efirde  $1.71 \cdot 10^{-2}$ ;  
atsetonda  $2.33 \cdot 10^{-2}$ ;  
benzolda  $2.89 \cdot 10^{-2}$ ;  
glitserinde  $6.57 \cdot 10^{-2}$ ;  
suwda  $7.27 \cdot 10^{-2}$ ;  
sınapta 0.465.

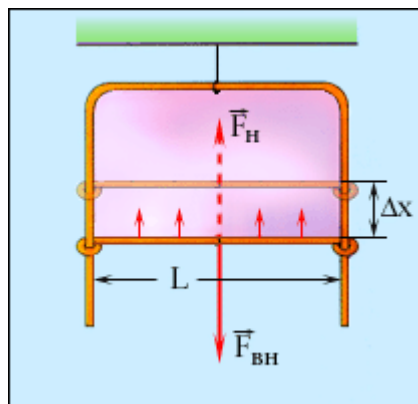
Bul jerde o'lishem birlik N/m lerde berilgen.

**Bet keriminin' payda bolıw mexanizmleri.**  $\sigma$  menen ta'riplenetug'ın erkin energiyanıq salıstırmalı tıg'ızlıg'ı suyıqlıqtın' u'lken emes betlik qatlamında lokallasqan ha'm, sonlıqtan, juqa betlik qatlamda ta'sir etedi. Sonlıqtan da juqa betlik qatlam suyıqlıqtı qorshap turatug'ın rezina plenkada bolıp xızmet etedi. Rezina qabıqtan parqı, suyıqlıq bettin' formasının' o'zgeriwine g'a'rezsiz barlıq waqıtta da birdey bet kerimine iye.

Bet kerimi suyıqlıqtın' beti tiyip turg'an zattın' qa'siyetlerine baylanıslı. Bul a'sirese  $\sigma$  nı erkin energiya tıg'ızlıg'ı dep interpretatsiyalawda anıq ko'rinedi. Sebebi suyıqlıq tiyip turg'an zattın' molekulları da usı suyıqlıqtın' betlik qatlamındag'ı molekulları menen ta'sir etisedi ha'm molekullardı suyıqlıqtın' ishine tartıwshı ku'shlerdi o'zgertedi. Bul bet kerimi  $\sigma$  nın' o'zgeretug'inlig'in an'latadı. Sonlıqtan bet kerimi haqqında ga'p etilgende tek suyıqlıqtın' o'zi emes, al usı suyıqlıq tiyisip turg'an zat ta esapqa alınıwı kerek. Yag'nıy  $\sigma$  bir birine tiyisip turg'an eki ortalıqqa tiyisli eki indeks penen ta'miyinlengen bolıwı kerek, mısalı  $\sigma_{12}$ ,  $\sigma_{23}$  h.t.b. Eki suyıqlıqtı bo'lip turg'an bettegi bet kerimi erkin bet kerimine salıstırg'anda kem bolıwı kerekligi tu'sinikli. Mısalı suw menen efirdi bo'lip turg'an bettin' kerimi 0.0122 N/m, al suw-benzol jag'dayında 0.0336 N/m.



2-32 su'wret. Bet kerimin esaplaw ushın sabın plenkasın paydalanıw.



Simnan sog'ılg'an ramkanın' qozg'alıwshı bo'liminin' sırtqı  $F_{BH}$  ha'm bet kerimi ku'shleri  $F_H$  ten'lesken momentindegi awhalı.

Qattı dene menen suyıqlıqtı ayırıp turatug'ın bette de bet kerimi kemeyedi. Mısalı o'jire temperaturalarında sınapın' erkin betindegi  $\sigma = 0.465$  N/m, al suw menen tiyisiw betinde 0.427 N/m, spirt penen 0.399 N/m.

**Suyıqlıq-qattı dene shegarasındag'ı ten' salmaqlıq sha'rti.** Eger suyıqlıq ıdısqa quyılğ'an bolsa, onda suyıqlıqtın' ıdıstın' vertikal diywalı menen tiyisiwi eki tu'rli boladı. Eger suyıqlıq diywalg'a jug'atug'ın bolsa a) su'wrettegi awhal ju'zege keledi. Juqpaytug'ın jag'dayda b) awhal orın aladı. Tap sol sıyaqlı suyıqlıqta ju'zetug'ın deneler jag'dayında da eki awhal baqlanadı. Eger suyıqlıq deneg'e jug'atug'ın bolsa v) su'wrette ko'rsetilgen awhal baqlanıp suyıqlıqtın' ko'teriw ku'shi kemeyedi. Al juqpaytug'ın suyıqlıq jag'dayında (g-su'wret) ko'teriw ku'shi artadı. Usınday qubılıstın' saldarınan, mısalı, geypara nasekomalar suwdın' bet keriminen suw betinde juwırıp ju're aladı.

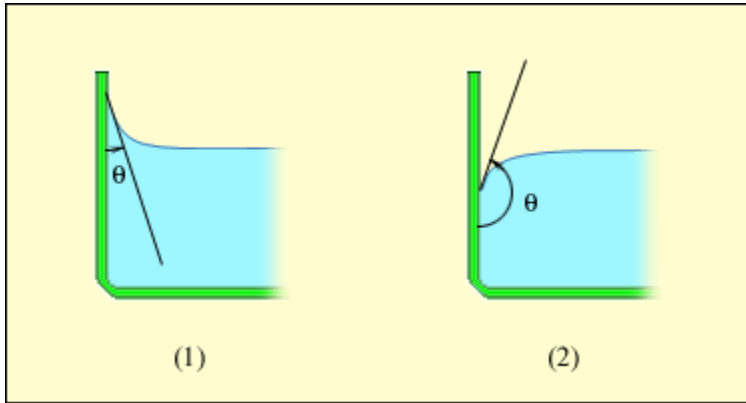
**Mayısqa bet astındag'ı basım.** Bunday basımdı esaplaw ushın sabın qo'bigin qaraymız. Atmosferalıq basımdı ko'bik ishindegi r' basımı ha'm suyıqlıqtın' bet kerimi ten'estirip turadı. Ko'biktin' ishindegi basım ko'beygende, onın' radiusı  $dr$  shamasına artadı ha'm  $4\pi r^2 r' dr$  jumısı islenedi. Bul jumısı ko'bik betinin'  $\sigma dS$  erkin energiyasına aylanadı,  $dS$  sabın ko'biginin' ishki

ha'm sırtqı betlerinin' o'simlerinin' qosındısı. Yag'nıy  $dS = 2d(4\pi r^2) = 298\pi r dr$ . Energiyanın' saqlanıw nızamı boyınsha

$$4\pi r^2 P' dr = 298\pi r dr. \quad (31-4)$$

Bunnan

$$p' = 292\sigma/r. \quad (31-5)$$



2-33 su'wret. Jug'atug'ın (1) ha'm juqpaytug'ın (2) suyuqlıqlar jag'dayındag'ı suyuqlıq penen ıdıs diywalı arasındag'ı ko'rınisler.

Bul basım sabın ko'biginin' iymeygen eki beti ta'repinen payda etiledi. Bir bet eki ese kem basım payda etedi:

$$p = p'/2 = 2\sigma/r. \quad (31-5a)$$

Ulıwma jag'dayda iymeklik eki iymeklik radiusı ja'rdeminde anıqlanadı. Sonlıqtan

$$p = \sigma \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (31-6)$$

Bul formula **Laplas formulası** dep ataladı.  $r_1 = r_2$  bolg'anda bul formula (31-5) ke o'tedi.

**Kapillyar qubılıslar.** ııdıtın' diywalı menen ta'sir etiskende bet kerimi suyuqlıqtın' qa'ddin ko'teriwge (a su'wret) yamasa to'menleetiwge umtıladı (b su'wret).

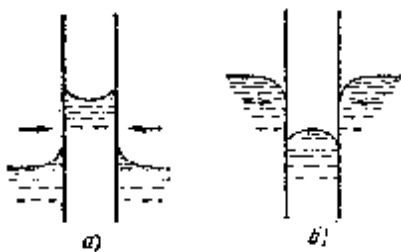
Eger ıdıtın' diywalına suyuqlıq jug'atug'ın bolsa suyuqlıq ko'teriledi. Juqpaytug'ın jag'dayda suyuqlıqtın' qa'ddi to'men tu'sedi. (31-5) formulag'a sa'ykes

$$\rho gh = 2\sigma/R = 2\sigma \cos\theta/r. \quad (31-7)$$

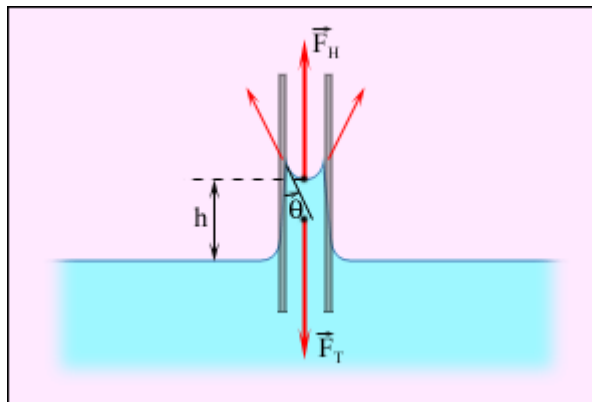
Bul formulada  $\rho$  - suyuqlıqtın' tıg'ızlıg'ı,  $R$  - suyuqlıq betinin' iymeklik radiusı,  $r$  - trubkanın' radiusı ( $r = R \cos\theta$ ). Demek

$$h = 2\sigma \cos\theta/(\rho g r). \quad (31-8)$$

Usınday jollar menen suyuqlıqtın' qa'ddi to'tmenlegen jag'daydag'ı teren'lik te esaplanadı. (31-8)-formuladan biyikliktin' naydın' radiusına kerı proportsional ekenligi ko'rinip tur. Kapillyar nay dep atalatug'ın jin'ishke naylarda jug'atug'ın jag'dayda suyuqlıq u'lken biyikliklerge ko'teriledi. Sonlıqtan da qarap atırğ'an jag'daydag'ı bet kerimi kapillyar bet kerimi dep ataladı.



2-34 su'wret. Kapillyarlıq qubılıslar.



Jug'atug'in suyuqlıqtın' kapillyar tu'tikshede ko'teriliwin esaplaw ushin arnalg'an su'wret.

### 32-§. Suyıqlıqlardıń puwlanıwı ha'm qaynawı

Dinamikalıq ten' salmaqlıq. Puw-suyıqlıq sisteması. Suyıqlıqtın' iymeygen beti qasındag'ı toying'an puw basımı. Qaynaw. Asa qızdırılǵ'an suyuqlıq. Ko'bik kameralar. Asa suwıtılǵ'an puw. Vilson kamerası.

**Puwlanıw.** Joqarıda ayılǵ'anınday molekulalardıń bir biri menen ta'sirlesiwiniń sebebinen suyuqlıqtın' betinde bettin' payda bolatug'ınlıǵ'ı talqılandı. Bul bet molekulalardıń suyuqlıqtı taslap ketiwine jol qoymaydı. Biraq jıllılıq qozǵ'alıslarınıń saldarıman molekulalardıń ayırım bo'legi suyuqlıqtı taslap ketkendey jetkilikli tezlikke iye boladı. Bul qubılıs **puwlanıw** dep ataladı. Puwlanıw qa'legen temperaturada baqlanadı, biraq onıń intensivlılıǵı temperaturanıń ko'teriliwi menen joqarılaydı.

**Dinamikalıq ten' salmaqlıq. Puw-suyıqlıq sisteması.** Eger suyuqlıqtı taslap ketken molekulalar suyuqlıqtan u'ken aralıqlarg'a qashıqlassa, aqır-ayag'ında barlıq suyuqlıq puwlanıp ketedi. Eger sol molekulalar u'ken qashıqlıqlarg'a ketpese. Al bir ıdıstın' ishinde saqlanatug'ın bolsa, protsess basqasha rawajlanadı. Suyıqlıqtı taslap ketken molekulalar puwdı payda etedi. Puw molekulaları suyuqlıqqa jaqınlag'anda tartısıw ku'shleri ta'sirinde suyuqlıqqa qosılıp puwlanıw kemeyedi.

**Puwdın' tıǵ'ızlıǵ'ı artqanda belgili bir waqıt ishinde suyuqlıqtı taslap ketken molekulalar sanı sonday waqıt ishinde suyuqlıqqa qayıtıp kelgen molekulalar sanına ten' boladı. Bunday haldı dinamikalıq ten' salmaqlıq hal dep ataladı. Dinamikalıq ten' salmaqlıq haldag'ı puwdı toying'an puw dep ataymız.**

Puw gaz emes. Gaz bul berilgen temperatura menen basımdıǵ'ı zattın' agregat halı. Puw zattın' agregat halı bolıp tabılamaydı. Sebebi berilgen temperatura menen basımdı agregat hal suyuqlıq bolıp tabıladı. Usıǵ'an baylanıslı puwdın' qa'siyetleri gazdın' qa'siyetlerinen ayırıladı. Mısalı ideal gazlerde basım ko'lemge da'l keri proporsional. Usınday g'a'rezlilik real gazlerde de jetkilikli da'llikte orınlanadı. Toyınıwǵ'a jaqınlasqan puwda bolsa (a'sirese toying'an puwda) basım ko'lemge sezilerliktey baylanıslı emes, al toying'an puwda bolsa basım ko'lemge baylanıslı emes. Turpayı juwıqlawda gaz nızamların toyınbag'an puwg'a qollanıwǵ'a boladı.

**Qaynaw.** Suyıqlıqtı qızdırg'anda toying'an puwdın' basımı sırtqı basımg'a ten' bolg'anda suyıqlıq penen toying'an puw arasında ten' salmaqlıq orıaydı. Suyıqlıqqa qosımsha jıllılıq berilse sa'ykes massag'a iye bolg'an suyıqlıqtın' puwg'a aylanıwı orın aladı. Usınday jag'dayda suyıqlıqtın' intensivli tu'rde puwg'a aylanıwı suyıqlıqtın' barlıq ko'lemi boyınsha a'melge asadı. Bul protsess qaynaw dep ataladı.

Toying'an puwdın' basımı sırtqı basımg'a ten' bolg'an temperatura qaynaw temperaturası dep ataladı. Basım u'lkeyse qaynaw temperaturası ko'teriledi, basım kemeyses qaynaw temperaturası to'menleydi.

**Asa qızdırılǵ'an suyıqlıq.** Endi asa qızdırılǵ'an suyıqlıqtın' payda bolıwın tu'sindiriwge boladı. Eger suyıqlıqtın' quramında basqa qosımtalar ha'm ko'biksheler bolmasa, qaynaw temperaturasına jetkende suyıqlıqta ko'biksheler payda bolıwǵ'a umtılw orın aladı.

Usınday ko'bikshe suyıqlıqtın' ishinde payda bolg'anlıqtan ha'm ko'bikshe ishindegi puw suyıqlıqtın' tegis betine salıstırg'anda (tegis beti ushın) toying'an bolsa da suyıqlıqtın' iymeygen betine salıstırg'anda toying'an bolmay qaladı. Sonlıqtan ko'bikshe tez arada suyıqlıqqa kondensatsiyalanadı ha'm ko'bikshe jog'aladı.

**Ko'biksheli kameralar.** Eger asa qızdırılǵ'an suyıqlıq arqalı zaryadlang'an bo'lekshe ushıp o'tetug'in bolsa, bul bo'lekshe o'z jolında suyıqlıq molekuların yamasa atomların ionlastıradı. Na'tiyjede ushıwshı bo'lekshe molekula yamasa atomg'a o'z energiyasınıń bir bo'legin beredi ha'm aqıbetinde suyıqlıqtın' qaynawın, Yag'nıy ko'bikshelerdin' payda bolıwın boldıradı. Basqa so'z benen aytqanda asa qızdırılǵ'an suyıqlıq zaryadlı bo'lekshenin' traektoriyası boyınsha qaynaydı ha'm ko'bikshelerden turatug'in iz payda boladı. Sonlıqtan biz sol traektoriyanı anıq ko'riwimiz ha'm su'wretke alıwımız mu'mkin.

Bul foto su'wretler zaryadlang'an bo'lekshelerdin' qozg'alısın, basqa da bo'leksheler menen ta'sir etisiwın u'yreniw ushın u'lken a'hmiyetke iye. Eksperimentallıq izertlewlerde suyıqlıq retinde a'dette suyıq vodorod qollanıladı. Bunday usıl elementar bo'lekshelerdi izertlegende ken'nen qollanıladı.

**Asa suwıtılǵ'an puw.** Bazı bir temperaturada toying'an puw to'menirek temperaturada asa toying'an puw bolıp tabıladı. Sonlıqtan temperatura to'menlegende toying'an puwdın' bir bo'legi suyıqlıqqa aylanadı. Bul qubılıs *kondensatsiya* dep ataladı. A'dettegidey jag'daylarda suw puwları puwdın' barlıq ko'lemi boyınsha mayda tamshılar - duman tu'rinde kondensatsiya baslanadı. Biraq usı puw jaylasqan hawa ha'r qanday qosımtalardan jetkilikli da'rejede tazalang'an bolsa puw suyıqlıqqa aylanbaydı. Usının' menen birge asa suwıtılǵ'an puw dep atalıwshı metastabil hal ju'zege keledi.

Toying'an puw salqınlatılǵ'anda suyıqlıqtın' mayda tamshıları payda boladı. Biraq bul tamshılar ko'p waqıt jasay almaydı. Sebebi sol tamshılar payda bolg'an toying'an puw o'z gezeginde tamshının' iymeygen beti ushın toynıbag'an puw bolıp tabıladı. Sonlıqtan tamshılar suyıqlıqları tez arada puwlanadı ha'm tamshılar jog'aladı.

**Vilson kamerası.** Asa salqınlatılǵ'an puwda ushıp baratırg'an zaryadlang'an bo'lekshe o'zinin' jolında puw molekuların ionlastıradı. O'z gezeginde ionlar kondensatsiya orayları bolıp tabıladı ha'm na'tiyjede suyıqlıq tamshıları payda boladı. Usının' na'tiyjesinde traektoriya



boylap duman payda boladı ha'm traektoriya ko'rinetug'ın boladı. Bul zaryadlang'an bo'lekshelerdi, usı bo'lekshelerdin' basqa bo'leksheler menen ta'sirlesiwın izertlewge mu'mkinshilik beredi. Usınday printsipte isleytug'ın a'sbap **Vilson kamerası** dep ataladı. Vilson kamerası elementar bo'lekshelerdi izertlewde u'iken ornı iyeledi.

Nelikten ionlar kondensatsiya zarodishları bolıp tabıladı? Bul kondensatsiya energiyası, bet energiyası ha'm kulon energiyası balansının' saldarı bolıp tabıladı.

### 33-§. Osmoslıq basım

Osmoslıq basımınnı' (diffuziyalıq basımınnı') payda bolıwı. Osmoslıq basım nızamları.

Osmoslıq basım eritpelerde ornı aladı. Sontıqtan bul paragrafta ga'p etiletug'ın ma'seleler eritpeler fizikasına tiyisli ma'seleler bolıp tabıladı.

**Eritpe dep eki yamasa bir neshe zatlardın' fizikalıq jaqtan bir tekli (Yag'ny gomogen) aralaspasına aytadı.**

Fizikalıq bir teklik (gomogenlik) molekullardın' ten'dey aralasıwı menen a'melge asırıladı. Usınday qa'sietleri boyınsha eritpeler mexanikalıq aralaspalardan ayrıladı. Mexanikalıq aralaspada zattın' makroskopiyalıq bo'leksheleri (molekulları emes) aralasqan. Eger eritpede bir zattın' mug'darı ekinshi zattın' mug'darınan ko'p bolsa, ko'p bolg'an zat **eritiwshi (eritkish)**, al basqası **erigen zat** dep ataladı.

Eriytug'ın zattın' eritkishte eriw protsessi a'dette **jıllılıqtın' bo'linip shıg'arılıwı** yamasa **jıllılıqtın' jutılıwı** menen a'melge asadı. Eger eriw protsessinde jıllılıq bo'linip shıqsa jıllılıq effekti on' ma'niske iye, al jıllılıq jutılsa jıllılıq effekti teris dep esaplanadı.

**Eriw jıllılıg'ı dep eritkishte eriwshi zattın' 1 moli erigende bo'linip shıg'atug'ın jıllılıqqa aytamız.**

To'mende bazı bir zatlar ushın eriw jıllılıg'ının' ma'nisleri keltirilgen:

nashatır ( $\text{NN}_4\text{S1}_2$ , qattısı)	- 16.5 kDj/mol;
kaliy gidrookisi (KON, qattısı)	+ 54.2 kDj/mol;
ku'kirt kislotası ( $\text{N}_2\text{SO}_4$ , suyıq)	+ 74.5 kDj/mol.

Ulıwma jag'dayda qattı zatlar suyıqlıqlarda erip bir tekli ortalıq payda etetug'ınıg'ı ma'lim. Biraq eritpe bir biri menen reaksiyag'a kirispeytug'ın gazlerdin' a'piwayı aralaspası emes. 1865-1887 jılları ju'rgizilgen ta'jiriybelerinde D.İ.Mendeleev eritpenin' ko'leminin' eritkish penen erigen zattın' ko'lemine ten' bolmaytug'ınıg'ın baqladı. Eriw protsessi jıllılıqtın' jutılıwı yamasa temperaturanın' joqarılawı menen a'melge asadı. Mendeleev eritkish penen erigen zattın' belgili bir salmaq qatnaslarına sa'ykes keletug'ın ayrıqsha noqatlardın' bar bolatug'ınıg'ın anıqladı. Usılardın' barlıg'ı da eritkish penen erigen zat molekullarının' arasında o'z-ara ta'sirlesiwın bar ekenligin, bul ta'sirlesiwge belgili bir energiyanın' sa'ykes keletug'ınıg'ın ja'ne eritpenin' ximiyalıq qospalarg'a jaqın ekenligin ko'rsetedi. Bunday effektlerdin' ha'lsiz eritpelerde (erigen zatlardın' kontsentratsiyası az bolg'an jag'day) tutqan ornının' na'zerge almas da'rejede ekenligi ta'biyiy na'rse. Bunnan bılay biz erigen zattın' bir molekulasının' eritkishtin' ko'p sanlı molekullarına sa'ykes keletug'ın asa ha'lsiz eritpelerdi

qarastiramiz. Bunday jag'dayda erigen zat molekulaları arasındag'ı ta'sirlesiw ha'lsiz boladı ha'm bunday ko'z-qarasta gaz molekulalarına usaydı. Biraq usının' menen birge erigen zat molekulaları menen eritkish molekulaları arasında u'zliksiz soqlıg'ısıw orın alatug'ın bolg'anlıqtan erigen zat molekulaları qıyınshılıq penen qozg'aladı ha'm usı arqalı gaz molekulalarınan parqlanadı.

**Osmoslıq basımın' payda bolıw mexanizmi.** Meyli bazı bir zattın' eritpesi ha'm taza eritkish yarım o'tkiziwshi diywal menen ajratılğ'an bolsın. Diywal erigen zattın' molekulaların o'tkermeytug'ın, tek g'ana eritkishtin' o'zin qana o'tkeretug'ın bolsın. Bunday o'tkel ko'binese o'simliklerden yamasa haywanlardan alınadı. Fizikalıq ta'jiriybeler ushın jasalma tu'rde alıng'an yarım o'tkizgish diywal qollang'an qolaylı. Bunday plenkalar qatarına  $[Cu_2Fe(CN)_6]$  birikpesi kiredi ha'm olar suw molekulaların o'tkeredi, al ko'plegen eritilgen zatlardı (mısalı qanttı) o'tkermeydi.

Eritpe taza eritkishten joqarıda aytlıg'anday yarım o'tkizgish diywal arqalı ajratılğ'an bolsa, bul diywal arqalı eritkish molekulaları eritpe turg'an ta'repke o'te baslaydı. **Bul qubılıstı osmos dep ataymız.** Jetkilikli waqt o'tkennen keyin ten' salmaqlıq hal ornaydı ha'm eritkish molekulaları o'z-ara o'tkel araqalı erkin ta'sir etisedi. Ten' salmaqlıq halda o'tkelge eki ta'repten eritkish ta'repinen tu'siriletug'ın basım birdey bolıwı kerek. tu'siriledi. Demek o'tkeldin' bir ta'repinen tu'setug'ın basım ekinshi ta'repten tu'setug'ın basımg'a ten' bolmay shıg'adı. Na'tiyjede taza eritkishtin' qa'ddi eritpenin' qa'ddinen to'men boladı. Eger da'slep eki ta'reptegi suyıqlıqtın' qa'ddi ten'dey bolg'an bolsa, eritkishtin' eritpe ta'repine o'tiwinin' saldarınan eritpenin' qa'ddi ko'teriledi. Yarım o'tkizgish o'tkel arqalı eritkishtin' o'tiwi osmos dep ataladı.

**Taza yarım o'tkizgish diywal menen ayrılıp qoyılğ'an eritkish ha'm eritpe arasındag'ı payda bolg'an basımlar ayırması osmoslıq basım dep ataladı.**

**Osmoslıq basım nızamları.** Suyıq eritpelerdeki erigen zattın' molekulaların siyrekletilgen gaz molekulaları sıpatında qarawg'a boladı. Olardın' kinetikalıq energiyası tek temperaturag'a g'a'rezli boladı. Osmoslıq basım r siyrekletilgen gazdın' basımına ten' ha'm ideal gazler ushın to'mendegidey formula ja'rdeminde esaplanadı:

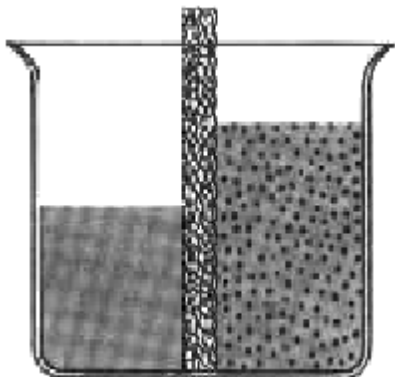
$$p = \frac{nkT}{V} = \frac{vRT}{V}. \quad (33-1)$$

V ko'lemindegi erigen zat molekulaların' sanı n arqalı belgilengen. v - molekulalardıñ moller sanı. (33-1) Vant-Goff nızamın an'g'artadı.

Ha'lsiz eritpenin' osmoslıq basımı eritkish penen erigen zattın' ta'biyatına g'a'rezli emes, al tek g'ana erigen zattın' mollik konsentratsiyasına baylanıslı.

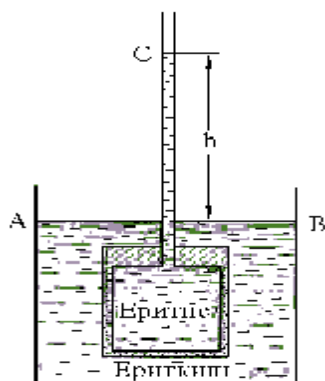
Vant-Goff formulasınan to'mendegidey juwmaqlar kelip shıg'adı:

1. Turaqlı temperaturada erigen ha'r bir zattın' osmoslıq basımı p sol zattın' konsentratsiyası C g'a tuwrı proporsional;



2-35 su'wret.

2. Konsentratsiya turaqli bolg'anda erigen ha'r bir zattin' osmosliq basimi r eritpenin' absolyut temperaturasi  $T$  g'a tuwri proporsional;
3. Birdey konsentratsiyalarda ha'm birdey temperaturalarda erigen ha'r tu'rli zatlardin' osmosliq basimlari r olardin' molekuliq samaqlarina keri proporsional.



2-36 su'wret. Osmosliq basimdı o'lsheytug'in osmometr dep atalatur'ın a'sbaptin' su'wreti. AV ha'm C sıziğı arasındag'ı sıyılıq bag'anasının' salmag'ı osmosliq basımın' o'lsheimi sıpatında xızmet etedi:  $P_{\text{osm}} = \rho gh$ . Bul jerde  $\rho$  - eritpenin' tıg'ızlıg'ı,  $h$  eritpe bag'anasının' biyikligi.

Van-Goff nızamı ten'lemesinin' ideal gaz halı ten'lemesine uqaslıg'ı eritilgen zattın' molekularının' sol molekularıdın' konsentratsiyası joqarı bolmag'anda ideal gaz molekularınday qa'siyetke iye bolatur'ınlg'ın ko'rsetedi. Sonlıqtan Vag-Goff nızamın bilayınsha aytamiz:

***Eritpedegi eritilgen zat usı zat gaz ta'rizli halda eritpe iyelegen ko'lemde ha'm temperaturada jaylasqan jag'dayda payda etiwı kerek basımg'a ten' basım payda etedi.***

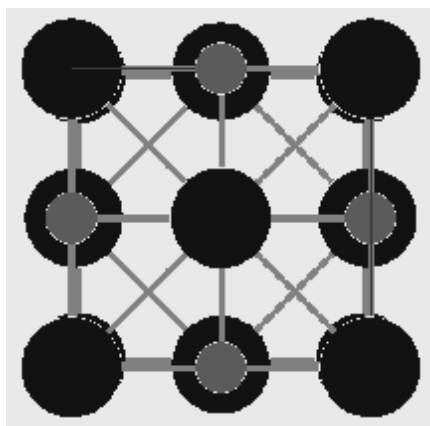
Ha'lsiz eritpelerdin' ko'pshiliginde (33-1)-formula da'l na'tiyjeler beredi. Biraq bir qatar etitpelerde (mısalı organikalıq emes duzlardın' eritpelerinde) basım (33-1) degiden a'dewir artıq bolıp shıg'adı. Sebebi bunday duzlar erigende molekuları bir neshe bo'lekshelerge (ionlarg'a) ıdıraydı. Bunday qubılıs dissotsiatsiyalanıw dep ataladı. Na'tiyjede eritpenin' ko'lem birligindegi molekularıdın' konsentratsiyası n artadı ha'm sog'an sa'ykes osmosliq basım artadı.

(33-1)-formulag'a bag'ınatur'ın eritpeler elektr tog'ın o'tkizbeydi, al osmosliq basımı bul formuladag'ıg'a qarag'anda u'lken bolatur'ın eritpeler elektr tog'ın jaqsı o'tkizedi. Bunday eritpeler a'dette elektrolitler dep ataladı.

### 34-§. Qattı deneler simmetriyası

Simmetriyanın' anıqlaması. Simmetriya ko'sherleri. Simmetriya tegislikleri. Simmetriya orayı. Simmetriyanın' noqatlıq toparları. Translyatsiyalıq simmetriya. Ashıq ha'm jabıq simmetriya elementleri. A'piwayı pa'njere. Pa'njere simmetriyası elementleri. Ken'isliktegi simmetriya toparları. Kristallıq klasslar menen krislallografiyalıq koordinatar sistemasi.

Bul paragrafta biz tiykarınan kristallıq qattı denelerdi qaraymız. Kristallarda atomlar yamasa molekulalar bir birine salıstırg'anda belgili bir ta'rtipte jaylasadı. Mısal retinde NaCl kristalındag'ı  $\text{Na}^+$  yamasa  $\text{Cl}^-$  ionların' jaylasıwları su'wrette ko'rsetilgen (su'wretin' a'piwayılıg'ı ushın bir sorttag'ı ionlardın' su'wretleri salıng'an). Atomlar yamasa molekulalar kristalda tıg'ız bolıp jaylasıwg'a umtıladı. Eger kristaldag'ı birdey awhallarda turg'an atomlardı (biz qarap atırg'an jag'daydarda ionlardı) yamasa molekulalardı bir biri menen tutastırıp shıqsaq kristallıq pa'njere su'wretin alamız. Bunday jag'dayda atom yamasa molekula pa'njerenin' tu'yini menen almastırıladı. Sonlıqtan da kristallıq pa'njere dep kristall ushın keyinirek ga'p etiletug'ın belgili qag'ıydalar tiykarında du'zilgen matematikalıq obrazdı aytamız.



2-37 su'wret.

NaCl tipindegi kristallardag'ı ionlardın' jaylasıwı

Joqarıdag'ı su'wrette tek bir sorttag'ı ionlar ushın du'zilgen qurılıs sa'wlelendirilgen. Bul qurılıs tiykarında to'belerinde ha'm qaptal betleri ortalarında ionlar jaylasqan kub turadı. A'dette bul kubtı kristallıq pa'njerenin' elementar qutishası, al qarap atırg'an jag'daydag'ı qurılıstı qaptaldan oraylasqan kaublıq qurılıs dep ataydı. Ma'selen NaCl kristalı ushın kub qabırg'asının' uzınlıg'ı  $5.64 \text{ angstrom} = 5.64910^{-8} \text{ sm}$ . Bul uzınlıq kristallıq pa'njere turaqlısı dep ataladı.

Ko'pshilik metallar (altın, gu'mis, mıs ha'm basqalar) qaptaldan oraylasqan kublıq qurılısqa iye. Bunday qurılısta atomlar menen molekulalar tıg'ız jaylasadı ha'm sonlıqtan tıg'ız etip jaylastırılğ'an qurılıs dep te ataladı.

Kublıq qurılıs bir dana a turaqlısı menen ta'riplenedi. Al ulıwma jag'daydarda kristallıq qurılıs o'lsheplerin anıqlaw ushın 6 turaqlı shama qollanıladı (kubtın' ornına keletug'ın parralelopipedtin' a, b ha'm c qabırg'alardı ha'm olar arasındag'ı  $\alpha$ ,  $\beta$  ha'm  $\gamma$  mu'yeshleri). Bul jag'day to'mendegi su'wrette sa'wlelengen. **a**, **b** ha'm **c** vektorları kristallıq pa'njerenin' translyatsiya vektorları dep ataladı.

Kristallıq denenin' simmetriyası degenimizde usı deneni qozg'altqanda yamasa basqa da operatsiyalardıń na'tiyjesinde o'z-o'zine u'ylesiw qa'bilettiligin na'zerde tutadı. Usınday u'ylesiwlerdi payda etiwshi usıllardıń sanı qanshama ko'p bolsa, dene simmetriyalıraq boladı.

Misali tuwri do'n'gelek tsilindr ko'sheri do'gereginde qansha mu'yeshke burilsa da o'zinin' da'slepki halinday halg'a o'tedi. Bunday tsilindr ko'sherge perpendikulyar bolg'an qa'legen ko'sherdin' do'gereginde  $180^\circ$  qa burilg'anda da o'zinin' da'slepki halinday hal menen u'ylesedi. SHar ta'rizli dene aling'an jag'dayda ol orayı arqalı o'tiwshi qa'legen ko'sher do'gereginde burilg'anda o'zinin' da'slepkidey awhalı menen u'ylesedi. Sonlıqtan da shardı tsilindrge qarag'anda simmetriyalıq figura dep esaplaymız.

Biraq bir qatar deneler o'zinin' da'slepki halinday halg'a tek g'ana ken'isliktegi ko'shirlar yamasa burıwlar ja'rdeminde o'tpeydi. Misali adam denesinin' shep yarımı on' yarımı menen ken'isliktegi qozg'altıwlar arqalı u'ylespeydi. Basqa so'z benen aytqanda shep qoldın' qolg'abın on' qolg'a kiyiwge bolmaydı. Bul jag'dayda aynalıq simmetriya haqqında so'z etiledi. Adamnıń on' yarımı shep yarımına adamnıń ortası arqalı o'tiwshi tegislikke qarata simmetriyalı. Bul tegislik simmetriya tegisligi dep ataladı.

Qattı denelerde to'mendegidey simmetriya elementlerinin' bolıwı mu'mkin:

1). Simmetriya orayı. Ayırım deneler noqatqa qarata simmetriyalı bolıwı mu'mkin. Bunday noqattı simmetriya orayı dep ataymız ha'm onı C ha'ripi menen belgileydi.

2). Simmetriya ko'sherleri. Joqarıda shar menen tsilindrdegi burıw ko'sherleri haqqında ga'p etilgen edi. Ma'selen tsilindrdin' ko'sherine perpendikulyar bolg'an ko'sherdin' do'gereginde  $180^\circ$  qa burg'anda o'zinin' da'slepki halinday halg'a keletug'ınlıg'ı ayıldı. Bul jag'dayda  $360/180 = n = 2$  - ta'rtpıli simmetriya ko'sherine iye bolamız. Kristallıq denelerdegi atomlar menen molekullardıń jaylasıwında 1-, 2-, 3-, 4- ha'm 6-ta'rtpıli simmetriya ko'sherleri boladı. Misali 6-ta'rtpıli simmetriya ko'sherinin' do'gereginde figuranı  $360^\circ$  qa burg'anda 6 ret o'zinin' birdey halları arqalı o'tedi.

Kristallıq denelerde 5-, 7- ha'm joqarı ta'rtpıli simmetriya ko'sherleri bolmaydı. Biraq son'g'ı waqıtları uglerodtın' quramalı bolg'an modifikatsiyalarında (misali  $C_{60}$  modifikatsiyası) 5-ta'rtpıli simmetriya ko'sherinin' orın alatug'ınlıg'ı da'llilendi).

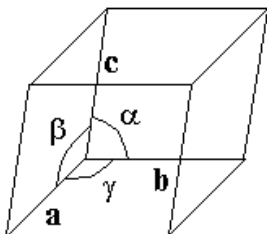
Simmetriya ko'sherlerin 1, 2, 3, 4 ha'm 6 dep belgilew qabıl etilgen. Bunday jag'dayda bul sanlar atlıq bolıp tabıladı. Al simmetriya ko'sherlerinin' ta'rtibi haqqında aytilg'anda sannın' keynine - (inshi) belgisi qoyıladı. Demek 1 figuranı o'z do'gereginde  $360^\circ$  qa burıwshı ko'sher bolıp tabıladı.

3). Simmetriya tegislikleri. Eger dene o'z-o'zi menen aynalıq shag'ılıstırıwdın' ja'rdeminde u'ylestiriletug'm bolsa, onda bul aynalıq betti simmetriya tegisligi dep ataydı. Misali adam figurasının' shep ta'repi menen on' ta'repi adamnıń ortası arqalı o'tetug'm tegislikte qarata simmetriyalı. Kvadrat bolsa ta'repilerine parallel, kvadrattın' orayı araqalı o'tiwshi eki tegislikke ha'm kvadrattın' diagonalları arqalı o'tetug'm eki tegislikke qarata simmetriyalı. Demek kvadrat 4 dana simmetriya tegisligine iye boladı. Kristallografiyada simmetriya tegisligin m arqalı belgileydi.

Joqarıda keltirilgen simmetriya elementleri jabıq simmetriya elementleri dep ataladı. Sebebi bul elementlerdin' ja'rdeminde islengen simmetriyalıq operatsiyalar (shag'ılıstırıwlar ha'm burıwlar) na'tiyesinde figuranın' en' keminde bir noqatı o'z ornında qozg'almay qaladı.

Ashıq simmetriya elementleri figurag'a ta'sir etkende (basqa so'z benen aytqanda ashıq simmetriya elementleri ja'rdeminde islengen simmetriyalıq operatsiyalar a'melge asırılğ'anda) figura o'z ornında qalmaydı. Bunday simmetriya elementi qatarına birinshi gezekte kristallardag'ı joqarıda aytilg'an translyatsiyalar kiredi.

Eger kristaldı qurawshı atomlar yamasa molekulalardıń bir tuwrı boyınsha dizbegin alıp qarasaq, onda 1 sm uzınlıqta shama menen  $10^8$  atomnıń jaylasatug'ınlg'ın ko'remiz. Bunday jag'dayda usı tuwrı boyınsha kristaldı a, b yamasa s aralıg'ına jılastırıp qoyg'anımız benen biz qurılısta bazı bir o'zgeristin' bolg'anlg'ın sezbeymiz. Usınday ko'z-qarastan translyatsiyalardı simmetriya elementleri dep ataymız.



2-38 su'wret.

Elementar qutısha. **a, b, c**,  $\alpha$ ,  $\beta$  ha'm  $\gamma$  lar  
elementar  
qutıshanın' (kristaldın') turaqlıları bolıp  
tabıladı.

Simmetriya ko'sherine usı ko'sher bag'ıtındıg'ı translyatsiyanı qosıp vintlik simmetriya ko'sherlerin alamız. Al simmetriya tegisligine usı betke parallel bag'ıttag'ı translyatsiyanı qosıw arqalı jılıp shashıratıwshı simmetriya tegisliklerine iye bolamız. Vintlik simmetriya ko'sherleri ha'm jılıp shashıratıwshı simmetriya tegislikleri ashıq simmetriya elementleri bolıp tabıladı.

Simmetriya elementleri ja'rdeminde simmetriyalıq operatsiyalar (burıwlar, shag'ılıstırıwlar) a'melge asırıladı.

Simmetriya elementlerin bir birine qosıw arqalı basqa simmetriya elementleri alınadı. Mısalı 2 ge boyında simmetriya orayı qosılsa usı ko'sherge perpendikulyar bag'ıttang'an ha'm C arqalı o'tiwshı simmetriya tegisligi m alınadı. Bunday mısallardı ko'plep keltiriwge boladı.

Ayqın bir kristaldag'ı mu'mkin bolg'an simmetriyalıq operatsiyalar jıynag'ı matematikalıq topardı payda etedi. Bunday topardı simmetriya toparı dep ataymız.

Jabıq simmetriyalıq operatsiyalardan qurıl'g'an toparlar simmetriyanın' noqatlıq toparları dep ataladı. Bunday toparlardın' sanı 32. Simmetriyası berilgen toparg'a kırıwshı kristallar kristallografiyalıq klaslardı payda etedi. Sonlıqtan da ta'biyatta bar barlıq kristallıq deneler simmetriyası boyınsha 32 kristallografiyalıq klassqa bo'linedi.

Al mu'mkin bolg'an barlıq simmetriyalıq operatsiyalardan qurıl'g'an toparlar simmetriyanın' ken'isliktegi toparları dep ataladı. Bunday toparlardın' sanı 230. 1890-jılı birinshi ret bul toparlardı keltirip shıg'arg'an rus kristallografi E.S.Fedorovtın' hu'rmetine bul toparlardı Fedorov toparları dep te ataydı.

Matematikalıq topar, sonın' ishinde simmetriyalıq operatsiyalardan turatug'ın toparlar to'mendegi aksiomalardı qanaatlandıradı:

1. Topardıń eki elementinin' ko'beymesi yamasa qa'legen elementinin' kvadratı usı toparg'a tiyisli element bolıp tabıladı.
2. Topardıń qa'legen u'sh elementi ushın assotsiativlik nızam orınlanadı, Yag'nıy  $a(bc) = (ab)c$ .
3. Toparda birlik (neytral) element (e yamasa 1) bolıp, ol  $ae=ea=a$  sha'rtin qanaatlandıradı.
4. Toparda qa'legen a elementke kerı bolg'an  $a^{-1}$  elementi bolıp  $aa^{-1}=a^{-1}a=e$  sha'rti orınlanadı.

**Kristallografiyalıq koordinatalar sisteması.** Kristallardıń qurılısın izertlegende kristallografiyalıq koordinatalar sistemasın qollanıw qabıl etilgen. Bul jag'dayda a'dette X ko'sheri **a**, Y ko'sheri **b**, Z ko'sheri **s** translyatsiyasınıń bag'ıtında alınadı. Koordinata bası retinde kristallıq pa'njerenin' qa'legen tu'yini alınıwı mu'mkin. Ha'r bir ko'sher boyınsha uzınlıq birligi retinde Brave parallelopipedinin' sa'ykes qabırǵasınıń uzınlıǵı alınadı. Sonlıqtan atomlardın' (tu'yinlerdin') koordinataları pu'tin san menen beriledi. Usınday koordinatalar sisteması kristallografiyalıq koordinatalar sisteması dep ataladı.

Koordinatalar ko'sherin saylap alıw usı paraqraftag'ı birinshi kestedek keltirilgen.

Kublıq, tetragonal ha'm rombaliq sistemalarda koordinatalar sisteması tuwrı mu'yeshli, al qalg'anlarında tuwrı mu'yeshli emes.

**A'piwayı pa'njere.** Biz joqarıda kristallıq pa'njerenin' ayqın kristallar ushın du'zilgen matematikalıq obraz ekenligin aytqan edik. Pa'njeredegi tu'yinler kristaldı qurawshı atomlardın', ionlardın' yamasa molekulalardıń ten' salmaqlıq haldag'ı orınları bolıp tabıladı. Joqarıda keltirilgen su'wrettegi elementar qutışhanı ken'islikte **a**, **b** yamasa **c** bag'ıtlarında sa'ykes **a**, **b** ha'm **c** shamalarına sheksiz ko'p ko'shirip shıqsaq a'piwayı kristallıq pa'njereni alamız. Sonlıqtan kristallıq pa'njere ken'islik boyınsha sheklenbegen obraz bolıp tabıladı.

Koordinata basın bazı bir ıqtıyarlı tu'yinde ornalastırıp qa'legen tu'yinnin' radius-vektorın bilay esaplawg'a boladı:

$$\mathbf{r} = n_1\mathbf{a} + n_2\mathbf{b} + n_3\mathbf{c}. \quad (34-1)$$

Bul jerde  $n_1, n_2, n_3$  pu'tin sanlar (nol bolıwı da mu'mkin), **a**, **b**, **c** vektorları bazislik vektorlar, al usı u'sh vektordın' jıynag'ı pa'njere bazisi dep ataladı. Demek **a**, **b**, **c** vektorlarınan turatug'ın parallelopiped kristallıq pa'njerenin' elementar qutışhası dep ataladı. Eger  $n_1, n_2, n_3$  pu'tin sanları  $-\infty$  den  $+\infty$  ge shekemgi ma'nislerdin' barlıǵın qabıl etetug'ın bolsa (34-1) menen anıqlang'an radius-vektordın' ushı barlıq tu'yinlerde bolıp shıǵ'adı.

O.Brave 1848-jılı kristallıq qurılıstın' barlıq ko'pligin kristallıq pa'njerenin' 14 tipi ja'rdeminde ta'riplewdin' mu'mkinligin ko'rsetti. Bul pa'njerele Brave pa'njerele dep atalıp, olar bir birinen elementar qutışhaların' formaları ha'm oraylasıwı boyınsha ayırıladı. Pa'njere tu'yini elementar qutışhalardıń to'beleri menen qatar qaptal betlerinde, orayında da bolıwı mu'mkin. Usıǵ'an baylanışlı qutışhalardıń (pa'njerenin') oraylasıwına qaray pa'njerele bilayınsha tto'rtke bo'linedi:

a. Tu'yin tek g'ana elementar bo'lekshenin' to'belinde jaylasadı. Bunday jag'dayda pa'njereni a'piwayı pa'njere dep ataymız ha'm P ha'ripi menen belgileybiz.

b. Tu'yin elementar qutışhanın' to'belinde ha'm X, Y yamasa Z ko'sherlerine perpendikulyar bolg'an qaptalları oraylarında da jaylasadı. Bunday jag'dayda bazada oraylasqan pa'njerege iye bolamız. Mısalı X ko'sherine perpendikulyar qaptal oraylasqan bolsa A pa'njere, Y ko'sherine perpendikulyar bet oraylasa B pa'njere ha'm Z ko'sherine perpendikulyar bet oraylasqan jag'dayda C pa'njerege iye bolamız.

c. Tu'yin elementar qutışhanın' to'belinde ha'm orayında jaylasadı. Bunday pa'njere ko'lemde oraylasqan pa'njere dep ataladı ha'm I ha'ripi menen belgilenedi.

d. Tu'yinler elementar qutışhalardıń to'delerinde ha'm qaptal betleri oraylarında jaylasadı. Bunday jag'dayda F ha'ripi menen belgilenetug'ın qaptaldan oraylasqan pa'njerege iye bolamız.

Brave qutışhasın saylap alıw ushın to'mendegidey u'sh sha'rt qoyıladı:

- 1) elementar qutışhanın' simmetriyası kristaldın' simmetriyasına sa'ykes keliwi, al elementar qutışhanın' qabırğ'aları pa'njerenin' translyatsiyaları bolıwı kerek;
- 2) elementar qutışha maksimal mu'mkin bolg'an tuwrı mu'yeshlerge, bir birine ten' bolg'an mu'yeshlerge ha'm qabırğ'alarg'a iye bolıwı kerek;
- 3) elementar qutışha minimallıq ko'lemge iye bolıwı kerek.

Usınday sha'rtler tiykarında 7 tu'rli singoniyag'a (singoniya so'zi uqsas mu'yeshler degen ma'nini an'artadı) iye elementar qutışhalar ha'm 14 tiptegi Brave pa'njereleri qurılıadı.

Da'slep 8 tu'rli singoniyadag'ı elementar qutışhalardıń parametrleri menen tanısamız:

Cingoniya	Translyatsiyalar	Mu'yeshler	Pa'njere tipi
Kublıq	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^0$	P, I, F
Tetragonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^0$	P, I
Geksagonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^0, \gamma = 120^0$	P
Trigonal (romboedrlik)	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^0$	P
Rombalıq	$a \neq b \neq c, a \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^0$	P, C, I, F
Monoklinlik	$a \neq b \neq c, a \neq c$	$\alpha \neq \gamma \neq 90^0, \beta = 90^0.$ $\alpha \neq 90^0.$	P, B
Trigonallıq	$a \neq b \neq c, a \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^0$ $\alpha \neq 90^0, \beta \neq 90^0.$	P

**Atomlıq tegisliklerdi belgilew.** Kristalda ha'r qaysısının' betinde sheksiz ko'p atomlar jaylasqan sheksiz ko'p tegisliklerdi ju'rgiziw mu'mkin. O'z ara parallel bolg'an tegisliklerdi ta'riplew ushın olardıń birewin saylap alıw jetkilikli.

Tuwrı sıızqlı (tuwrı mu'yeshli bolıwı sha'rt emes) koorrdinalardag'ı qa'legen tegisliktin' ten'lemesi

$$x/|OA| + y/|OV| + z/|OS| = 1$$

tu'rine iye boladı (sızılmada keltirilgen). Joqarıdag'ı formuladag'ı  $|OA|$ ,  $|OB|$ ,  $|OC|$  shamaları pu'tin sanlar etip alınıwı kerek. Sonlıqtan

$$x/|OA| + y/|OB| + z/|OC| = 1$$

ten'lemesinin' ornına

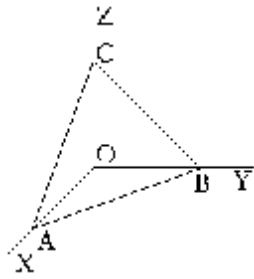
$$hx + ky + lz = D$$

ten'lemesin alıw mu'mkin. Bul ten'lemedegi h,k,l shamaları pu'tin ma'niske iye boladı ha'm **Miller indeksleri** dep ataladı ha'm (hk1) tu'rinde jazılıadı.



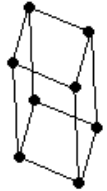
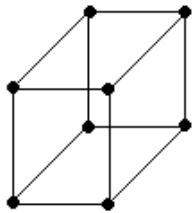
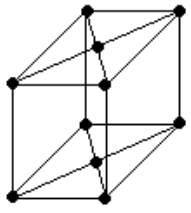
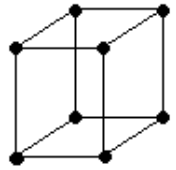
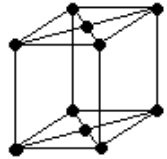
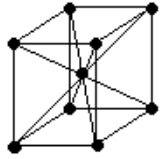
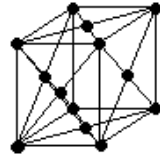
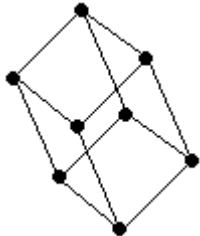
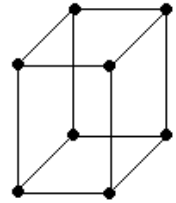
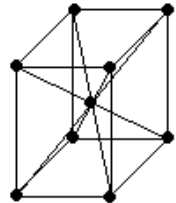
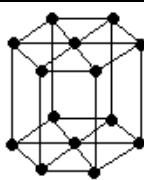
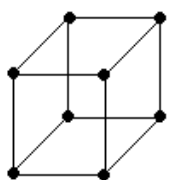
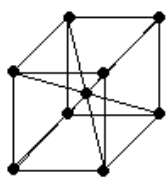
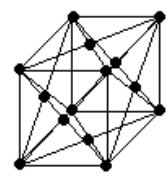
2-39 su'wret.

Tegisliklerdin' Miller indekslerin tabıwg'a  
mu'mkinshilik  
beretug'in su'wret.



**Bag'itlardı belgilew.**  $(hk1)$  kristallografiyalıq tegisliklerine perpendikulyar bolg'an kristallografiyalıq bag'ıt sol ha'ripler menen belgilenedi ha'm kvadrat qawsırmag'a alınadı:  $[hk1]$ .

**14 tiptegi Brave pa'njereleri haqqında mag'lıwmat**

Singoniya	Pa'njere tipii			
	A'piwayı	Bazada oraylasqan	Ko'lemde oraylasqan	Qaptalda oraylasqan
Triklinlik				
Monoklinlik				
Rombalıq				
Trigonallıq (romboedrlik)				
Tetragonallıq				
Geksagonallıq				
Kublıq				

### 35-§. Qattı denelerdin' jıllılıq sıyımlıg'ı

Klaslıq dep atalıwshı da'slepki teoriyalar ha'm olardın' na'tiyjeleri. Dyulong-Pti nızamı. Eynshteyn modeli. Eynshteyn temperaturası. Eynshteyn teoriyasının' kemshiligi. Elementar qozıwlar. Normal modalar. Fononlar. Debay modeli. Dispersiyalıq qatnas. Modalar sanın anıqlaw. Debay temperaturası.

**Klaslıq dep atalıwshı da'slepki teoriyalar ha'm olardın' na'tiyjeleri.** Atomları o'zlerinin' ten' salmaqlıq awhalları a'tirapında bir birinen g'a'rezsiz o'z-ara perpendikulyar u'sh tegislikte terbeletug'ın qattı dene model sıpatında qabıl etiledi. Terbeliwshi atomlar yamasa molekulalar usı o'z-ara perpendikulyar bıg'ıtlarg'a qarata sıızıqlı ostsillyator bolıp tabıladı. Energiyanın' erkinlik da'rejeleri boyınsha ten'dey bo'listiriliw nızamı boyınsha ha'r bir ostsillyator kT energiyasına iye boladı. Bul energiya  $(1/2)kT$  kinetikalıq ha'm  $(1/2)kT$  potentsial energiyadan turadı.

Demek n atomnan turatug'ın dene jıllılıq qozg'alısları na'tiyjesinde

$$U = 3nkT \quad (35-1)$$

energiyasına iye boladı. Bul denenin' jıllılıq sıyımlıg'ı

$$C_v = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_v = 3nk. \quad (35-2)$$

Demek qattı denenin' jıllılıq sıyımlıg'ı turaqlı shama boladı. Eger zattın' molekulalarının' moli alinatug'ın bolsa, onda  $n = N_A$ ,  $nk = R$  - mollik gaz turaqlısı. Onda bolsa (35-2) den mollik jıllılıq sıyımlıg'ının'  $3R$  ge ten' ekenligi ha'm temperaturadan g'a'rezsizligi kelip shıg'adı. Bul **Dyulong-Pti nızamı** bolıp tabıladı.

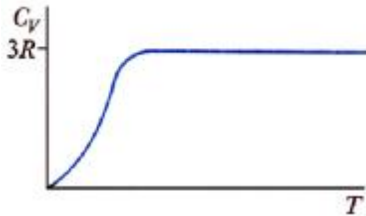
***Eksperimentler to'mengi temperaturalarda qattı denenin' jıllılıq sıyımlıg'ının'  $C_v \sim T^3$  nızamı boyınsha nolge umtilatug'ınlg'ın ko'rsetedi.***

Qattı denelerdin' eksperimentlerde aling'an jıllılıq sıyımlıg'ı su'wrette ko'rsetilgen. Jıllılıq sıyımlıg'ının' usınday g'a'rezliligi tek metal emes qattı denelerde orın aladı. Bunday denelerdegi birden bir energiya atom yamasa molekulalardın' ten' salmaqlıq halı do'geregindegi terbelisleri bolıp tabıladı. Metallarda bolsa erkin elektronlar bolıp, olar da jıllılıq sıyımlıg'ına o'zlerinin' u'lesin qosadı. Biraq bul u'les onsha u'lken emes. Sebebi jıllılıq qozg'alıslarına energiyası Fermi beti energiyası jaqın bolg'an elektronlar g'ana qatnasadı. Tek tiykarg'ı jıllılıq sıyımlıg'ı ku'shli kemeyetug'ın to'mengi temperaturalarda elektronlıq jıllılıq sıyımlıg'ı en' baslı jıllılıq sıyımlıg'ına aylanadı.

**Eynshteyn modeli.** Jıllılıq sıyımlıg'ının' temperaturag'a g'a'rezliligin tu'sindiriw maqsetinde A.Eynshteyn 1907-jılı qattı denelerdi payda etetug'ın ostsillyatordın' energiyalarının' diskrettiligin esapqa alıwdı usındı. 1900-jılı M.Plank absolyut qattı denenin' nurlanıwın tu'sindiriw ushın usınday usınıs jasag'an edi. O.D.Xvolson bul haqqında bılay jazadı:

“Elektrodinamika ko'z-qarası boyınsha Plank gipotezaları materiallıq deneler ta'repinen nur energiyası menen almasıw, Yag'nyı nur energiyasın shıg'arıw menen jutıw sekiriw menen a'melge asatug'ınlg'ı tastıyıqlawg'a alıp keledi. Qala berse Plank tin' birinshi teoriyası boyınsha (1901-jıl) dene energiyası pu'tin san eselengen  $\epsilon = h\nu$  shamasına ten' mug'darda juta aladı yamasa shıg'ara aladı. Xvolson boyınsha n terbelisler sanı, h bazı bir universal shama. Al Plank

tın' ekinshi teoriyası boyınsha (1909-jıl) tek g'ana energiyanın' shıg'arılıwı bul nızamg'a bag'ınadı, al jutıw bolsa u'zlıksız a'melge asadı... Plank tın' birinshi teoriyası boyınsha absolyut nol temperaturadag'ı energiya nolge, al ekinshi teoriyada shekli shamag'a ten'".



2-40 su'wret.

Metal emes qattı denenin' jıllılıq sıyımlıg'ının' temperaturag'a g'a'rezliligi.

Xvolson boyınsha "1907-jılı Einstein nin' usı ma'selege qatnası bar birinshi jumısı jarıq ko'rdi. Onın' tiykarg'ı pikiri to'mendegidey: denelerdin' molekulları vibratorlar menen jıllılıq ten' salmaqlıg'ında turadı, eki erkinlik da'rejesine iye vibratorlardın' ha'r bir erkinlik da'rejesine qansha jıllılıq energiyası sa'ykes kelse, molekullardın' da ha'r bir erkinlik da'rejesine ortasha sonshama energiya sa'ykes keledi. Bunday pikirdi Einstein altı erkinlik da'rejesine iye bolatug'ın bir atomlı qattı denelerge qollandı. T temperaturasındag'ı atomnıń ortasha energiyası 3i ge ten', al gramm-molekulanın' ortasha energiyası  $J = 3Ni$  ge ten' bolıwı kerek. Yag'nıy

$$J = 3R.$$

Bul an'latpadan T boyınsha tuwındı alsaq

$$C_v = 3R \left( \frac{\beta v}{T} \right)^2 e^{\frac{\beta v}{T}} \frac{1}{(e^{\beta v/T} - 1)^2} = 3R F(\beta v) = \Phi(T/\beta v)$$

yamasa

$$C_v = 3R = 3R F(\theta) = 3R \Phi\left(\frac{1}{x}\right)$$

formulaların alamız.

*Bul formulalar ilimde da'slep jıllılıq sıyımlıg'ı haqqındag'ı, al keyin jıllılıq qubılısları haqqındag'ı jan'a da'wirdi (erani) ashtı. Jıllılıq sıyımlıg'ı  $C_v$  temperatura T nın' anıq tu'rdegi funktsiyası bolıp shıqtı".*

Meyli sıızqlı ostsillyator iye bola alatug'ın energiyanın' elementar portsiyası E ge ten' bolsın. Usı energiya fotonnıń energiyası jiyilik penen qanday bolıp baylanısqa bolsa, tap sonday bolıp jiyilik penen baylanıslı dep esaplaymız. Oндаy bolsa

$$E = \hbar\omega. \quad (35-3)$$

Ostsillyatordın' en' kishi energiyasının' nolge ten' ekenligi hesh qaydan kelip shıqpaydı. Sonlıqtan usı en' kishi energiyanı turaqlı shama dep qabıl etemiz ha'm  $E_0$  arqalı belgileymiz. Jıllılıq sıyımlıg'ın da'l esaplawda  $E_0$  din' ma'nisi a'hmiyetke iye emes. Sonlıqtan ostsillyator iye bola alatug'ın energiyanın' mu'mkin bolg'an ma'nisleri mına tu'rde jazıladı:

$$E_n = E_0 + nE \quad (n = 0, 1, 2, \dots). \quad (35-4)$$

Ostsillyator halının' itimallıg'ı Boltsman formulası menen beriledi dep boljag'anımız durıs boladı. Sonlıqtan

$$R_n = A \exp[-E_n/(kT)] = A \exp[-(E_0 + nE)/(kT)] \quad (35-5)$$

ekenligin alamız. A normirovkalang'an turaqlı shama. Bul shamanı normirovka sha'rti tiykarınan alamız:

$$P_n = \exp[-E_0/(kT)] \exp[-nE/(kT)] A \sum_{n=0}^{\infty} \exp[-nE/(kT)] = 1. \quad (35-6)$$

Endi ostsillyatorдын' ortasha energiyasın esaplaw mu'mkin:

$$\langle E \rangle = \langle E \rangle = \sum_{n=0}^{\infty} E_n P_n = E_0 + \{ E \sum_{n=0}^{\infty} n \exp[-nE/(kT)] \} / \{ \sum_{n=0}^{\infty} \exp[-nE/(kT)] \}. \quad (35-7)$$

Geometriyalıq progressiya ushın formuladan:

$$\sum_{n=0}^{\infty} \exp[-nE/(kT)] = \{ 1 - \exp[-E/(kT)] \}^{-1}. \quad (35-8)$$

Bul ten'likтин' eki ta'repin de E boyınsha differentsiallap iye bolamız:

$$\sum_{n=0}^{\infty} n \exp[-nE/(kT)] = \exp[-E/(kT)] \{ 1 - \exp[-E/(kT)] \}^{-2}. \quad (35-9)$$

Endi (35-7) to'mendegidey tu'rge iye boladı:

$$\langle E \rangle = E_0 + \frac{E}{\exp[E/(kT)] - 1}. \quad (35-10)$$

Bunnan ostsillyatorlardın' bir molinin' energiyası ushın alamız:

$$U = 3N_A \langle E \rangle = 3N_A E_0 + \frac{3N_A E}{\exp[E/(kT)] - 1}. \quad (35-11)$$

Bunday jag'dayda turaqlı ko'lemdegi jıllılıq sıyımlıg'ı:

$$C_V = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_V = 3N_A k \left( \frac{E}{kT} \right)^2 * \exp\left( \frac{E}{kT} \right) / \{ \exp\left( \frac{E}{kT} \right) - 1 \}^2. \quad (35-12a)$$

Bul **jıllılıq sıyımlıg'ı ushın Eynshteyn formulası** bolıp tabıladı. Bul formuladan jetkilikli da'rejede joqarı temperaturalarda (Yag'nıy  $T \rightarrow \infty$  bolg'anda)  $C_V \rightarrow 3R$ , al  $T \rightarrow 0$  de  $C_V \rightarrow 3R$

$$\left( \frac{E}{kT} \right)^2 * \exp\left( -\frac{E}{kT} \right) \rightarrow 0.$$

**Eynshteyn formulası.** E «energiyanın' elementar portsiyası» qattı denenin' qa'siyetine baylanışlı boladı. Denenin' «qattılıg'ı» artqan sayın bul energiyanın' ma'nisi artadı, sebebi

terbelis jiyiligi  $\omega$  nın' artıwı kerek. Bul energiyanı *Eynshteyn temperaturası* ja'rdeminde bilayınsha tikkeley ta'riplew qabıl etilgen:

$$k\theta_E = E. \quad (35-12b)$$

Endi formula (35-12a) bilay jazıladı:

$$C_V = \{3R(\theta_E/T)^2 \exp(\theta_E/T)\} / [\exp(\theta_E/T) - 1]^2. \quad (35-12v)$$

**Eynshteyn teoriyasının' kemshilikleri.** Sanlıq jaqtan (35-12a) eksperiment penen sa'ykes kelmeydi. Bul formula boyınsha temperatura nolge jaqınlag'ında jıllılıq sıyımlıg'ı  $C_V \sim \exp[-E/(kT)]$  - eksponenta boyınsha kemeyiwi kerek, al eksperiment bolsa  $C_V \sim T^3$  ekenligin ko'rsetedi. Solay etip

*Eynshteyn formulası jıllılıq sıyımlıg'ın esaplaw ushın jaramaydı. Sonlıqtan bul formula basqa formula menen almasıruı kerek.*

Eynshteyn boyınsha qattı dene ha'r birinin' energiyası  $E = \hbar\omega$  bolg'an bir birinen g'a'rezsiz sıızılıq ostsillyatorlardın' jıynag'ı bolıp tabıladı. Demek gazdegi molekulalardıń qozg'alısınday qattı denelerdegi atomlar yamasa molekulalardıń qozg'alısları Eynshteyn boyınsha bir birinen g'a'rezsiz. Bunday modeldin' qabıl etiliwinin' o'zi qa'telik.

Qattı denelerdin' atomların' qozg'alısın bir birinen g'a'rezsiz dep qaraw nadurıs bolıp tabıladı. Olardıń kollektivlik o'z-ara ta'sirlesiwın dıqqatqa alıw kerek. Usınday ta'sirlesiwdi esapqa alıw eksperiment penen tolıq sa'ykes keletug'in jıllılıq sıyımlıg'ı teoriyasının' payda bolıwın ta'miyinleydi.

**Elementar qozıwlar.** Qattı deneni quraytıg'ın atomlar sisteması 0 K de en' kishi energiya menen o'zinin' tiykarg'ı halında turadı. 0 K qasındag'ı jıllılıq sıyımlıg'ın talqılaw ushın sol temperaturada atomlar sisteması iyeley alatug'ın energiyalardıń ma'nisleri tabıw kerek. Energiya beriwdin' na'tiyjesinde bazı bir atom o'zinin' ten' salmaqlıq halınan belgili bir bag'ıtta shıg'adı dep esaplaymız. Usı atomdı o'zinin' ten' salmaqlıq halına iyteriwshi ku'sh qon'ısılas atomlar ta'repinen ta'sir etetug'ın iyteriw ku'shi bolıp tabıladı. Solay etip o'zinin' ten' salmaqlıq halınan shıqqan atom belgili bir ku'sh penen qon'ısı atomlarg'a ta'sir etedi. Na'tiyjede sol atomlar da o'zlerinin' ten' salmaqlıq hallarınan shıg'adı ha'm bir atomnıń qozg'alısı qattı denede tolqın tu'rinde tarqaladı. Sonlıqtan qozg'alıs kollektivlik tu'rge iye boladı.

**Atomlardın' usınday kollektivlik qozg'alısı qattı denedegi ses tolqını bolıp tabıladı. Solay etip ses terbelisleri elementar qozıwlar bolıp tabıladı.**

**Normal modalar.** Joqarıdag'ıday bolıp ta'sirlesetug'ın atomlar sisteması baylanısqa ostsillyatorlar jıynag'ı tu'rinde qaraladı. Bunday jag'dayda atomlar sistemasının' qa'legen qozg'alısı normal terbelisler yamasa sistemanın' normal modaları superpozitsiyası sıpatında ko'rsetiledi. Normal modalardıń ha'r qaysısı o'zinin' jiyiligine iye boladı, Yag'nıy  $\omega_i$  jiyiligi modası

$$E_i = \hbar\omega_i. \quad (35-13)$$

energiyasına iye boladı ( $E_0$  qaldırılğ'an). Qattı denede usı modanın' bir-eki (bir-ekiden artıq bolıwı da mu'mkin) terbelisi qozadı. Eger usı modanın' n terbelisi qozg'an bolsa

$$E_{in} = n \hbar \omega_i. \quad (35-14)$$

Berilgen moda menen  $E_{in}$  energiyasının baylanışlı bolıwı Boltsman bo'listiriliwine bag'ınadı dep esaplaymız ha'm sonlıqtan

$$P_{in} = A \exp[-E_{in}/(kT)] = A \exp[-n \hbar \omega_i / (kT)] \quad (35-15)$$

Berilgen moda terbelislerinin' ortasha sanı

$$\langle n_i \rangle = \langle E_{in} \rangle / (\hbar \omega_i) = 1/(\hbar \omega_i) \sum n \hbar \omega_i R_{in} = \frac{1}{\exp(\hbar \omega_i / kT) - 1}. \quad (35-16)$$

Endi tolıq energiyanı esaplaw normal modalar jiyilikleri menen olardıń sanın esaplawg'a alıp kelindi.

**Fononlar.** Jiyiligi  $\omega_i$  bolg'an terbelis modası menen baylanışlı energiya ushın jazılǵ'an (35-13) formulası usınday modanı kvazibo'lekshe sıpatında qaraw haqqında pikirdi payda etedi. Ses terbelisleri modaları menen baylanışqan usınday kvazibo'lekshe *fonon* dep ataladı. Fonon tu'sinigin paydalanıw talqılawlardı an'satlastıradı ja'ne matematikalıq esaplawlarda da birqansha jen'illik payda etedi. Fotonlar ushın qollanılǵ'an birqansha matematikalıq operatsiyalar fononlar ushın da jemisli tu'rde qollanılardı. Sebebi eki jag'dayda da birdey bolg'an tolıqlıq protseske iye bolamız. Biraq bul protsesslerdin' fizikalıq ma'nisi pu'tkilley ha'r qıylı. Sonlıqtan:

**Fotonlardı ayqın energiyag'a iye ha'm o'zinshe ta'biyatqa iye, jeke tu'rde jasay alatug'm bo'leksheler sıpatında dep qaraw mu'mkinshiligin fononlar ushın qollana almaymız. Sebebi fononlar sonday qa'siyetlerge iye bo'leksheler bolıp tabılmaıdı. Sonlıqtan da fononlar kvazibo'leksheler dep ataladı. Fizikada fononlardan basqa magnonlar, polyaritonlar, eksitonlar h.t.b. dep atalatug'm kvazibo'leksheler belgili.**

**Debay modeli.** Qattı denelerde ha'r qanday tezliklerge iye boylıq ha'm ko'ldenen' tolıqlardıń taralıwı mu'mkin. Ko'ldenen' tolıqlar o'z-ara perpendikulyar bolg'an eki tu'rli bag'ıtqa iye polarizatsiyag'a iye bolıwı mu'mkin. Sonlıqtan u'sh polarizatsiyag'a iye uzın tolıqlı ses tolıqlarının' modaları haqqında aytıwg'a boladı.

A'piwayılıq ushın izotrop qattı dene jag'dayına itibar beremiz. Ha'r bir polarizatsiya ushın modalar sanın esaplaw birdey. Debaydın' jıllılıq sıyımlıg'ı teoriyası qattı denenin' ses tolıqları modaların esaplawg'a tiykarlang'an.

Jiyilikti  $\omega = 2\pi/T$  ha'm tolıqlıq sandı  $k = 2\pi/\lambda$  dep belgileyemiz.  $\lambda$  - tolıqlıq uzınlıg'ı,  $T$  - terbelis da'wiri. Bunday jag'dayda jiyilik penen tolıqlıq sanı arasındag'ı qatnastı ta'ripleytug'm

$$\omega = \pm vk \quad (35-7)$$

formulası *dispersiyalıq qatnas* dep ataladı. Bul formuladag'ı  $v^2 = \partial p / \partial \rho$  - basımnan tıg'ızlıq boyınsha alıng'an dara tuwındı,  $v$  - tolıqlıqnnın' tarqalıw tezligi. (35-17) de ko'ldenen' ha'm boylıq tolıqlar birdey  $v$  tezligi menen tarqaladı dep esaplang'an. Sonlıqtan izotrop qattı deneler jag'dayında dispersiyalıq qatnas a'piwayı tu'rge iye boladı. Basqa jag'daylarda quramalı formulalardan' alınıwı mu'mkin. Bul qatnas tolıqlıq sanlar belgili bolg'anda modalar jiyiliklerin ha'm sol jiyiliklerge sa'ykes ha'r bir modanın' energiyaların ma'nislerin anıqlawg'a mu'mkinshilik beredi.

**Modalar sanın anıqlaw.** SHekli o'lishemlerge iye bolg'an denelerde turg'in tolqınlar payda boladı. Denenin' shegarası erkin terbeledi ha'm bul jerde hesh qanday kernewler payda bolmaydı. Ko'lemi  $1^3$  qa ten' bolg'an kub ta'rizli dene alayıq. Koordinata basın kubtın' to'belerinin' birine jaylastıramız. X ko'sheri bag'ıtındag'ı tegis turg'in tolqınlardı qaraymız.  $\xi$  arqalı terbeliwshi noqattın' ten' salmaqlıq haldan awısıwın belgileyemiz.

X ko'sheri bag'ıtında v tezligi menen tarqalıwshi tolqındı ta'ripleytug'in differentsial ten'leme to'mendegidey tu'rge iye boladı:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0. \quad (35-18)$$

Fizikada bul ten'leme tolqın ten'lemesi dep ataladı. Kubtın' betleri erkin bolg'anlıqtan (Yag'nıy kubtın' betinde terbelisler na'tiyjesinde kernewler payda bolmaydı) bul ten'leme ushın shegaralıq sha'rt bilay jazıladı:

$$\left. \frac{\partial \xi}{\partial x} \right|_{x=0 \text{ ham } x=l} = 0. \quad (35-19)$$

(34-19) g'a sa'ykes keliwshi (34-18) din' sheshimi bilay jazıladı:

$$\xi = \exp(i\omega t) (A \sin kx + V \cos kx). \quad (35-20)$$

Bul formuladag'ı  $\omega$  ha'm k dispersiyalıq qatnas (35-17) arqalı baylanısqa. (35-19) din' qanaatlantırılıwı ushın (35-20) da  $A = 0$  dep esaplaw kerek ha'm k g'a  $k_l = n\pi$  sha'rti qoyılalı. Bul jerde  $n = 1, 2, \dots$ . Aling'an qatnaslar turg'in tolqınlardıń payda bolıwına sa'ykes keletug'in tolqınlıq sanlardın' diskret jıynag'ın anıqlaydı. Usı formulalarg'a sa'ykes keliwshi formulalar basqa koordinatalar ko'sherleri ushın da alınadı. Sonlıqtan terbelisler modaların payda etiwshi turg'in tolqınlardıń to'mendegidey tolqınlıq sanların alamız:

$$\begin{aligned} k_x &= \pi n_x / L & (n_x = 1, 2, \dots), \\ k_y &= \pi n_y / L & (n_y = 1, 2, \dots), \\ k_z &= \pi n_z / L & (n_z = 1, 2, \dots). \end{aligned} \quad (35-21)$$

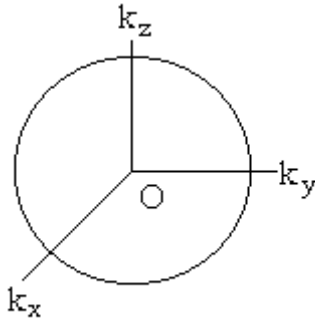
$n_x, n_y, n_z$  sanları bir birinen g'a'rezsiz mu'mkin bolg'an barlıq ma'nislerine iye bolıwı mu'mkin. Endi modalar sanın anıqlaw ( $n_x, n_y, n_z$ ) sanlarının' ha'r qanday jıynaqlarının' sanın anıqlawg'a alıp kelindi. Basqa so'z benen aytqanda Dekart koordinatalar sistemasındag'ı ( $n_x, n_y, n_z$ ) noqatların' sanın esaplaymız.

Ta'replerinin' uzınlıg'ı  $\Delta n_x, \Delta n_y, \Delta n_z$  bolg'an ko'lemdegi noqatlar sanı  $\Delta n_x \Delta n_y \Delta n_z$  qa ten'. Bul sanlarga sa'ykes keliwshi modalar sanı

$$dN = \Delta n_x \Delta n_y \Delta n_z = (1/\pi^3) dk_x dk_y dk_z. \quad (35-22)$$

Bul jerde  $\Delta n_x = (1/\pi) dk_x$  qatnası (35-21) den tikkeley alınadı. (35-22) nin' on' ta'repinde  $dk_x, dk_y, dk_z$  differentsialları jazılğ'an. Sebebi L tolqın uzınlıg'ınan a'dewir u'iken.





2-41 su'wret.

$dN$  nin' ma'nislerin esaplaw ushın  $k_x$ ,  $k_y$  ha'm  $k_z$  ler tek on' ma'nislerdi qabıl etetug'ın bolg'anlıqtan sferalıq koordinatalarg'a o'tken qolaylı boladı. (35-22) de  $dk_x dk_y dk_z = (4\pi/8)k^2 dk$  dep boljaw kerek. Na'tiyjede  $k$  dan  $k+dk$  intervalındag'ı modalar sanı ushın (35-22) den alamız

$$dN = \frac{4\pi L^3}{(2\pi)^3} k^2 dk. \quad (35-23)$$

Bul formulada  $4\pi$  sferalıq koordinatalarda esaplawlardın' ju'rgizilip atırg'anlıg'ın an'latıw ushın bo'limindegi  $2\pi$  menen arnawlı tu'rde qısqartılmag'an. Endi (35-19) dispersiyalıq qatnasınan paydalanamız. Bul qatnastan

$$k^2 dk = (1/v^3) \omega^2 d\omega. \quad (35-24)$$

Demek  $\omega$  menen  $\omega + d\omega$  aralıg'ındag'ı jiyiliklerge iye modalar sanı

$$dN = \frac{4\pi L^3}{(2\pi)^3 v^3} \omega^2 d\omega. \quad (35-25)$$

**Modalar kontsentratsiyası.** Jiyilikler intervalına sa'ykes keliwshi modalar sanı modalar kontsentratsiyası dep ataladı:

$$\rho(\omega) = dN/d\omega. \quad (35-26)$$

Sonlıqtan (35-25) ten

$$\rho(\omega) = \frac{4\pi L^3}{(2\pi)^3 v^3} \omega^2. \quad (35-27)$$

Usınday esaplawlardı ko'ldenen' tolqınlardıń ha'r biri ushın islew mu'mkin. Boylıq ha'm ko'ldenen' tolqınlardıń tezliklerin sa'ykes  $v_b$  ha'm  $v_k$  dep belgileyik. Barlıq modalardıń kontsentratsiyası ayırım modalar kontsentratsiyasının' qosındısınan turadı dep esaplap

$$\rho(\omega) = \frac{4\pi L^3}{(2\pi)^3} (1/v_b^3 + 2/v_k^3) \omega^2 \quad (35-28)$$

ekenligine iye bolamız.

Qattı denelerdin' atomlıq-kristallıq qurılısın esapqa almag'anlıqtan (35-28) ju'da' qısqa tolqınlar ushın durıs na'tiyje bermeydi. Joqarıdag'ı esaplawlarda denelerdin' qurılısı ko'lemi boyınsha bir tekli u'zliksiz dep esaplandı. Uzunlıg'ı atomlar arasındag'ı ortasha qashıqlıqlardan a'dewir u'iken bolg'an, al atomlardın' ten' salmaqlıq haldan awısıwı u'iken bolmag'an tolqınlar ushın (34-28) durıs na'tiyje beredi. Usı jag'day qattı denelerdin' to'mengi temperaturalar dag'ı jıllılıq sıyımlıg'ın esaplaw ushın kerek.

Temperatura ha'm  $kT$  ju'da' to'men bolg'anda (35-28)  $\hbar\omega \gg kT$  bolg'an jiyiliklerge shekemgi jiyilikler ushın durıs na'tiyje beredi. Bul oblastta (35-16)-formuladag'ı bo'lshektin' bo'limindegi  $\exp \frac{\hbar\omega}{kT}$  u'iken ma'niske iye ha'm joqarı jiyilikli modalardın' ortasha sanı eksponentsial az. Sonlıqtan bul modalardın' ulıwma energiyag'a qosqan u'lesi de az. Sonlıqtan (35-28)-formulanı joqarı jiyilikli modalar ushın paydalanıwıg'a boladı.

**To'mengi temperaturalar dag'ı jıllılıq sıyımlıg'ı.** Jıllılıq energiyası menen baylanısқан terbelislerdin' barlıq modalarının' tolıq energiyası

$$U = \int_0^\infty \langle n(\omega) \rangle \rho(\omega) \partial\omega d\omega = \frac{4\pi L^3 \hbar}{(2\pi)^3} \left( \frac{1}{v_b^3} + \frac{2}{v_k^3} \right) * \int_0^\infty \frac{\omega^3 d\omega}{\exp[\hbar\omega/(kT)] - 1} =$$

$$= \frac{4\pi L^3}{(2\pi\hbar)^3} \left( \frac{1}{v_b^3} + \frac{2}{v_k^3} \right) (kT)^4 \int_0^\infty \frac{\xi^3 d\xi}{e^\xi - 1}. \quad (35-29)$$

$\int_0^\infty \frac{\xi^3 d\xi}{e^\xi - 1}$  integralı kompleks o'zgeriwshi funktsiyaları usılları menen esaplanıwı mu'mkin ha'm ol  $\pi^4/15$  ke ten'.

(34-29) jıllılıq sıyımlıg'ın esaplawg'a mu'mkinshilik beredi:

$$C_v = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_v \sim T^3. \quad (35-30)$$

Jıllılıq sıyımlıg'ının' temperaturadan usınday g'a'rezlılıgı 0 K ge jaqın temperaturalar dag'ı eksperimentler na'tiyjelerine sa'ykes keledi.

**Debay temperaturası.** Joqarıda keltirilgen barlıq esaplawlar jetkilikli da'rejede uzın bolg'an tolqınlar ushın durıs. Sonlıqtan (35-28) de ju'da' joqarı emes jiyilikler ushın durıs. Biraq joqarı jiyiliktegi tolqınlardıń jıllılıq sıyımlıg'ına qosatug'ın u'lesi haqqındag'ı eskertiwlerdi esapqa alıp bul formulanı joqarı jiyilikli tolqınlarg'a qollang'anda da u'iken qa'telik jiberilmeytug'ınlig'ın an'g'arıwıg'a boladı. Sonlıqtan bul formulanı en' u'iken bolg'an  $\omega_{\max}$  jiyiliklerine shekemgi tolqınlar ushın qollanamız. Bunday jag'dayda modalardın' tolıq sanı  $3N_A$  g'a ten' bolıwı kerek. Demek

$$3N_A = \int_0^{\omega_{\max}} \rho(\omega) d\omega. \quad (35-31)$$

Jiyilik  $\omega_{\max}$  nın' ma'nisi materialdın' serpimli qa'siyetlerine baylanıslı. Sonın' menen birge  $\omega_{\max}$  shaması polarizatsiyanın' ha'r qanday bag'ıtları ushın da ha'r qanday ma'niske iye bolıwı kerek. Biraq (35-31) formulasın a'piwayılastırıw ushın bazı bir ortashalang'an maksimal jiyilik alıng'an. (35-28) di (35-31) ge qoyıp

$$\omega_{\max} = 2\pi\langle v \rangle \left( \frac{3N_A}{-\pi L^3} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (35-32)$$

ekenligine iye bolamız. Bul jerde  $\langle v \rangle$  shaması  $\left( \frac{1}{v_b^3} + \frac{2}{v_k^3} \right) = 3/(\langle v \rangle)^3$  formulası ja'rdeminde alıng'an sestin' ortasha tezligi. (35-31) ja'rdeminde alıng'an maksimalıq jiyiliktı Debay temperaturası  $\theta_D$  arqalı an'latadı:

$$k\theta_D = \hbar\omega_{\max}. \quad (35-33)$$

A'dette Debay temperaturası 100 den 1000 K ge shekemgi intervalda jatadı. Mısalı mıs (Cu) ushın  $\theta_D = 340$  K, al almaz ushın  $\theta_D \approx 2000$  K.

**Qa'legen temperaturadag'ı jılılıq sıyımlıg'ı.** (35-29) dag'ı U esaplang'anda  $\omega_{\max}$  esapqa alınbadı. Esapqa alg'an jag'dayda

$$U = \frac{12\pi L^3}{(2\pi\hbar)^3 \langle v \rangle^3} \int_0^{\omega_{\max}} \frac{\omega^3 d\omega}{\exp[\hbar\omega/(kT)] - 1} \quad (35-34)$$

formulasın alamız. Bul jerde  $\langle v \rangle$  nın' shaması  $\frac{1}{v_b^3} + \frac{2}{v_k^3} = \frac{3}{(\langle v \rangle)^3}$  formulası ja'rdeminde esaplanadı.

$$\xi = \frac{\hbar\omega}{kT}$$

o'lishem birligi joq o'zgeriwshige o'temiz. Bunday jag'dayda (35-33) ti esapqa alıp

$$U = 9N_A kT \left( \frac{T}{\theta_D} \right)^3 \int_0^{\theta_D/T} \frac{\xi^3 d\xi}{\exp \xi - 1} \quad (35-35)$$

an'latpasına iye bolamız. Jılılıq sıyımlıg'ın (35-35) ti integrallaw ja'rdeminde tabıladı.  $T \ll \theta_D$  bolg'anda integraldın' joqarg'ı shegi  $\infty$  ke shekem tarqaladı ha'm  $S_V = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_V \sim T^3$  an'latpasın alamız.

$T \gg \theta_D$  jag'dayında integraldın' joqarıdag'ı shegi nolge ten'. Bunday jag'dayda  $\exp \xi \approx 1 + \xi$  ha'm

$$U = 9N_A kT \left( \frac{T}{\theta_D} \right)^3 \int_0^{\theta_D/T} \frac{\xi^3 d\xi}{\xi} = N_A kT = 3RT. \quad (35-36)$$

Demek joqarı temperaturadag'ı jılılıq sıyımlıg'ı ushın Dyulong-Pti nızamı  $C_V = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_V = 3R$  di alamız.

### 36-§. Qattı denelerdin' jıllılıq ken'eyiwi

Temperatura joqarılag'anda ko'pshilik qattı denelerdin' ko'leminin' u'lkeyetug'inlıg'ı belgili qubılıs. Bul qubılıstı *jıllılıq ken'eyiwi* dep ataymız. Qızdırg'anda qattı denelerdin' ko'leminin' u'lkeyiw sebeplerin qaraymız.

Kristaldın' ko'leminin' u'lkeyiwi atomlar arasındag'ı ortasha qashılıqtın' o'siwine baylanıslı ekenligi ha'mmege tu'sinikli. demek temperaturanın' o'siwi atomlar arasındag'ı qashılıqların' o'siwine alıp keledi dep juwmaq shıg'aramız. Al qızdırg'anda atomlar arasındag'ı qashılıqtıq u'lkeyiwi qanday sebeplerge baylanıslı degen soraw qoyıladı.

Kristaldın' temperaturasının' artıwı menen atomlardın' jıllılıq terbelislerinin' energiyası da artadı. Na'tiyjede bul terbelislerdin' amplitudaları u'lkeyedi.

Eger atomlardın' terbelisi garmonikalıq bolg'anda, onda qon'ıslas atomlar arasındag'ı ortasha qashılıq o'zgermegen ha'm jıllılıq ken'eyiwi baqlanbag'an bolar edi. Al haqıyqatında kristaldı qurawshı atomlar garmonikalıq terbelis jasamaydı. Bul jag'day su'wrette ko'rsetilgen.

Su'wrette  $R_0$  aralıg'ı atomlar arasındag'ı en' to'men temperaturalarda'ı ortasha qashılıqqa sa'ykes keledi. Bul jag'dayda terbelis qatan' garmonikalıq boldı. Temperaturanın' o'siwi menen atomnıń da energiyası o'sedi. Sonlıqtan da'slep klm sızıg'ı boyınsha terbelis jasaytug'ın atom k'l'm' sızıg'ı boyınsha terbelis jasay baslaydı. Bul sızılıqlardıń ortası (qara noqatlar menen ko'rsetilgen)  $R_0$  shamasınan u'lken boladı.

Su'wrette temperatura qanshama joqarı bolsa energiya  $U$  dın' ma'nisinin' joqarılaytug'inlıg'ı ha'm sog'an sa'ykes atomlar arasındag'ı ortasha qashılıqtın' u'lkeyetug'inlıg'ı ko'rinip tur. Basqa so'z benen aytqanda temperatura ko'terilgen sayın atomlar arasındag'ı tartısıw ku'shine salıstırg'anda iyterisiw ku'shi u'lkeyedi.

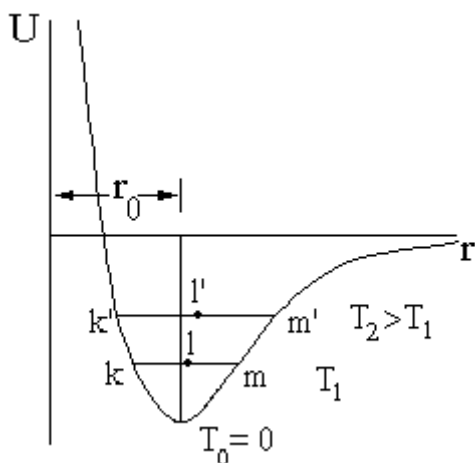
Demek *atomlardın' terbeliwindegi angaromnizmnin'* saldarıman jıllılıq ken'eyiwi ju'zege keledi eken. Kristallıq denelerdi quraytug'ın atom yamasa molekulalar garmonikalıq terbelis jasaytug'ın bolg'anda jıllılıq ken'eyiwi bolmag'an bolar edi.

Jıllılıq ken'eyiwi sanlıq jaqtan sızılıqlı ha'm ko'lemlik ken'eyiw koeffitsientleri menen ta'riplenedi. Meyli  $l$  uzınlıg'ındag'ı dene temperatura  $\Delta T$  shamasına ko'terilgende o'z uzınlıg'ın  $\Delta Q$  shamasına o'zgetetug'ın bolsın. Sızılıqlı ken'eyiw koeffitsienti bılay anıqlanadı:

$$\alpha = \frac{1}{l} \frac{\Delta l}{\Delta T}.$$

Demek sızılıqlı ken'eyiw koeffitsienti temperatura bir gradusqa o'zgergendegi dene uzınlıg'ının' salıstırmalı o'zgerisine ten' eken. Tap sol sıyaqlı ko'lemlik ken'eyiw koeffitsienti  $\beta$  bılayınsha anıqlanadı:

$$\beta = \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta T}.$$



2-42 su'wret. Kristaldag'ı terbeliwshi atomlardın' angarmonikalıq terbelis jasaytug'ınlg'ın ko'rsetetug'ın su'wret.

Bul formulalardan denenin'  $T$  temperaturasındag'ı uzınlıg'ı menen ko'lemi bılay anıqlanatug'ınlg'ı kelip shıg'adı:

$$l_T = l_0(1 + \alpha \Delta T), \quad V_T = V_0(1 + \beta \Delta T).$$

Bul an'latpalarda  $l_0$  ha'm  $V_0$  arqalı denenin' da'slepki uzınlıg'ı menen ko'lemi belgilengen.

Kristallardıń anizotropiyasınıń saldarınan ha'r qıylı kristallografiyalıq bag'ıtlarda sıızıqlı ken'eyiw koeffitsientleri ha'r qıylı ma'niske iye boladı. Demek, eger biz kristaldan shar sog'ıp alsaq, temperatura u'lkeygende ol o'zinin' sferalıq formasın o'zgertedi. Ulıwma jag'dayda shar ko'sherleri kristallografiyalıq bag'ıtlar menen baylanısqa *u'sh ko'sherli ellipsoidqa* aylanadı.

Bul ellipsoidtın' u'sh ko'sheri boyınsha jıllılıq ken'eyiw koeffitsientleri kristaldın' *ken'eyiwiniń bas koeffitsientleri* dep ataladı. Olardı  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  ha'm  $\alpha_3$  arqalı belgilesek, onda kristaldın' ko'lemlik ken'eyiw koeffitsienti

$$\beta = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3.$$

Kublıq simmetriyag'a iye kristallar yamasa izotrop deneler ushın

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha \text{ ha'm } \beta = 3\alpha.$$

Usınday kristaldan sog'alg'an shar qızdırılğ'annan keyin de shar bolıp qaladı (a'llette diametri u'lkenirek bolğ'an sharg'a aylanadı).

Geypara kristallar ushın (tetragonal ha'm geksagonal kristallarda)

$$\alpha_1 = \alpha_2 \neq \alpha_3 \text{ ha'm } \beta = 2\alpha_1 + \alpha_3.$$

Kristallardıń sıızıqlı ha'm ko'lemlik ken'eyiw koeffitsientleri temperatura kishi intervallarda o'zgergende, temperaturanın' ma'nisinin' o'zi de joqarı bolğ'anda basım ko'pshilik jag'daylarda turaqlı bolıp qaladı. Al ulıwma jag'dayda jıllılıq ken'eyiw koeffitsienti temperaturag'a baylanıslı o'zgeredi ha'm temperatura tu'menlegende  $\alpha$  menen  $\beta$  koeffitsientleri temperaturanın' kubına proporsional kishireydi ha'm temperatura nolge umılğ'anda kristallardıń jıllılıq sıyımlıg'ı sıyaqlı olar da nolge umıladı. Bul jag'day su'wrette ko'rsetilgen  $T = 0$  noqatına sa'ykes keledi.

Temperatura absolyut nolge umılğ'anda jıllılıq ken'eyiwiniń de, jıllılıq sıyımlıg'ının' da nolge umılıwı tan' qalarlıq na'rse emes. Sebebi bul fizikalıq qa'siyetlerdin' ekewi de atomlardın'

terbelisi menen baylanıslı. Sonlıqtan jıllılıq ken'eyiwi menen jıllılıq sıyımlıg'ı arasında belgili bir baylanıstın' bolıwı kerek. Bul baylanıstı birinshi bolıp Gryunayzen ashtı ham onın' atı menen **Gryunayzen nızamı** dep ataladı:

Berilgen qattı zat ushın jıllılıq ken'eyiwi koeffitsientinin' atomlıq jıllılıq sıyımlıg'ına qatnası temperaturadan g'a'rezsiz turaqlı shama bolıp tabıladı.

Qattı denelerdin' jıllılıq ken'eyiw koeffitsientleri

Zat	$\alpha$	Zat	$\alpha$
Alyuminiy	$26 \cdot 10^{-6}$	Qalayı	$19 \cdot 10^{-6}$
Gu'mis	$19 \cdot 10^{-6}$	Dyuralyuminiy	$22.6 \cdot 10^{-6}$
Kremniy	$7 \cdot 10^{-6}$	Molibden	$5 \cdot 10^{-6}$
Temir	$12 \cdot 10^{-6}$	Fosfor	$124 \cdot 10^{-6}$
Volfram	$4 \cdot 10^{-6}$	Mıs	$17 \cdot 10^{-6}$
Natriy	$80 \cdot 10^{-6}$	TSink	$28 \cdot 10^{-6}$

### 37-§. Ko'shiw protsessleri

Relaksatsiya waqıtı. Jıllılıq o'tkizgishlik. Diffuziya. Jabısqaqlıq. Ko'shiwdin' ulıwmalıq ten'lemesi. Jıllılıq o'tkizgishlik. O'zinshe diffuziya. Ko'shiw protsesin ta'riplewshi koeffitsientler arasındag'ı baylanıs. Waqıtqa baylanıslı bolg'an diffuziya ten'lemesi. Relaksatsiya waqıtı. Kontsentratsiya ushın relaksatsiya waqıtı.

*O'zi o'zine qoyılğ'an sistema joqarı itimallıqqa iye ten'salmaqlıq halg'a o'tiwge umtıladı. Usının' saldarınan sistemanı ta'riplewshi parametrler ten'salmaqlıq ma'nislerine jetedi (ten'salmaqlıq haldag'ı ma'nislerine jetedi). Bul protsess sa'ykes molekulalıq belgilerdin' ko'shiwi sıpatında ta'riplenedi.*

O'z-o'zine qoyılğ'an sistema ten' salmaqlıq halına o'tiwge umtıladı. Usının' na'tiyjesinde sistema parametrleri ten' salmaqlıq halg'a sa'ykes keliwshi ma'nislerine jetkenshe o'zgeredi. Bul protsess sa'ykes molekulalıq belgilerdin' ko'shiwi sıpatında ta'riplenedi. Sistemanın' ten' salmaqlıq halg'a jetiwi ushın za'ru'r bolg'an waqıt **relaksatsiya waqıtı** dep ataladı.

*Sistemanın' Maksvelldin' ten' salmaqlıq bo'listiriliwinen awıtqıwı ha'r qanday parametrler boyınsha ju'redi. Bul parametrler ushın ha'r qıylı relaksatsiya waqıtı orın aladı. Mısalı gazdin' quramındag'ı ha'r qanday sorttag'ı molekulalar kontsentratsiyalarının', tig'ızlıqlardın' ha'm basqa da parametrlerdin' ten' salmaqlıq halg'a o'tiwi ha'r qıylı waqıt aralıqlarında bolatug'inlig'ı ta'biyiy na'rse.*

Sistema ushın bo'listiriwdin' Maksvell bo'listiriliwine aylanıwı ushın ketetug'in waqıtı Maksvell **belistiriliwine relaksatsiya waqıtı** yamasa **termalizatsiya waqıtı** dep ataladı.

**Jıllılıq o'tkizgishlik.** Ten' salmaqlıq halda sistemanın' (endigiden bılay fazanın' dep ta ataymız) barlıq noqatlarında temperatura birdey ma'niske iye boladı. Temperaturanın' ten' salmaqlıq haldan awıtqıwının' aqıbetinde temperaturanın' ma'nisin barlıq noqatlarda birdey bolıp qalatug'ınday bag'darlarda sistemanın' bir bo'liminen ekinshi bo'limine jıllılıqtın' qozg'alıwı ju'zege keledi. Usınday qozg'alıstar menen baylanıslı bolg'an jıllılıqtın' ko'shiriliwi **jıllılıq o'tkizgishlik** dep ataladı.

Gazlerdin' jillılıq o'tkizgishligi. Eger gaz bir tekli qızdırılğ'an bolmasa (Yag'nıy gazdin' bir bo'liminde temperatura joqarı, al ekinshi bir bo'liminde temperatura to'men) temperaturanın' ten'lesiwı baqlanadı: gazdin' ko'birek qızdırılğ'an bo'limi salqınlaydı, al salqın bo'liminin' temperaturası joqarılaydı. Bul qubılıs gazdin' ko'birek qızdırılğ'an bo'liminen kemirek qızdırılğ'an bo'limine jillılıqtın' ag'ısı menen baylanısqa. Usınday bolıp gazdegi (basqa da denelerdegi) jillılıq ag'ısının' payda bolıwına **jillılıq o'tkizgishlik** dep ataymız. A'llette, jillılıq ag'ısı gaz molekulaların' ilgerilemeli qozg'alıslarındag'ı soqlıg'ısıwları na'tiyjesinde a'melge asadı. Suyıqlıqlarda bolsa jillılıq ag'ısı terbeliwshi molekulaların' soqlıg'ısıwı na'tiyjesinde ju'zege keledi. Joqarı energiyag'a iye molekulalar u'lken amplitudag'a iye terbelislerge qatnasadı. Olar amplitudaları kishi molekulalar menen soqlıg'ısqanda olardı ku'shlierek terbelledi ha'm o'z energiyasının' bir bo'limin beredi.

Jillılıq ag'ısı bag'ıtı temperaturanın' to'menlew bag'ıtına sa'ykes keledi. Ta'jiriye jillılıq ag'ısı Q din' temperatura gradientine proporsional ekenligin ko'rsetedi, Yag'nıy

$$Q = - \chi (dT/dx).$$

Bul an'latpadag'ı  $\chi$  jillılıq o'tkizgishlik koeffitsienti dep ataladı. Jillılıq ag'ısı dep maydannın' bir birligi arqalı waqt birliginde ag'ıp o'tetug'm jillılıq mug'darın tu'sinemiz.

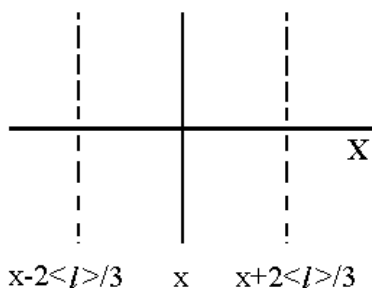
Sİ birlikler sistemasında jillılıq o'tkizgishlik koeffitsienti  $Dj/m^2 \cdot s \cdot K$  yamasa  $Vt/m^2 \cdot K$  birligine, al SGS sistemasında  $erg/sm^2 \cdot s \cdot K$  birligine iye. Texnikada bolsa  $\chi$  ushın  $kDj/m^2 \cdot saat \cdot K$  o'lshe birligi ko'birek qollanıladı.

**Diffuziya.** Ten' salmaqlıq halda fazanı qurawshı ha'r bir komponentinin' tıg'ızlıqları ha'r bir noqatta birdey ma'niske iye boladı. Tıg'ızlıqtın' ten' salmaqlıq haldan awıtwı na'tiyjesinde zattın' komponentlerinin' qozg'alısı baslanadı ha'm bul qozg'alıs ten' salmaqlıq halg'a o'tkenshe dawam etedi. Usı qozg'alısqa baylanıslı bolg'an zattın' sistema boyınsha ko'shiwi **diffuziya** dep ataladı.

**Jabısqaqlıq.** Ten' salmaqlıq halda fazanın' ha'r qanday bo'limleri bir birine salıstırg'anda tınıshlıqta turadı. Olardıń biri basqa bo'limlerge salıstırg'anda qozg'alısqa keltirilgen jag'dayda usı qozg'alıwshı bo'limnin' tezligin kemeytiwge bag'darlang'an ku'shle payda boladı. Yag'nıy **tormozlanıw** yamasa **jabısqaqlıq** payda boladı dep aytamız. Gazlerdegi jabısqaqlıq (tormozlanıw) qozg'alıwshı ha'm qozg'alımaytug'ın qatlamlar (bo'limler) arasındag'ı impulsler almasıwg'a (Yag'nıy ta'rtplesken qozg'alıs impulsinin' ko'shiwine) alıp klinedi.

*Sonlıqtan gazler menen suyıqlıqlardag'ı su'ykelis ku'shlerinin' payda bolıwı ko'shiw protseslerine, atap aytqanda molekulaların' ta'rtplesken qozg'alısı impulsınin' ko'shiwine baylanıslı boladı.*

**Gazlerdegi ko'shiwdin' ulıwma ten'lemesi.** Meyli G bir molekulag'a sa'ykes keliwshi bazı bir molekulalıq qa'siyetti ta'rtplesin. Bul qa'siyet energiya, impuls, kontsentratsiya, elektr zaryadı ha'm basqalar bolıwı mu'mkin. Ten' salmaqlıq halda G barlıq ko'lem boyınsha birdey ma'niske iye bolatug'ın jag'dayda G nın' gradienti orın alg'anda usı shamanın' kemeyiw bag'ıtındag'ı qozg'alısı baslanadı.



2-43 su'wret. Ko'shiwdin' ulıwma ten'lemesin keltirip shıg'arıw ushın arnalg'an su'wret.

Meyli X ko'sheri G nın' gradienti bag'ıtında bag'ıtlang'an bolsın (su'wrette ko'rsetilgen). Son'g'ı soqlıg'ısıwdan keyin dS maydanın kesip o'tetug'ın molekulalardıń ju'rgen jolının ortasha ma'nisi  $\frac{2}{3} \langle l \rangle$  ge ten'. Ko'pshilik jag'daylarda bul shama jetkilikli da'rejede az ha'm sonlıqtan dS ten  $\frac{2}{3} \langle l \rangle$  qashıqlıg'ındag'ı G nın' ma'nisin bılay jazamız:

$$G\left(x \pm \frac{2}{3} \langle l \rangle\right) = G(x) \pm \frac{2}{3} \langle l \rangle \frac{\partial G(x)}{\partial x}. \quad (37-1)$$

Bul jerde x noqatındag'ı Teylor qatarına jayg'andag'ı birinshi ag'za menen sheklenilgen.

X ko'sheri bag'ıtındag'ı molekulalar sanının' ag'ısı  $n_0 \langle v \rangle / 4$  ke ten'. Demek X ko'sherinin' teris ta'repinde G nın' dS maydanı arqalı ag'ısı

$$I_G^{(-)} = -\frac{1}{4} n_0 \langle v \rangle \left\{ G(x) + \frac{2}{3} \langle l \rangle \frac{\partial G(x)}{\partial x} \right\}, \quad (37-2)$$

al X ko'sherinin' on' bag'ıtı ushın bul an'latpa

$$I_G^{(+)} = -\frac{1}{4} n_0 \langle v \rangle \left\{ G(x) - \frac{2}{3} \langle l \rangle \frac{\partial G(x)}{\partial x} \right\} \quad (37-3)$$

tu'rine iye boladı.

Demek qosındı ag'ıs ushın to'mendegidey ten'leme alamız:

$$I_G = I_G^{(+)} + I_G^{(-)} = -\frac{1}{3} n_0 \langle v \rangle \langle l \rangle \frac{\partial G}{\partial x}. \quad (37-4)$$

Bul ten'leme G mug'darının' *ko'shiwinin' tiykarg'ı ten'lemesi* bolıp tabıladı.

**Jıllılıq o'tkizgishlik.** Bul jag'dayda G bir molekulag'a sa'ykes keliwshi jıllılıq qozg'alısınan' ortasha energiyası. Eger bir noqattan ekinshi noqatqa o'tkende temperatura o'zgeretug'ın bolsa jıllılıq o'tkizgishlik te o'zgermeli shama bolıp tabıladı. Bunday jag'dayda jıllılıq ag'ısı  $I_g$  shamasın  $I_g$  arqalı belgileymiz. Erkinlik da'rejesi boyınsha ten'dey bo'listiriliw teoremasınan

$$G = \frac{i}{2} kT = \frac{i}{2} \frac{k N_A}{N_A} T = \frac{i}{2} \frac{R}{N_A} T = \frac{C_v}{N_A} T. \quad (37-5)$$



Bunday jag'dayda ko'shiw ten'lemesi (37-4) mınaday tu'rge iye boladı:

$$I_G = -\frac{1}{3}n_0 \langle v \rangle \langle l \rangle \frac{C_v}{N_A} \frac{\partial T}{\partial x} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (37-6)$$

$$\lambda = \frac{1}{3}n_0 \langle v \rangle \langle l \rangle \frac{C_v}{N_A} = \frac{1}{3}\rho \langle v \rangle \langle l \rangle c_v \quad (37-7)$$

**jıllılıq o'tkizgishlik** dep ataladı.  $\rho = n_0 m$ ,  $c_v = C_v / (N_A m)$  shamaları sa'ykes gazdin' tıg'ızılıg'ı ha'm turaqlı ko'lemdegi gazdin' salıstırmalı jıllılıq sıyımlıg'ı. (37-6) **jıllılıq o'tkizgishlik ushın Fure ten'lemesi** yamasa **Fure nızamı** dep ataladı.

Jıllılıq o'tkizgishlik haqındag'ı ta'limat XVIII a'sirdin' ekinshi yarımında rawajlana basladı ha'm J.B.J.Furenin' (1768-1830) 1822-jılı baspadan shıqqan «Jıllılıqtın' analitikalıq teoriyası» kitabında tamamlandı.

Jıllılıq o'tkizgishlik a'dette ko'plegen usıllar menen o'lishenedi. Molekulanı qattı sfera ta'rizli dene dep  $\langle l \rangle$  di molekula radiusı  $r_0$  arqalı an'latıwg'a boladı. (37-7) degi basqa shamalar eksperimentte o'lishenedi, al  $\langle v \rangle$  bolsa berilgen temperatura ushın Maksvell bo'listiriliwinen anıqlanadı. Bunday jag'dayda  $r_0 \approx 10^{-8}$  sm ortasha shaması alınadı. Mısalı vodorod molekulasının' radiusı kislorod molekulasının' radiusınan shama menen 1.5 ese kishi bolıp shıg'adı. Sonın' ushın barlıq molekular ushın radiuslar derlik birdey dep esaplay alamız.

Ha'r qanday gazler ushın jıllılıq sıyımlıg'ı  $S_v$  da bir birinen az parqlanadı. Sonlıqtan berilgen kontsentratsiyalarda jıllılıq o'tkizgishlik tiykarınan molekularдын' ortasha tezligi  $\langle v \rangle$  dan g'a'rezli bolıp shıg'adı.

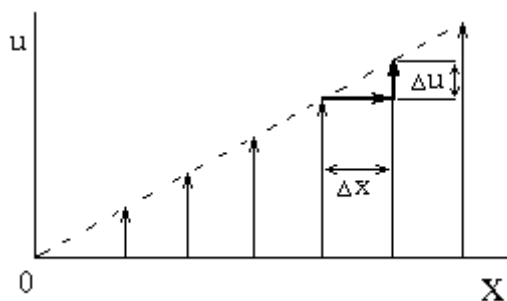
***Na'tiyjede jen'il gazler awır gazlerge qarag'anda a'dewir u'lken jıllılıq o'tkizgishlikke iye boladı.***

Mısalı a'dettegi jag'daylarda kislorodtın' jıllılıq o'tkizgishligi  $0.024 \text{ Vt(m}^3\text{K)}$ , al vodorodtiki bolsa  $0.176 \text{ Vt(m}^3\text{K)}$ .

$n_0 \langle l \rangle = 1/\sigma$  basımg'a g'a'rezli emes., al  $\langle v \rangle \sim T^{1/2}$  shaması da basımnan g'a'rezsiz.

***Demek jıllılıq o'tkizgishlik basımg'a g'a'rezli emes, al temperarutanın' kvadrat korenine proporsional o'zgeredi. Bul jag'daylar eksperimentte tastıyıqlanadı.***

**Jabısqaqlıq.** Joqarıda ayılğ'anday jabısqaqlıq yamasa gazlerdegi ishki su'ykelis gaz qatlamlarının' qozg'alısı bag'ıtında molekular impulslerin ko'shiriwge baylanıslı payda boladı. Su'wrette X ko'sherine perpendikulyar bolg'an u qatlamlarının' tezlikleri vektorları ko'rsetilgen. Bıqtıyarlı tu'rde saylap alıng'an qatlam on' ta'repinde turg'an qatlamg'a salıstırg'anda kishirek tezlik penen, al shep ta'repinde turg'an qatlamg'a salıstırg'anda u'lkenirek tezlik penen qozg'aladı. Qatlamlarg'a bo'liw sha'rtli tu'rde ju'rgizilgip, tezligi  $\Delta u$  ge parqlanatug'ın qatlamnıń qalın'lıg'ı  $\Delta x$  dep belgilengen.



2-44 su'wret. Jabisqaqlıqtın' payda bolıw mexanizmi.

Jıllıq qozg'alısları na'tiyjesinde bir qatlamnan ekinshi qatlamg'a molekulalar ushıp o'tedi ha'm o'zi menen birge bir qatlamnan ekinshi qatlamg'a ta'rtpıli tu'rdegi qozg'alıstın' mu impulsın alıp o'tedi. Usınday impuls almasıwdın' na'tiyjesinde kishi tezlik penen qozg'alıwshı qatlamnın' tezligi u'lkeyedi. Al u'lken tezlik penen qozg'alıwshı qatlamnın' tezligi kemeyedi. Na'tiyjede

**Tez qozg'alıwshı qatlam tormozlanadı, al kishi tezlik penen qozg'alıwshı qatlam tezlenedi. Ha'r qanday tezliklerde qozg'alıwshı gaz qatlamları arasındag'ı ishki su'ykelistin' payda bolıwının' ma'nisi usınnan ibarat.**

Gazdın' bir biri menen su'ykelisetug'ın betlerinin' bir birligine sa'ykes keliwshi su'ykelis ku'shin  $\tau$  arqalı belgileymiz. O'z gezeginde  $\tau$  tezlik bag'ıtına perpendikulyar bag'ıttag'ı ta'rtplesken qozg'alıs impulsının' ag'ısına ten'. Bul jag'dayda

$$G = \mu u \quad (37-8)$$

ha'm (37-4) mınaday tu'rge enedi:

$$I_G = -\frac{1}{3} n_0 \langle v \rangle l m \frac{\partial u}{\partial x} = -\theta \frac{\partial u}{\partial x} = \tau. \quad (37-9)$$

Bul jerde

$$\eta = \frac{1}{3} n_0 \langle v \rangle l m = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle l \quad (37-10)$$

**dinamikalıq jabisqaqlıq** dep ataladı.  $\rho = n_0 m$  - gazdın' tıg'ızlıg'ı.  $\tau$  dın' belgisi u'lkenirek tezlik penen qozg'alıwshı qatlamlarg'a ta'sir etiwshi su'ykelis ku'shleri tezlikke qarama-qarsı bag'ıtlang'anlıg'ın esapqa alg'an.

Bul jag'dayda da  $n_0 l = 1/\sigma$  basımg'a g'a'rezli emes, al  $\langle v \rangle \sim T^{1/2}$  shaması da basımnan g'a'rezsiz. Sonlıqtan dinamikalıq jabisqaqlıq basımg'a baylanışlı emes, al temperaturanın' kvadrat korenine baylanışlı o'zgeredi.

Dinamikalıq jabisqaqlıqtın', Yag'nıy su'ykelis ku'shlerinin' basımnan, sog'an sa'ykes gazdın' tıg'ızlıg'ınan g'a'rezsizligi da'slep tu'siniksiz bolıp ko'rinedi. Ma'sele to'mendegishe tu'sindiriledi:

Erkin qozg'alıw jolı basımg'a keri proporsional o'zgeredi, al molekulalar kontsentratsiyası basımg'a proporsional. Molekula ta'repinen alıp ju'rılgen ta'rtplesken qozg'alıs impulsı erkin ju'riw jolına tuwra proporsional (Yag'nıy basımg'a keri proporsional). Impuls alıp ju'riwshi molekulalardıń kontsentratsiyası basımg'a tuwra proporsional bolg'anlıqtan birligi bir waqıt

ishinde ha'm ko'lemdegi molekulalar ta'repinen alıp o'tilgen impuls basimg'a baylanissız bolıp shıg'adı. Bul juwmaq eksperimentte jaqsı tastıyqlanadı.

Dinamikalıq jabısqaqlıqtın' birligi paskal-sekund (Pa\*s) bolıp tabıladı.

$$1 \text{ Pa*s} = 1 \text{ N*s/m}^2 = 1 \text{ kg/(m*s)}.$$

Dinamikalıq jabısqaqlıq penen birge **kinematikalıq jabısqaqlıq** ta qollanıladı:

$$v = \theta/\rho. \quad (37-11)$$

Kinematikalıq jabısqaqlıqtın' o'lishemi  $1 \text{ m}^2/\text{s}$  bolıp tabıladı.

**O'zlik diffuziya.** Molekulalar mexanikalıq ha'm dinamikalıq qa'siyetleri boyınsha birdey bolg'an jag'daydı qaraymız. Bunday jag'dayda molekulalardı ren'i boyınsha ayıratug'in bolayıq ha'm

$$G = n_1/n_0.$$

Keltirilgen formulada  $n_0$  ten' salmaqlıq kontsentratsiya,  $n_1$  birinshi sort molekulalar kontsentratsiyası. Bul jag'dayda

$$I_{n_1} = -\frac{1}{3} n_0 < v > < l > \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{n_1}{n_0} \right) = -D \frac{\partial n_1}{\partial x}. \quad (37-12)$$

Bul jerde

$$D = \frac{1}{3} < v > < l > \quad (37-13)$$

**diffuziya koeffitsienti** dep ataladı. (37-12) ten'lemesi Fik ten'lemesi dep ataladı.

Temperaturanın' belgili ma'nisinde  $<v>$  shaması turaqlı shama bolıp tabıladı., al  $l \sim 1/r$ . Demek turaqlı temperaturada  $D \sim 1/r$ . Ekinshi ta'repten turaqlı basımda  $<l> \sim T$ , al  $<v> \sim T^{1/2}$ . Demek turaqlı basımda  $D \sim T^{3/2}$ . Bul juwmaqlar eksperimentte jetkilikli da'rejede tekserilgen.  $D \sim 1/r$  qatnasın  $Dp = \text{const}$  dep jazg'an qolaylı. Bul ekserimentte ju'da' tıg'ız bolmag'an gazlerde basımnın' ken' intervalında da'l tastıyqlanadı (protsenttin' onnan birindey da'llikte).

Normal temperaturalarda kislorod penen azottın' hawadag'ı diffuziya koeffitsienti shama menen  $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  qa ten'.

**Ko'shiw protsesslerin xarakterlewshi koeffitsientler arasındag'ı baylanıslar.** (37.7), (37.10) ha'm (37.13)- an'latpalardan

$$\lambda = \frac{\eta C_v}{m N_A} = \eta c_v, \quad (37-14)$$

$$D = \eta/\rho = \frac{\lambda}{c_v \rho} \quad (37-15)$$

ekenligi kelip shıg'adı. Bul an'latpalarda  $c_v$  arqalı turaqlı ko'lemdegi jılılıq sıyımlıg'ı, al  $\rho$  arqalı zattın' tıg'ızlıg'ı belgilengen.

## QOSBIMSHALAR

### İdeal gazdin' hal ten'lemesi

Termodinamikalıq sistemanın' hal ten'lemesi sistemanın' halının' parametrlerin baylanıstıratug'ın analitikalıq formula bolıp tabıladı. Eger sistemanın' xalı u'sh parametr ja'rdeminde tolıq anıqlanatug'ın bolsa (basım P, ko'lem V ha'm temperatura T) hal ten'lemesi ulıwma tu'rde bilay jazıladı:

$$F(P, V, T) = 0 \quad (1)$$

Bul formulanın' ayqın tu'ri qarap atırılğ'an termodinamikalıq sistemanın' fizikalıq qa'siyetlerine baylanıslı.

Ko'p sanlı eksperimentallıq mag'lıwmatlardı ulıwmalastırıw gazlardın' ko'pshiliginin' o'jire temperaturasında ha'm shama menen bir atmosfera basımında (a'dettegi sharayatlar) *Klapeyron-Mendeleev ten'lemesi* dep atalatug'ın ten'lemenin' ja'rdeminde jetkilikli da'rejedegi joqarı da'llikte ta'riplenetug'ınlıg'ın ko'rsetedi:

$$PV = \nu RT. \quad (2)$$

Bul an'latpadag'ı P gazdin' basımı, V gaz iyelep turg'an ko'lem,  $\nu$  gazdin' mollerinin' sanı, R universal gaz turaqlısı, T absolyut temperatura. (2)-ten'leme frantsuz fizigi Benua Pol Emil Klapeyronnıń (1799 - 1864) ha'm orıs ximigi Dmitriy İvanovich Mendeleevtin' (1834 - 1907) hu'rmeti menen ataladı.

Termodinamikalıq jaqtan P, V ha'm T parametrlerin baylanıstıratug'ın ten'leme (2)-Klapeyron-Mendeleev ten'lemesi bolatug'ın bolsa, onda usınday sha'rtlerge bag'matug'ın gazdi *ideal gaz* dep ataydı. Normal jag'daylarda vodorod ha'm geliy o'zlerinin' qa'siyetleri boyınsha ideal gazlerge ju'da' uqsas gazler bolıp tabıladı.

(2)-ten'lemenı tallawdı *absolyut temperatura* dep atalatug'ın T shamasın talqılawdan baslaymız. (2) den ko'lem menen zattın' mug'darı turaqlı bolg'anda temperatura T nın' ideal gazdin' basımı P g'a tuwrı proporsional bolatug'ınlıg'ı ko'rinip tur. Al bul jag'day eger temperaturanı o'lshew ko'lemi turaqlı bolg'an gaz termometri menen o'lsheuse ha'm gaz ideal gaz bolsa, onda aling'an termometr temperatura boyınsha sızıqlı shkalag'a iye bolatug'ınlıg'ın an'latadı. Biraq sonı esapqa alıw kerek, termometrlik dene retinde gaz paydalanılatug'ın gaz termometrinin' absolyut temperaturanı o'lshew imkaniyatları sheklengen. Sebebi termometrlik dene retinde haqıyqıy (real) gaz paydalanıladı, al real gaz ushın (2)-ten'leme juwıq orınlanadı. To'mengi temperaturalarda ideal gaz suyıq halg'a o'tedi. Sonlıqtan haqıyqıy gazlerdi termometrdin' jumısshı denesi retinde paydalanıw maqsetke muwapıq kelmeydi.

İdeal gaz termometri menen o'lshegen absolyut temperatura T TSelsiya shkalasında anıqlang'an temperatura menen bilay baylanısqa:

$$T = t + 273,15. \quad (3)$$

Bul an'latpadag'ı  $t$  arqalı TSelsiya shkalasındag'ı temperaturanın' ma'nisi berilgen. Temperaturanın' absolyut shkalasındag'ı temperaturanı o'lshew birligi kelvin (K) bolıp tabıladı ha'm ol sanlıq jaqtan TSelsiya shkalasındag'ı temperaturanı o'lshew birligi TSelsiya gradusı ( $^{\circ}\text{S}$ ) menen ten'.

(2)-formulag'a sa'ykes absolyut temperatura nolge ten' ( $T=0$ ) bolg'anda PV ko'beymesi nolge ten' boladı. Temperaturanın' bul ma'nisi *temperaturanın' absolyut noli* dep ataladı. Basım menen ko'lemnin' ko'beymesi PV teris ma'niske iye bola almaytug'ını sıyaqlı absolyut temperatura da teris ma'niske iye bola almaydı. (3) ten temperaturanın' absolyut noline TSelsiya shkalasındag'ı  $t = -273,15^{\circ}\text{C}$  temperaturanın' sa'ykes keletug'inlıg'ı ko'rinip tur.

(2)-formuladag'ı zattın' mug'darın (bul jag'dayda ideal gazdın') ta'ripleytug'm  $v$  parametrin tallawg'a o'teyik. Molekulalıq-kinetikalıq ko'z-qarastan bul shama sistemag'a kiriwshi molekulalardıń sanına proporsional. Sistemadag'ı molekular sanınan onın' teprmodinamikalıq qa'siyetleri g'a'rezli ekenligi anıq. Sonlıqtan  $v$  da  $P$ ,  $V$  ha'm  $T$  sıyaqlı sistemanın' termodinamikalıq parametri bolıp tabıladı ha'm (2) hal ten'lemesi barlıq to'rt termodinamikalıq parametrdi baylanıstıradı.

Termodinamika zatlardın' molekulalıq qurılısın izertlemeytug'm bolg'anlıqtan onın' ramkalarında zatlar mug'darı eksperimentallıq mag'lıwmatlar tiykarında tek termodinamikalıq qatnaslar tiykarında anıqlanıwı mu'mkin.

O'tkerilgen ta'jiriybeler  $P$ ,  $V$  ha'm  $T$  parametrleri arasındag'ı qatnastın' olardıń massaları arasında belgili bir turaqlı qatnas saqlang'anda birdey bolıp kalatug'inlıg'm ko'rsetedi. Mısalı gazdın' basımı menen ko'lemnin' ko'beymesi PV ha'm temperatura  $T$  arasındag'ı proporsionallıq koeffitsient 2 gramm vodorod ha'm 32 g kislorod ushın birdey bolıp kaladı. Bunnan zatlardın' mug'darı  $v$  di gazdın' massası  $M$  nin' usı gaz ushın turaqlı bolg'an  $\mu$  shamasına katnası sıpatında anıqlawdın' kerek ekenligi kelip shıg'adı:

$$v = \frac{M}{\mu}. \quad (4)$$

Bul an'latpadag'ı  $v$  *mollik massa* yamasa *zattın' bir molinin' massası* dep ataladı.

Tariyxıy jaqtan zattın' mug'darı tu'sinigi da'slep ximiyalıq reaksiyag'a kiriwshi ha'm reaksiyanın' na'tiyjesinde alinatug'm ximiyalıq zatlardın' massaların' qatnasınan kirgizilgen. Bul jag'day zattın' mug'darının' o'lshew birliginin' atına o'z izin kaldırdı. Zatlardıń mug'darı mollerde o'lsenedi. Bul o'lshew birligi SI sistemasının' tiykarg'ı birliklerinin' dizimine kirgizilgen.

*Qa'legen zattın' bir molinde  $^{12}\text{C}$  uglerod izotopının' 12 grammındag'ı molekular sanınday mug'darda molekula boladı.*

Qa'legen zattın' bir molindegi molekular sanı birdey boladı ha'm ol san *Avagadro sanı* dep ataladı (İtaliyalı fizik ha'm ximik Amedeo Avagadronın' (1776-1856) hu'rmetine). Bul turaqlınnın' ma'nisi eksperimentte anıqlang'an ha'm mınag'an ten':

$$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}. \quad (5)$$

Avogadro turaqlısı makro- ha'm mikrodu'nyadag'ı massalardıń masshtablarınń qatnasın beredi ha'm termodinamikalıq sistemadag'ı bo'lekshelerdin' sanının' o'lishem birligi bolıp tabıladı. Bul shama sistemalardı ta'riplegendegi termodinamikani paydalanıwdın' qollanılıwının' kriteriyin beredi. Eger sistemadag'ı bo'leksheler sanı Avagadro sanı menen salıstırılıqtay yamasa onnan ko'p bolsa, onda bul sistema ushın termodinamikalıq ta'riplew ju'rgiziw mu'mkin.

Avogadro turaqlısı *massanın' atomlıq birligi (m.a.b)* shaması menen baylanıslı. Bul shama  $^{12}\text{S}$  izotopının' massasının' on ekiden birine ten':

$$M_{\text{m.a.b.}} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ g.} \quad (6)$$

Bir gramnnın' ( $10^{-3} \text{ kg}$ ) massanın' atomlıq birligine qatnası Avagadro sanına ten'.

Bir atomnnın' massası  $m_a$  massanın' atomlıq massası  $M_{\text{m.a.b.}}$  menen Mendeleevtin' da'wirlik sistemasında ko'rsetilgen elementtin' atomlıq massası  $A$  g'a ko'beytkenge ten':

$$M_a = M_{\text{m.a.b.}} \cdot A \quad (7)$$

Bir molekulanın' massası  $m$  usı molekulag'a kiriwshi atomlardın' massalarının' qosındısı tu'rinde anıqlanadı. Alıng'an an'latpanı Avagadro turaqlısına ko'beytiw *zattın' molekulalıq massası* beredi:

$$\mu = mN_A. \quad (8)$$

Molekulalıq massa  $\text{kg/mol}$  de o'lishenedi.

(2)-Klapeyron-Mendeleev ten'lemesinde  $PV$  ha'm  $T$  shamaları arasındag'ı proporsionallıq koeffitsienti sıpatında *zattın' mug'darı*  $v$  din'  $R$  koeffitsientine ko'beymesi tur.  $R$  universal gaz turaqlısı dep ataladı. Onın' shaması barlıq gazler ushın birdey ha'm mınag'an ten':

$$R = 8,31 \frac{\text{Dj}}{\text{mol} \cdot \text{K}}. \quad (9)$$

*Zattın' mug'darı* ushın jazılğ'an (4) an'latpanı (2) Klapeyron-Mendeleev ten'lemesine qoysaq, onı aqırg'ı tu'rge alıp kelemiz:

$$PV = \frac{M}{\mu} RT. \quad (10)$$

Klapeyron-Mendeleev ten'lemesi ideal gazdin' ten' salmaqlıq halın, demek onday gazde ju're alatug'ın qa'legen qaytımlı protsesslerdi ta'ripleydi. Sistemag'a qosımsha sha'rtler qoyılğ'anda *termodinamikalıq protsesslerdin' ten'lemelerin* ha'm sa'ykes nızamlardı alıw mu'mkin. Bul nızamlar shekli tu'rdegi qollanıwılarg'a iye bolıp, (2) ten'leme ta'repinen ruqsat etiletug'ın termodinamikalıq protsesslerdin' dara jag'dayları bolıp tabıladı.

*Boyl-Mariot nızamına saykes turaqlı temperaturadag'ı massası o'zgermey qalatug'ın gazdin' basımı ko'lemge kerı proporsional o'zgeredi.* Bul nızam menen ta'riplenetug'ın protsess izotermalıq protsess ( $T = \text{const}$ ) dep ataladı, al onın' ten'lemesi mına tu'rge iye:

$$PV = \text{const.} \quad (11)$$

Gazdin' basımı menen ko'lemi arasındag'ı usınday baylanıs XVII a'sirdin' ekinshi yarımında bir birinen g'a'rezsiz anglıshan Robert Boyle (1627 - 1691) ha'm frantsuz fizigi Edmon Mariot (1620 - 1684) ta'repinen ashıldı. XVII a'sirdin' alpısınshı jılları Boyle ta'repinen o'zgermeytug'ın belgili bir mug'dardag'ı hawanın' ko'leminin' basımg'a g'a'rezli o'zgeriwleri izertlendi. Bul ta'jiriybeler a'meliy xarakterge iye ha'm hawa nasosların sog'ıw ha'm olardı jetilistiriw menen baylanıslı boldı. O'zinin' ta'jiriybeleri ushın Boyle bir ushı kepserlengen shiyshe nay soqtı ha'm og'an naydın' kepserlengen ushında hawanın' ko'bigın qaldırıp sınap quydı. Atmosferalıq basımnan u'lken basımlar ushın V ta'rizli iymeytillen nay, al atmosfera basımınan kishi basımlar ushın tuwrı nay qollanıldı ha'm naydın' bir ushın ishinde sınap quyılǵ'an ıdısqı otırg'ızıldı. Ko'biktin' ko'lemi ha'm sınap bag'anasının' biyikligi boyınsha Boyle hawanın' basımı menen ko'lemi arasındag'ı qatnastı taptı. Alıng'an na'tiyjeler hawanın' basımı menen ko'lemi arasındag'ı keri g'a'rezliliketin' bar ekenligin tastıyıqladı. 1676-jılı Boyle nızamı Mariot ta'repinen ashıldı. Bul nızamdı ol gazlerdin' fundamentallıq qa'siyetlerinin' biri dep karadı.

Temperaturanı o'lshew usıllarının' rawajlanıwı barısında gazlerdin' ko'leminin' temperatag'a g'a'rezliligi boyınsha sanlıq qatnaslardı alıwdın' mu'mkinshiligi payda boldı. *Jozef Lui Gey-Lyussak* (1778 - 1850) ha'r qıylı gazler ushın ta'jiriybeler seriyasın o'tkerdi ha'm turaqlı basımda ha'm zattın' birdey mug'darı ushın temperatura birdey shamalarg'a ko'terilgende gazlerdin' ken'eyiwi birdey bolatug'ınlıg'ın anıqladı. Bun nızam *Gey-Lyussak nızamı* dep ataladı. Bunnan burınraq XVIII a'sirdin' aqırında bul nızam *Jak Aleksandr Tsezar Sharl* (1746 - 1823) ta'repinen ashılǵ'an edi (biraq ol o'z miynetin baspada shıǵ'arg'an joq).

Gey-Lyussak nızamı izobaralıq protsessti ( $P = \text{const}$ ) ta'ripleydi:

$$\frac{V}{T} = \text{const} \quad (12)$$

yamasa

$$V = V_0(1 + \alpha t). \quad (13)$$

Bul an'latpadag'ı  $V_0$  gazdın' TSelsiya shkalası boyınsha nolge ten' bolǵ'andag'ı ko'lemi,  $\alpha$  gazdın' ken'eyiwinin' temperaturalıq koeffitsienti (ideal gaz ushın  $1/273,15$  shamasına ten' bolıwı kerek). Normal sharayatlar ushın haqıyqıy gazler ushın da  $\alpha$  nın' ma'nisi usı ma'niske jaqın.

Eger gazdin' ko'lemin o'zgerissiz kaldırısaq (bunday awhal turaqlı ko'lemli gaz termometrinde orın aladı), onda bunday jag'dayda o'tetug'ın protsessti *izoxoralıq* protsess ( $V = \text{const}$ ) dep ataymız ha'm bunday protsess mına ten'leme menen ta'riplenedi:

$$\frac{P}{T} = \text{const.} \quad (14)$$

Bul nızam Sharl nızamı dep ataladı.

Haldin' parametrlarinin' birewi (temperatura, basım yamasa ko'lem) turaqlı bolıp qalatug'ın jag'daylarda ideal gazlerde o'tetug'ın protsesslerdi ((11), (12) ha'm (14)) *izoprotsessler* dep ataydı. Bul protsesslerdin' ju'riwi bir hal parametrin turaqlı etip qaldıratug'ın qosımsha sırtqı ta'sirler menen sheklengen. Sonlıqtan bul protsesslerdi tek dara jag'daylar dep karaw kerek (ideal gazlerde mu'mkin bolg'an protsesslerdin' dizimi tek usı u'sh protsessten turmaydı, al ko'p sanlı protsesslerdi o'z ishine kamtıydı).

## **Termodinamikanın' birinshi ha'm ekinshi baslamaları haqqındag'ı ulıwmalıq eskertiwler**

Termodinamikanın' birinshi baslaması ta'biyattag'ı protsesslerdin' bag'ıtı haqqında hesh qanday ko'rsetpeler bermeydi. Mısalı, izolyatsiyalang'an sistema ushın termodinamikanın' birinshi baslaması barlıq protsesslerde sistemanın' energiyasının' turaqlı bolıp qalıwın talap etedi. Eger sistemanın' eki halı 1- ha'm 2-hallar dep belgilense birinshi baslama sistemanın' 1-haldan 2-halg'a o'tetug'ınlıg'ı yamasa 2-haldan 1-halg'a o'tetug'ınlıg'ı haqqında hesh na'rse de aytpaydı. Ulıwma aytqanda termodinamikanın' birinshi baslaması tiykarında izolyatsiyalang'an sistemada qanday da bir protsesstin' ju'retug'ınlıg'ı haqqında ga'p etiw mu'mkin emes.

Meyli adiabatlıq izolyatsiyalang'an sistema bir biri menen ta'sirlesetug'ın, biraq basqa deneler menen ta'sirlespeytug'ın eki deneden turatug'ın bolsın. Bunday jag'dayda sol eki dene arasındag'ı jıllılıq almasıw  $Q_1 = - Q_2$  sha'rtine bag'ınadı. Bir dene ta'repinen alıng'an  $Q_1$  jıllılıg'ı ekinshi dene ta'repinen berilgen  $Q_2$  jıllılıg'ına ten'. Jıllılıqtın' qaysı ta'repke beriletug'ınlıg'ın termodinamikanın' birinshi baslaması ayta almaydı. Sonlıqtan jıllılıq salqınaraq deneden qızdırılğ'an deneg'e o'z-o'zinen o'tetug'ın bolsa birinshi baslamag'a kayshı kelmegen bolar edi. Temperaturanın' sanlıq ma'nisi haqqındag'ı ma'sele termodinamikanın' birinshi baslaması ushın jat ma'sele bolıp tabıladı. Sonlıqtan birinshi baslama temperaturanın' hesh bir ratsionallıq shkalasın du'ziwge alıp kelmeydi.

Termodinamikanın' ekinshi baslaması bolsa kerisinshe haqıyqatta ju'retug'ın protsesslerdin' bag'ıtı haqqında ga'p qılıwg'a mu'mkinshilik beredi. Biraq termodinamikanın' ekinshi baslamasının' a'hmiyeti usının' menen tamam bolmaydı. Ekinshi baslama temperaturanın' sanlıq o'lshegi haqqındag'ı ma'seleni sheshiwge, termometrlik deneni saylap alıwdan ha'm termometrdin' qurılısınan g'a'rezsiz bolg'an ratsional temperaturanın' shkalasın saylap alıwg'a tolıq mu'mkinshilik beredi. Termodinamikanın' birinshi baslaması menen birlikte ekinshi baslama termodinamikalıq ten' salmaqlıq halında turg'an denelerdin' makroskopiyalıq parametrleri arasındag'ı da'l sanlıq qatnaslardı anıqlawg'a mu'mkinshilik beredi. Usınday da'l qatnaslardın' barlıg'ı *termodinamikalıq qatnaslar* degen at aldı.

Termodinamikanın' ekinshi baslamasının' tiykarın salg'an Frantsuz injeneri menen fizigi Sadi Karno bolıp tabıladı dep esaplanadı. 1824-jılı jarıq ko'rgen «Ottın' qozg'awshı ku'shi ha'm usı ku'shti paydalanıwshı mashinalar haqqında» degen kitabında Sadi Karno jıllılıqtın' jumıska aylanıwının' sha'rtlerin izertledi<sup>8</sup>. Biraq sol waqıtları Karno teplotod teoriyası ko'z-qaraslarında turdı ha'm sonlıqtan ol termodinamikanın' ekinshi baslamasının' anıq formulirovkasın bere almadı<sup>9</sup>. Anıq formulirovka 1850-1851 jılları bir birinen g'a'rezsiz nemis fizigi Rudolf Klauzius ha'm SHotlandiya fizigi Vilyam Tomson (lord Kelvin) ta'repinen berildi. Olar termodinamikanın' ekinshi baslamasın an'latatug'ın tiykarıg'ı postulattı keltirip shıg'ardı ha'm onnan baslı na'tiyjelerdi aldı.

<sup>8</sup> Yag'nıy R.Mayer, Djoul ha'm Gelmgolts ta'repinen termodinamikanın' birinshi baslaması ashılmastan burın.

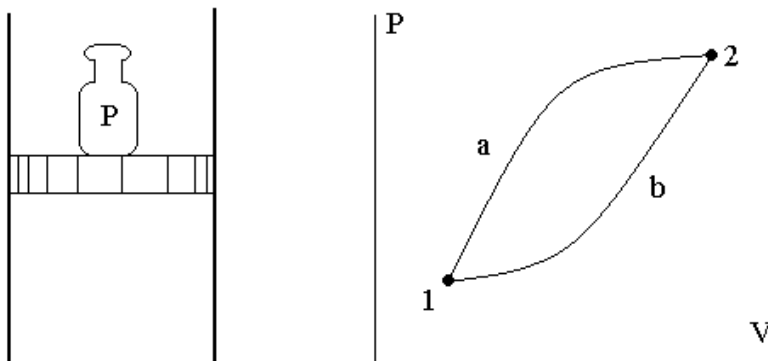
<sup>9</sup> Keyinirek ol teplotod teoriyası ko'z-karaslarınan bas tarttı.



## Termodinamikanın' ekinshi baslamasin an'latatug'ın tiykarg'ı postulattın' ha'r qıylı anıqlamaları

İzolyatsiyalang'an sistema denelerinin' baslang'ısh halının' qanday bolıwına qaramastan bul sistemada aqır-ayag'ında barlıq makroskopiyalıq protsessler toqtaytug'ın termodinamikalıq ten' salmaqlıq orıyadı. Bul awhal termodinamikada a'hmiyetli orındı iyeleydi ha'm *postulat tu'rinde qabıl* etiledi. Bul postulattı *termodinamikanın' ulıwmalıq baslaması* dep te ataydı.

Termodinamikanın' ekinshi baslamasının' anıqlamasın beriw ushın ideyalardıń tariyxıy rawajlanıwına sa'ykes jıllılıq mashinasının' jumısın sxema tu'rinde ko'remiz.



Mashinanın' tsilindirinde (su'wrette keltirilgen) jumısshı dene dep atalatug'ın gaz yamasa basqa zat bar bolsın. Anıqlıq ushın jumısshı deneni gaz dep esaplaymız. Meyli PV diagrammasında jumısshı denenin' da'slepki halı 1 noqatı menen belgilensin. TSilindrdin' tu'bin temperaturası sol denenin' (Yag'nıy tsilindrdegi gazdin') temperaturasınan joqarı bolg'an *qızdırg'ısh* penen jıllılıq kontaktına alıp kelemiz. Gaz kızadı ha'm ken'eyedi – bul protsess 1a2 sıızıg'ı menen su'wretlengen. Jumısshı dene qızdırg'ıshın  $Q_1$  jıllılıg'ın aladı ha'm  $A_1$  ge ten' on' ma'nisli jumıs isleydi. Birinshi baslama boyınsha

$$Q_1 = U_2 - U_1 + A_1.$$

Endi porshendi da'slepki halına alıp keliw kerek, Yag'nıy gazdı kısıwımız kerek. Buni qısılg'anda islengen jumıs  $A_2$  nin' shaması  $A_1$  din' shamasınan kishi bolatug'ınday etip a'melge asırıwımız kerek. Usınday maqset penen tsilindrdin' tu'bin temperaturası tsilindrdegi gazdin' temperaturasınan to'men bolg'an *salqınlatqısh* penen jıllılıq kontaktına keltiremiz ha'm 2b1 jolı menen gazdı qısamız. Na'tiyjede gaz da'slepki 1-halga qaytıp keledi ha'm usı protsesstin' barısında salqınlatqıshqa  $Q_2$  jıllılıg'ın beredi. Birinshi baslama boyınsha

$$-Q_2 = U_1 - U_2 - A_2.$$

Bunnan  $Q_1 = U_2 - U_1 + A_1$  formulası menen kombinatsiyanı paydalansaq

$$Q_1 - Q_2 = A_1 - A_2$$

ekenligi kelip shıg'adı. Solay etip mashina aylanbalı protsessti basın keshirdi. Usının' na'tiyjesinde qızdırg'ısh  $Q_1$  jıllılıg'ın berdi, salqınlatqısh  $Q_2$  jıllılıg'ın aldı.  $Q = Q_1 - Q_2$  jıllılıg'ı  $A_1 - A_2$  jumısın islewge jumsaldı.

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$

qatnası jıllılıq mashinasının *paydalı ta'sir koeffitsienti* yamasa *ekonomikalıq paydalı ta'sir koeffitsienti* dep ataladı.

Salqınlatqıshsız da'wirli ra'wishte isleytug'ın jıllılıq mashinasın sog'ıw mu'mkin be degen soraw tuwıladı. Bunday jag'dayda  $Q_2 = 0$  ha'm sog'an sa'ykes  $\eta = 1$ . Bunday mashina qızdırg'ishtan alıng'an jıllılıqtı tolıg'ı menen jumısqa aylandırg'an bolar edi. Bunday mashinanın' mu'mkin ekenligi energıyanın' saqlanıw nızamına qayshı kelmeydi ha'm o'zinin' a'meliy a'hmiyeti boyınsha perpetuum mobileden to'men bolmas edi. Bunday jıllılıq mashinası okeanlar menen ten'izlerdin' suwlarındağ'ı, atmosferadağ'ı, Jerdin' ishki qabatlarındağ'ı derlik tewsilmeytug'ın ishki energıyanı mexanikalıq energıyag'a aylandırg'an bolar edi. Bunday mashınanı Vilgelm Ostvald (1853-1932) *ekinshi a'wlad perpetuum mobile* dep atadı. Al *birinshi a'wlad perpetuum mobile* bolsa hesh na'rsesiz jumıs islewi kerek. Bul energıyanın' saqlanıw nızamı ta'repinen tolıq biykarlanadı.

Sadi Karnonın' o'zi bunday mashinanın' printsipiallıq jaqtan mu'mkin emes ekenligin tu'sindi. Jıllılıq dvigatellerinin' jumısın ol suw dvigatellerinin' jumısı menen salıstırdı. Bunday dvigatellerde jumıs suwdın' joqarıdan to'menge karay tu'siwinin' esabınan islenedi. Usıg'an sa'ykes Karno jıllılıq mashinalarında jumıstın' isleniwi jıllılıqtın' joqarıraq qızdırılğ'an denelerden to'menirek qızdırılğ'an denelerge beriliwinin' saldarınan boladı dep esapladı. Usı analogiya tiykarında S.Karno biz keyinirek tanısatug'ın bir katar durıs juwmaqlarg'a keldi. Sonın' menen birge Karno o'zinin' zamanlasları menen jıllılıq do'retilmeydi de, joq etilmeydi de dep nadurıs tu'sindi (teplorod teoriyası).

Ta'jiriybeler juwmaqları ekinshi a'wlad perpetuum mobilelerdi do'retiwdin' mu'mkin emes ekenligin ko'rsetedi. Sonın' ushın usınday perpetuum mobileni sog'ıwdın' mu'mkin emes ekenligi postulat rangasına ko'terildi. Bul *termodinamikanın' ekinshi nızamının' postuladı* bolıp tabıladı ha'm ta'jiriybede alıng'an na'tiyjelerdi ulıwmalastırıw jolı menen keltirilip shıg'arılğ'an. Bul postulattın' da'lili usı postulattan kelip shıg'atug'ın barlıq na'tiyjelerdin' ta'jiriybeler na'tiyjeleri menen sa'ykes keliwinde bolıp tabıladı. Sonlıqtan termodinamikanın' ekinshi baslamasının' postuladı isenimli eksperimentallıq tiykar u'stinde tur.

Termodinamikanın' ekinshi baslamasının' postulattın' u'sh da'l formulirovkasın keltiremiz:

1. Vilyam Tomson (ilimde qosqan u'lesleri ushın keyinirek lord Kelvin degen attı aldı) 1951-jılı termodinamikanın' ekinshi baslamasının' to'mendegidey anıqlamasın berdi: «*Birden bir na'tiyjesi jıllılıq saqlag'ıshtı salqınlatıw arqalı jumıs isleytug'ın aylanbalı protsesstin' ju'riwi mu'mkin emes*».

Jıllılıq saqlag'ıshı dep ishki energıya zapasına iye deneni yamasa ishki energıya zapasına iye o'z-ara termodinamikalıq ten' salmaqlıqta turg'an deneler sistemasın tu'sinemiz. Biraq jıllılıq saqlag'ıshın' o'zi makroskopiyalıq jumıs islemeydi, al tek g'ana o'zinin' ishki energıyasın basqa deneg'e yamasa basqa deneler sistemasına beredi. Eger sistema jıllılıq saqlag'ıshın' ishki energıyası esabınan jumıs isleytug'ın bolsa, onda ol termodinamikada *jumısshı dene (jumıs isleytug'ın dene)* dep ataladı. Solay etip Tomson boyınsha: «*Birden bir na'tiyjesi jıllılıq saqlag'ıshın' ishki energıyasının' esabınan jumıs isleytug'ın aylanbalı protsesstin' ju'riwi mu'mkin emes*».

2. Sırtqı jumıs islew degenimiz neni an'latatug'ınlıg'ın ha'm tiykarg'ı postulattın' anıqlamaların qanday jollar menen alıng'anlıg'ın ayqınlastırıw mu'mkin. Sol anıqlamaların' biri M.Plankke

(1858-1947) tiyisli. Onın' ma'nisi tomendegidey: «Birden bir na'tiyjesi jıllılıq saqlag'ıshı salqınlatıw arqalı ju'kti ko'teriw bolg'an da'wirli ha'reket etetug'in mashınanı sog'ıw mu'mkin emes».

Plank bergen anıqlamadag'ı mashınanın' da'wiriligin atap o'tiw a'hmiyetli na'rse. Tap sol sıyaqlı Tomson anıqlamasında da protsesstin' aylanbalı bolıwı a'hmiyetke iye. Haqıyqatında da birdin bir na'tiyjesi ju'kti ko'teriw bolg'an jıllılıq saqlag'ıshın' ishki energiyası esabınan isleytug'in protsesstin' (aylanbalı emes protsesstin') ju'riwi mu'mkin. Plank mınaday misal keltiredi: Meyli porsheni bar tsilindrde ideal gaz jaylasqan bolsın. Porshen u'stinde salmag'ı P bolg'an ju'k tursın. TSilindrın' ultanın jetkilikli da'rejede u'lken, al temperaturası ideal gazdan' temperaturasınan sheksiz kishi shamag'a joqarı bolg'an jıllılıq saqlag'ısh penen tutastıramız. Keyin porshendi sheksiz kishi portsiyalar menen ju'kley baslaymız. Bunday jag'dayda gaz ju'kti ko'terip izotermalıq ra'wishte ken'eye baslaydı ha'm ju'kti ko'teriw boyınsha A jumısın isleydi. Birinshi baslama boyınsha

$$Q = U_2 - U_1 + A.$$

İdeal gazdın' ishki energiyası tek U tek temperaturadan g'a'rezli bolg'anlıqtan (izotermalıq protsesste ishki energiya o'zgermeydi)  $Q = A$  sha'rti orınlanadı. Solay etip jıllılıq saqlag'ıshın alıng'an Q jıllılıg'ı tolıg'ı menen ju'kti ko'teriw ushın jumsaldı. Bul termodinamikanın' ekinshi baslamasına qayshı kelmeydi, sebebi bul protsess aylanbalı protsess, al mashına da da'wirli ha'reket etetug'in mashına emes. Eger qanday da bir usıllar menen ju'kti ko'terilgen halda kaldırıp, gazdı bolsa kısıp da'slepki halına alıp kelinetug'in ha'm porshendi de sırttag'ı barlıq denelerde hesh qanday o'zgeris bolmaytug'ınday etip ornına kaytarıp alıp kelinse (a'llette jıllılıq saqlag'ıshın' jıllılıqtın' kemeygenligin esapqa almaymız) termodinamikanın' ekinshi postuladı menen qarama-qarsılıq payda bolg'an bolar edi. Sebebi termodinamikanın' ekinshi baslamasının' postuladı bunday o'zgerislerdi hesh kanday usıl menen a'melge asırıw mu'mkin emes dep tastıyıqlaydı.

Plank anıqlaması Tomson anıqlamasınan tek forması menen g'ana o'zgeshe. Endigiden bılay Tomson-Plank protsessi dep birden bir na'tiyjesi jıllılıq saqlag'ıshı salqınlatıw menen jumıs islenetug'in aylanbalı protsesstin' ju'riwi mu'mkin emes dep aytamız. Onda postuladı mına tastıyıqlawg'a alıp kelinedi: *Tomson-Plank protsessinin' ju'riwi mu'mkin emes.*

Klauzius (1822-1888) 1850-jılı tiykarg'ı postulattın' pu'tkilley basqa anıqlamasın berdi. Ol mınaday jag'daydı usındı: «Jıllılıq to'menirek qızdırıl'g'an deneden joqarı qızdırıl'g'an deneg'e o'zinshe<sup>10</sup> o'te almaydı». Jıllılıq dep bul jerde ishki energiyanı tu'siniw kerek. Bul jerde eki dene jıllılıq kontaktına kelse barlıq waqıtta da jıllılıq ko'birek qızdırıl'g'an deneden kemirek qızdırıl'g'an deneg'e o'tedi degen kelip shıqpaydı. Bunday etip tastıyıqlaw fizikalıq nızamnın' ma'nisin quramaydı, al tek g'ana qaysı deneni ko'birek qızdırıl'g'an, al kaysı deneni kemirek qızdırıl'g'an dep esaplawg'a g'ana baylanışlı. Jıllılıqtın' o'tiwi (da'liregi ishki energiyanın' bir deneden ekinshi deneg'e o'tiwi) tek jıllılıq kontaktında emes, al basqa da ko'p sandag'ı usıllar menen a'melge asadı. Mısalı barlıq deneler ko'zge ko'rinetug'in yamasa ko'zge ko'rinbeytug'in nurlardı (elektromagnit tolqınların) shıg'aradı ha'm jutadı. Bir denenin' nurlanıwın linza yamasa sfaralıq ayna menen ekinshi deneg'e jıynap, usı usıl menen ekinshi deneni qızdırıwg'a boladı. Biraq barlıq o'tiwler mu'mkin emes. Klauzius postulattının' ma'nisi mınadan ibarat: kemirek qızdırıl'g'an deneden jıllılıqtı alıp, onı tolıg'ı menen ko'birek qızdırıl'g'an deneg'e ta'biyatta basqa hesh kanday o'zgeristi boldırmay alıp beriwdin' hesh qanday usılı joq. Usınday etip alıp

<sup>10</sup> «O'zinshe» degen so'z ayıl'g'anda a'tiraptag'ı basqa denelerde hesh kanday o'zgeristin' bolmawı na'zerde tutiladı.

beriwdin' kewildegі protsessi *Klauzius protsessi* dep ataladı. Solay etip *Klauzius protsessinin' mu'mkin emes* ekenligin postulat tastıyqlaydı.

## **Termodinamikanın' ekinshi baslamasına baylanıslı ma'seleler**

1. Klauzius A'lemde tuyıq sistema dep qarap termodinamikanın' ekinshi baslamasının' mazmunın «A'lemnin' entropiyası maksimumg'a umtıladı» dep tastıyqlawg'a alıp keldi. Usı maksimumg'a jatken waqıtta A'lemdegi barlıq protsessler toqtaydı. Haqıyqatında da, ha'r bir protsess entropiyanın' o'siwine alıp keledi. Entropiya o'zinin' maksimumına jetkenlikten bunday protsesstin' ju'riwi mu'mkin emes. Solay etip Klauzius boyınsha A'lemde en' aqırında absolyut ten' o'lshewli haldın' ornawı kerek. Bunday halda hesh bir protsesstin' ju'zege keliwi mu'mkin emes. Bunday hal «A'lemnin' jıllılıq o'limi» dep ataldı. Biraq usınday juwmaq shıg'arıw ushın entropiya tu'sinigin yamasa onın' o'siw nızamın paydalanıp otırıwdın' keregi joq. Haqıyqatında da bul juwmaq pu'tkil A'lem ushın paydalanılǵ'an termodinamikanın' ulıwmalıq baslaması bolıp tabıladı. Biraq termodinamikanın' ulıwmalıq baslaması da, entropiyanın' o'siw nızamı da *shekli sistemalarg'a* tiyisli ta'jiriybede alıng'an mag'lıwmatlardı ulıwmalastırıw jolı menen keltirilip shıg'arılǵ'an. Olardı A'lem ushın qollanıw ekstropolyatsiya bolıp tabıladı. Al bunday ekstropolyatsiya ushın tiykar joq. A'lem bolsa tutası menen u'zliksiz ha'm monotonlı ra'wishte evolyutsiyag'a ushıray aladı ha'm sonın' na'tiyjesinde hesh qashan termodinamikanıq ten' salmaqlıqqa kelmewi mu'mkin. Usınday mu'mkinshilikke Eynshteynnin' gravitatsiya teoriyasında jol qoyıladı: gravitatsiyalıq maydanlardın' bar bolıwının' saldarınan gigant kosmologiyalıq sistemalar u'zliksiz tu'rde entropiyanın' o'siw ta'repine qaray evolyutsiyalanadı. Sonın' menen birge entropiyanın' maksimumı halına hesh kashan da kelmeydi. Sebebi A'lem ushın bunday hal bolmaydı.

A'lemnin' jıllılıq o'limi kontseptsiyasına basqasha sındı Boltsman berdi. Onın' ma'nisi to'mendegilerden ibarat.

Entropiyanı termodinamikalıq ko'z-qarastan anıqlag'anda bul tu'siniktin' termodinamikalıq *ten' salmaqlı emes protsesslerge* paydalang'anda bir qansha qıyınshılıqlarg'a alıp keletug'inlıg'ı ma'lim. Boltsman ta'repinen alıng'an  $S = k \ln P$  formulası usı qıyınshılıqlardan qutılıwdın' printsiptiallıq usılın beredi. Bul formulag'a *entropiyanın' anıqlaması* sıpatında qaraw lazım. Biraq bul anıqlamanın' ayqın tu'rdegi ma'nige iye bolıwı ushın za'ru'r bolg'an barlıq jag'daylar ushın hallardın' itimallıqların esaplaw usılları menen tolıqtırıw kerek. Biraq bunı islemesede *entropiyanın' usınday etip tu'singende onın' o'siw nızamının' xarakterinin' pu'tkilley o'zgeretug'inlıg'ı ko'rinip tur. Ol (nızam) o'zinin' absolyutlılıg'ın jog'altadı ha'm statistikalıq nızamg'a aylanadı. Tuyıq sistemanın' entropiyası tek o'se bermeydi, al kemeye de aladı. Eger jetkilikli da'rejede ko'p waqt ku'tip turılsa entropiya haqıyqatında da kemeyedi.* Biraq kemeyiw protsessi bunnan keyin o'siw protsessi menen almasadı. Bunday jag'dayda «termodinamikanın' ekinshi baslamasınan ne qaladı?» degen soraw tuwıladı. Onın' fizikalıq ma'nisi neden ibarat? Onın' ma'nisi bilayınsha tu'sindiriledi: qanday da bir haldan keyin basım ko'pshilik jag'dayda bul halg'a qarag'anda itimallıg'ı joqarıraq bolg'an hal ju'zege keledi. Eger sistema u'lken bolsa, al onın' da'slepki halı ten' salmaqlıq halına onsha jaqın bolmasa, onda sistemanın' itimallıg'ı kem bolg'an hallarg'a o'tiwinin' itimallılıg'ı sonshama kishi itimallıqqa iye bolıp, praktikada hesh qanday a'hmiyetke iye bolmaydı. Bunday jag'dayda entropiyanın' o'siw nızamı a'melde absolyut da'llikte aqlanadı.

2. Joqarıda Klauzius ta'repinen usınılg'an A'lemnin' jıllılıq o'limi kontsetsiyası ga'p etilgen edi. Bul kontseptsiyag'a Boltsman ta'repinen qarama-qarsı ma'niske iye bolg'an *fluktuatsiyalıq gipoteza* dep atalatug'ın kontseptsiya islenip shıg'ıldı. Boltsman termodinamikanın' ekinshi nızamının' pu'tkil A'lem ushın qollanıla alınatug'inlıg'ın biykarlag'an joq. Biraq termodinamikanın' ekinshi baslaması statistikalıq nızam ha'm usıg'an baylanıslı

termodinamikalıq ten' salmaqıqtın' buzılıwına alıp keletug'ın fluktuatsiyalardıń orın alıwınan qashıp bolmaydı. A'lemnin' ha'zirgi waqıtlardag'ı halı ten' salmaqıq hal emes. Bul haldı Boltsman gigant fluktuatsiya dep esapladı. Bul fluktuatsiyanın' jog'alıwı kerek. Bunday jag'dayda A'lemnin' jıllılıq o'limi baslanadı. Biraq bul hal waqıtsha hal bolıp tabıladı. Bazı bir waqıt o'tkennen keyin ja'ne de tap sol sıyaqlı gigant fluktuatsiya orın aladı ha'm A'lem jıllılıq o'limi halınan qaytadan shıg'adı. Eger Klauziustın' kontseptsiyası boyınsha jıllılıq o'limi A'lemnin' qaytıp shıg'a almaytug'ın en' aqırğ'ı halı bolsa, Boltsman boyınsha A'lem da'wirli tu'rde jıllılıq o'limi halına keledi ha'm o'zinen o'zi bunday haldan shıg'adı. Biraq birinen son' biri keletug'ın gigant fluktuatsiyalar arasındag'ı waqıtlardıń u'lkenligi sol hallardıń jasaw waqıtlarınan ju'da' u'lken boladı. Sonlıqtan fluktuatsiyalıq gipoteza boyınsha A'lemdi «jıllılıq o'limi» halında «derlik barlıq waqıt jasaydı» dep esaplaw mu'mkin.

Solay etip fluktatsiyalıq gipoteza Klauzius kontseptsiyasınan tu'p tiykarınan ayrıladı. Biraq sonın' menen birge derlik birdey aqırğ'ı juwmaqqa keledi (A'lem «jıllılıq o'limi» halında «derlik barlıq waqıt jasaydı»). Sonlıqtan termodinamikanın' ekinshi baslamasın statistikalıq nızam dep qarasaq ta, onı A'lemge ekstrapolyatsiya kılıwg'a bolmaydı.

3. Termodinamikada entropiya ıqtıyarlı additiv turaqlı da'lligine shekem anıqlanadı. Fizikalıq ma'niske entropiyanın' o'zi emes, al olardıń ayırması iye boladı. Biraq Boltsmannın'  $S = k \ln G$  formulası entropiyanı sistemanın' itimallılıg'ı arqalı bir ma'nisli anıqlaydı. Bul bazı bir qarama-qarsılıqtın' bar ekenligindey pikirge alıp keledi. Eger itimallıqtı bir ma'nisli etip anıqlawdın' sha'rt emes ekenligin itibarg'a alsaq, qarama-karsılıq tolıg'ı menen jog'aladı. *Ha'r qanday hallardag'ı itimallıqlardıń o'zleri bir ma'nisli anıqlanbaydı, al sol ha'r qanday hallardag'ı itimallıqlardıń qatnasları bir ma'niske iye boladı.* Sonlıqtan itimallıqlardıń o'zlerinin' ıqtıyarlı additiv turaqlı C da'lligine shekem anıqlanatuğ'ınlıg'ı kelip shıg'adı<sup>11</sup>. Demek itimallıq ıqtıyarlı additiv turaqlı C da'lligine shekem anıqlanadı. Sanlı ko'baytışshınin' bar ekenligi S ushın jazılğ'n formulada  $\ln C$  additiv turaqlısınin' payda bolıwında ko'rinedi.

Eger itimallıq  $S = k \ln G$  sha'rti menen normirovkalang'an bolsa, onda ol *matematikalıq itimallıq* dep ataladı. Boltsman formulasın paydalang'anda Plank ta'repinen usınılg'an normirovkanın' paydalang'an qolaylı. Bunday jag'dayda barlıq itimallıqlar (eger olar mu'mkin bolsa) pu'tin sanlar menen an'latıladı. Usınday etip normirovkalang'an itimallıqtı *statistikalıq salmaq* yamasa *haldın' termodinamikalıq itimallıg'ı* dep ataydı. Statistikalıq salmaqı biz G ha'ripi menen belgileymiz ha'm Boltsman formulasın  $S = k \ln G$  tu'rinde jazamız.

## Termodinamikanın' ekinshi baslamasın ha'r qıylı tu'siniw

«Termodinamikanın' ekinshi baslaması» tu'sinigi fizikada shama menen 130 jıldan artıq waqıttan beri qollanıladı. Biraq usı waqıtlarg'a shekem ha'r qıylı avtorlar ha'r kıylı mazmun beredi. Bul ma'sele terminologiyalıq ma'sele bolsa da, usı ma'selege kewil bo'liw paydalı. Ekinshi baslama sıpatında tiykarğ'ı postulattı qollanatuğ'ın avtorlar ma'seleni durıs tu'sinedi. Tiykarğ'ı postulat degende Tomson-Plank postulatın, Klauzius postulatın ha'm olarg'a ekvivalent bolg'an tastıyıqlawlardı tu'sinemiz.

Basqa avtorlar ekinshi baslamanın' ma'nisin tiykarğ'ı postulattın' to'mendegidey jag'daylarına alıp keledi: 1) entropiya S tin' hal funktsiyası ekenligine, 2) entropiyanın' o'siw printsipine. Bul eki jag'day logikalıq jaqtan bir birine g'a'rezli emes (T.A.Afanaseva-Erenfest, 1876-1964). Haqıyqatında da S funktsiyasınin' bar ekenligi tiykarğ'ı postulattın' anıqlamasında sa'wlelengen ta'biyiy protsesslerdin' qaytımsızlıg'ınan pu'tkilley g'a'rezli emes. Bul mınadan ko'rinedi:

<sup>11</sup> Birden bir mu'mkin bolg'an barlıq ha'm bir biri menen sa'ykes kelmeytug'ın waqıyalardıń qosındısı  $P_1 + P_2 + \dots + P_n = 1$  etip aling'anlıqtan bul jag'daydı tu'siniw qıyın emes.

entropiya  $S$  tin' bar ekenliginin' da'lilinin' tiykarına ma'nisi qarama-qarsı bolg'an postulattı qoyıw mu'mkin (mısalı «birden bir na'tiyjesi mexanikalıq jumıstın' esabınan jıllılıq saqlag'ıstı qızdırıw bolg'an aylanbalı protsesstin' bolıwı mu'mkin emes»). Entropiyanın' o'siwinin' da'lili bolsa tiykarg'ı postulatqa su'yenedi (og'an karama-qarsı tastıyıqlawg'a emes). Eger keri tastıyıqlaw durıs bolatug'ın bolsa adiabatlıq izolyatsiyalang'an istemanın' entropiyası o'spey, kishireygen bolar edi.

Bir kansha avtorlar Afanaseva-Erenfesttin' mısalınday termodinamikanın' ekinshi baslaması degende tiykarg'ı postulattın' tek bir na'tiyjesin, atap aytqanda entropiyanın' hal funktsiyası sıpatında bar bolatug'ınlıg'ın aladı. Bunday tu'siniwge mına jag'day tiykar boladı: termodinamikanın' ekinshi baslamasınan keltirilip shıg'arılatus'ın ten'likler tu'rindegi qatnaslar entropiyanın' tek bir qa'siyetin – onın' sheksiz kishi o'siminin' tolıq differentsial bolatug'ınlıg'ın paydalanadı.

## Termodinamikalıq funktsiyalar

Termodinamikada entropiya menen bir katarda usı entropiya menen baylanısqa ko'p sandag'ı hal funktsiyaları qollanıladı. Olardıń en' baslıların karap o'temiz.

Eger protsess kvazistatikalıq bolsa  $\delta Q = TdS$ . Bunday protsess ushın birinshi baslamanın' ten'lemesi

$$\delta Q = dU + PdV \quad (q1)$$

nı bılayınsha ko'shirip jazamız

$$dU = TdS - PdV. \quad (q2)$$

Eger entalpiya  $I = U + PV$  nı paydalansaq, onda  $U$  dı jog'altıp

$$dI = TdS + VdP \quad (q3)$$

ekenligine iye bolamız.

$TdS = \delta Q$  bolg'anlıqtan turaqlı basımda  $dI = \delta Q$ . Bunnan entalpiyanın' turaqlı basımdag'ı kvazistatikalıq protsesste o'simi sistema ta'repinen alıng'an jıllılıq  $Q$  g'a ten' bolg'an hal funktsiyası ekenligi kelip shıg'adı. Usıg'an baylanıslı entalpiyanı *jıllılıq funktsiyası* yamasa *jıllılıq saqlaw* dep te ataydı.

Termodinamikada ayrıqsha a'hmiyetli orınlardı eki hal funktsiyası iyeleydi: Gelmgolts ta'repinen kirgizilgen *erkin energiya*  $\Psi$  ha'm Gibbs ta'repinen kirgizilgen *termodinamikalıq potentsial*  $\Phi$ . Bul hal funktsiyaları to'mendegidey an'latpalar menen anıqlanadı

$$\Psi = U - TS, \quad (q4)$$

$$\Phi = \Psi + PV = U - TS + PV. \quad (q5)$$

Olardın' differentsialları ushın alamız:

$$d\Psi = -SdT - PdV, \quad (q6)$$

$$d\Phi = -SdT + VdP. \quad (q7)$$

İzotermalıq protsesste  $dT = 0$ , sonlıqtan  $d\Psi = -PdV = \delta A$ . Bunnan  $A = \Psi_1 - \Psi_2$ . Demek erkin energiya hal funktsiyası bolıp tabıladı, onın' kvazistatikalıq izotermalıq protsesstegi kemeyiwı sistema ta'repinen islengen jumıstı beredi.

(q2), (q3), (q6), (q7) qatnasları U ishki energiyanı S ha'm V argumentlerinin', I entalpiyanı S ha'm P argumentlerinin',  $\Psi$  erkin energiyanı T ha'm V argumentlerinin',  $\Phi$  termodinamikalıq potentsialın T ha'm P argumentlerinin' funktsiyaları tu'rında karaw mu'mkin degen oyg'a alıp keledi:

$$U = U(S, V),$$

$$I = I(S, P), \quad (q8)$$

$$\Psi = \Psi(T, V),$$

$$\Phi = \Phi(T, P).$$

Usınday tu'rdegi (a'wlad) qatnaslar zat halının' *kanonikalıq ten'lemeleri* dep ataladı. Olar termodinamikag'a Gibbs ta'repinen sistemalı tu'rde kirgizildi. Gibbs usı kanonikalıq ten'lemelerdin' ha'r qaysısı zatların' qa'siyetleri haqqında termo yamasa kaloriyalıq hal ten'lemelerine qarag'anda bayıraq informatsiyalardı beretug'ınlıg'ın atap o'tti. (q8) *de keltirilgen qaysı formada alıng'anlıg'ına karamastan kanonikalıq hal ten'lemeleri zattın' jıllılıq (termikalıq) ha'm kaloriyalıq qa'siyetleri haqqında tolıq mag'lıwmatlarg'a iye boladı.* Haqıyqatında da (q8) den to'mendegilerdi alamız:

$$\begin{aligned} dU &= \left( \frac{\partial U}{\partial S} \right)_V dS + \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_S dV, \\ dI &= \left( \frac{\partial I}{\partial S} \right)_P dS + \left( \frac{\partial I}{\partial P} \right)_S dP, \\ d\Psi &= \left( \frac{\partial \Psi}{\partial T} \right)_V dT + \left( \frac{\partial \Psi}{\partial V} \right)_T dV, \\ d\Phi &= \left( \frac{\partial \Phi}{\partial T} \right)_P dT + \left( \frac{\partial \Phi}{\partial P} \right)_T dP. \end{aligned} \quad (q9)$$

Bul qatnaslardı (q2), (q3), (q6) ha'm (q7) an'latpaları menen salıstırıw to'mendegilerdi beredi:

$$T = \left( \frac{\partial U}{\partial S} \right)_V, \quad P = - \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_S \quad (q9)$$

$$T = \left( \frac{\partial I}{\partial S} \right)_P, \quad V = \left( \frac{\partial I}{\partial P} \right)_S \quad (q10)$$

$$S = -\left(\frac{\partial \Psi}{\partial T}\right)_V, \quad P = -\left(\frac{\partial \Psi}{\partial V}\right)_T, \quad (q11)$$

$$S = -\left(\frac{\partial \Phi}{\partial T}\right)_P, \quad V = -\left(\frac{\partial \Phi}{\partial P}\right)_T. \quad (q12)$$

Keltirilip shıg'arılǵ'an ten'lemelerdin' kelip shıg'atug'ın eki jag'daydı atap o'temiz:  $\Psi$  ha'm  $\Phi$  funktsiyalarınan' anıqlamalarınan  $U = \Psi + TS$ ,  $I = \Phi + TS$  ekenligi kelip shıg'adı. Usı an'latpalarg'a (q11) ha'm (q12) an'latpalarınan entropiya ushın an'latpalardı qoyıp mına formulalardı alamız

$$U = \Psi - T\left(\frac{\partial \Psi}{\partial T}\right)_V, \quad (q13)$$

$$I = \Phi - T\left(\frac{\partial \Phi}{\partial T}\right)_P. \quad (q14)$$

Bul ten'lemeler *Gibbs-Gelmgolts* ten'lemeleri dep ataladı. Usı ten'lemelerden alınatug'ın paydanı atap o'temiz. Ko'p jag'daylarda  $\Psi$  erkin energiyasın tek temperaturag'a g'a'rezli bolg'an qosımsha da'lliginde an'sat anıqlawg'a boladı. Bunı sistema ta'repinen islenetug'ın izotermalıq jumıstı esaplaw arqalı a'melge asıradı. Bunday jag'dayda (q13) formulası tap sonday anıqsızlıqta sistemanın' ishki energiyasın esaplawg'a da mu'mkinshilik beredi.

Eger  $U=U(S,V)$  funktsiyası belgili bolsa, onda onı  $S$  ha'm  $V$  boyınsha differentsiallaw arqalı sistemanın' temperaturası menen basımın anıqlaw mu'mkin (Yag'nıy termo qa'siyetler haqqında tolıq mag'lıwmatlar alıwg'a boladı). Bunnan keyin (q1) formulası ja'rdeminde  $\delta Q$  dı ha'm sa'ykes jıllılıq sıyımlıqların anıqlawg'a boladı. Bunday jag'dayda kaloriyalıq qa'siyetler haqqında tolıq mag'lıwmatlar alınadı. Tap sonday esaplawlardı qalg'an u'sh kanonikalıq hal ten'lemelerinen de alıw mu'mkin.

Endi (q9) qatnasların ja'ne bir ret differentsiallaw arqalı tabamız:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S = \frac{\partial^2 U}{\partial S \partial V}, \quad \left(\frac{\partial P}{\partial S}\right)_V = -\frac{\partial^2 U}{\partial V \partial S}.$$

Bunnan matematikalıq analizdin' belgili bolg'an differentsiallawdın' ta'rtibin o'zgertiw haqqındag'ı teoremedan

$$\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S = -\left(\frac{\partial P}{\partial S}\right)_V$$

ekenligi kelip shıg'adı. Tap sol sıyaqlı

$$\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_S = \left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_P, \quad (q16)$$

$$\left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T = \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V, \quad (q17)$$



$$\left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T = -\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P. \quad (q18)$$

Usı ha'm usıg'an uqsas katnaslar *Maksvell qatnasları* dep ataladı. Bul qatnaslar sistemanın termodinamikalıq ten' salmaqlıq halın xarakterlewshi shamalar arasındag'ı qatnaslardı keltirip shıg'arıw ushın ken'nen qollanıladı. Keltirip shıg'arıwdın' usınday usılın (metodın) *termodinamikalıq funktsiyalar usılı* yamasa *termodinamikalıq potentsiallar usılı* dep ataladı. Bunı tu'sindiriw ushın eki mısál keltiremiz:

1-mısál. SHeksiz kishi kvazstatikalıq izotermalıq protsessti qaraymız. (q2) qatnasın dV g'a bo'lip

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = T\left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T - P$$

an'latpasın alamız yamasa (q17) den mınag'an iye bolamız:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = T\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T - P. \quad (q19)$$

2-mısál. Usınday protsess ushın dP g'a bo'liw arqalı (q3) ten

$$\left(\frac{\partial I}{\partial P}\right)_T = T\left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T + V,$$

al (q18) tiykarında

$$\left(\frac{\partial I}{\partial P}\right)_T = V - T\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P \quad (q20)$$

an'latpaların alamız. Bunday an'latpalardı basqa da usıllar menen alıw mu'mkin (mısalı tsikller usılı). Biraq termodinamikalıq funktsiyalar usılı basqa usıllarg'a salıstırğ'anda a'piwayıraq.

Ga'p etilgen I,  $\Psi$  ha'm  $\Phi$  funktsiyaları *eki erkinlik da'rejesine iye* sistemalar ushın alıng'an edi (Yag'nıy ishki halları eki parametr menen anıqlanatug'ın sistemalar). Joqarıda aytlıg'anlardı esapqa alıp sol an'latpalardı *ko'p sandlı erkinlik da'rejesine iye sistemalar* ushın da ulıwmalastırıwğ'a boladı. Bunın' ushın barlıq an'latpalardag'ı  $\delta A = PdV$  an'latpasın  $\delta A = A_1dA_1 + A_2dA_2 + \dots + A_ndA_n$  an'latpası menen almasıwıw kerek. Sonda to'mendegidey anıqlamalar alınadı:

$$I = U + \sum A_i a_i \text{ (entalpiya)}, \quad (q21)$$

$$\Psi = U - TS \text{ (erkin energiya)} \quad (q22)$$

$$\Phi = \Psi + \sum A_i a_i \text{ (termodinamikalıq potentsial)} \quad (q23)$$

Ca'ykes funktsiyalardıń differentsialları ushın iye bolamız:

$$dU = TdS - \sum A_i da_i, \quad (q24)$$

$$dI = TdS + \sum a_i dA_i, \quad (q25)$$

$$d\Psi = -SdT - \sum A_i da_i, \quad (q26)$$

$$d\Phi = -SdT + \sum a_i dA_i. \quad (q27)$$

## Ten' salmaqlıq fluktuatsiyalar

Termodinamikalıq sistemanın' ten' salmaqlıq halların statistikalıq ta'riplew tarqalıw funktsiyası tiykarında onın' halının' makroskopiyalıq parametrlerin anıqlawg'a mu'mkinshilik beredi. Biraq qa'legen, ha'tte ten' salmaqlı sistemada, usınday orta ma'nislerden tosınnan bolatug'ın awıtqıwlar bolıp turadı. Bunday awıtqıwlarǵı eksperimentlerde sistemanın' halın ko'p waqıtlar dawamında o'lshewlerdin' barısında baqlaw mu'mkin. Mısalı gazdın' u'lken emes ko'leminin' temperaturasını joqarı da'llikte uzaq waqıtlar dawamında o'lshewlerdin' barısında ha'tte sırtqı jıllılıq ta'sirleri bolmag'anda da temperaturanın' tosınnan kishi shamalg'a o'zgeretug'ınlıg'ı baqlanadı. Basımnın' tosınnan o'zgerislerinin' bolatug'ınlıg'ın ortalıqtag'ı bo'lekshelerdin' xaotikalıq qozg'alısı (bunı broun qozg'alısı dep ataymız) ko'rsetedi.

Sistema halının' termodinamikalıq parametrlerinin' ortasha ma'nisinen tosınnan awıtqıwı *fluktuatsiyalar* dep ataladı. Fluktuatsiyalar termodinamikalıq sistemanın' bo'lekshelerinin' xaotikalıq jıllılıq qozg'alılarının' sebebinen boladı. Biz bul paragrafta ten' salmaqlıq sistemadag'ı fluktuatsiyalardı karap o'temiz. Bunday fluktuatsiyalar *ten' salmaqlıq fluktuatsiyaları* dep ataladı.

Meyli sistemanın' ten' salmaqlıq halı bazı bir  $\chi$  parametri menen ta'riplenetug'ın bolsın. Onın' ortasha ma'nisi  $\langle \chi \rangle$  g'a ten'. Bunday jag'dayda usı parametrdin' fluktuatsiyası onın' ma'nisinin' ortasha ma'nisten awıtqıwı tu'rinde anıqlanadı:

$$\Delta x = x - \langle x \rangle. \quad (1)$$

(1) formuladan fluktuatsiya  $\langle x \rangle$  tın' ortasha ma'nisinin' nolge ten' ekenligi ko'rinedi:

$$\langle \Delta x \rangle = \langle x - \langle x \rangle \rangle = \langle x \rangle - \langle x \rangle = 0. \quad (2)$$

Fluktuatsiyalardıń shamasın sanlıq jaqtan bahalaw ushın  $x$  parametrinin' awısıwının' ortasha kvadratının' onın' ortasha ma'nisinen awıtqıwın paydalanıwg'a boladı:

$$\langle (\Delta x)^2 \rangle = \langle (x - \langle x \rangle)^2 \rangle = \langle x^2 \rangle - 2\langle x \rangle \langle x \rangle + \langle x \rangle^2 - \langle x \rangle^2. \quad (3)$$

Tap usınday formulanı qa'legen  $\varphi(x)$  funktsiyasının' fluktuatsiyanın' ortasha kvadrati  $\Delta\varphi(x) = \varphi(x) - \langle \varphi(x) \rangle$ :

$$\langle (\Delta\varphi(x))^2 \rangle = \langle (\varphi(x))^2 \rangle - \langle \varphi(x) \rangle^2. \quad (4)$$

Fluktuatsiyalardı sanlıq jaqtan bahalaw ushın ortasha kvadrattan alıng'an kvadrat tu'bir ken' qollanıladı. Bul shama  $\sqrt{\langle (\Delta\varphi)^2 \rangle}$  bolıp tabıladı ha'm ortasha kvadratlıq fluktuatsiyalar dep ataladı. Onın' ortasha ma'niske qatnası  $\sqrt{\langle (\Delta\varphi)^2 \rangle} / \langle \varphi \rangle$  ortasha kvadratlıq salıstırmalı fluktuatsiya dep ataladı.

Joqarıda keltirilgen barlıq ortasha ma'nislerdi esaplag'anda belgili bolg'an  $\langle \varphi(x) \rangle = \int_a^b \varphi(x)f(x)dx$  formulasınan paydalanıw mu'mkin. Bul formula termodinamikalıq sistemanın' qa'legen parametrlerinin' ortasha ma'nisin tabıwg'a mu'mkinshilik beredi (eger onın' dinamikalıq parametrlerinin' tarqalıw funktsiyası belgili bolsa). Al termodinamikalıq sistemanın' ten' salmaqlıq halı ushın tarqalıw funktsiyasın tabıw ma'selesı jetkilikli ulıwmalıq jag'daylarda sheshiliwi mu'mkin. Usınday tarqalıw funktsiyaları ushın misal retinde Maksvell-Boltsman ha'm Gibbs tarqalıw funktsiyaların ko'rsetiwge boladı.

Solay etip ten' salmaqlıq hallardı statistikalıq ta'riplew tek g'ana sistemanın' termodinamikalıq parametrlerinin' ortasha ma'nislerin anıqlawg'a mu'mkinshilik berip qoymay, onın' fluktuatsiyaların da tabıwg'a mu'mkinshilik beredi.

Joqarıda alıng'an an'latpalardı bir atomlı ideal gazdin' kinetikalıq energiyasının' fluktuatsiyaların esaplawg'a qollanamız. Belgili  $\langle \varphi(x) \rangle = \int_a^b \varphi(x)f(x)dx$  ha'm

$F_E(E_K) = \frac{2\pi}{(\pi kT)^{3/2}} \sqrt{E_K} \exp\left(-\frac{E_K}{kT}\right)$  formulalarına sa'ykes molekulanın' kinetikalıq energiyasının' ortasha ma'nisi mına formula ja'rdeminde anıqlanadı:

$$\langle E_K \rangle = \frac{2\pi}{(\pi kT)^{3/2}} \int_0^\infty E_K^{3/2} \exp\left(-\frac{E_K}{kT}\right) dE_K = \frac{3}{2} kT. \quad (5)$$

Al usı energiyanın' kvadratının' ortasha ma'nisi mına tu'rge iye boladı:

$$\langle E_K^2 \rangle = \frac{2\pi}{(\pi kT)^{3/2}} \int_0^\infty E_K^{5/2} \exp\left(-\frac{E_K}{kT}\right) dE_K = \frac{15}{2} (kT)^2. \quad (6)$$

Bunday jag'dayda kinetikalıq energiyanın' fluktuatsiyalarının' ortasha kvadratı (4)-formulag'a sa'ykes mınag'an ten':

$$\langle (E_K)^2 \rangle = \frac{15}{2} (kT)^2 - \frac{9}{2} (kT)^2 = \frac{3}{2} (kT)^2. \quad (7)$$

Endi ulıwmalıraq jag'daydı qarap o'temiz. Meyli ideal gaz molekulasına sırttan ku'sh maydanı ta'sir etetug'in bolsın ha'm onın' tarqalıw funktsiyası Maksvell-Boltsman tarqalıwı

$$f(\mathbf{r}, \mathbf{v}) = \frac{1}{\Theta} \exp\left(-\frac{E_p(\mathbf{r}) + E_k(\mathbf{v})}{kT}\right) \quad (8)$$

menen ta'riplensin bolsin: Bunday jag'dayda molekulaning' toliq energiyasining' ortasha ma'nisi minag'an ten' boladi:

$$\langle E \rangle = \frac{1}{\Theta} \int_{rv} E \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dV_{rv}, \quad (9)$$

al bul energiyaning' kvadratining' ortasha ma'nisi sa'ykes

$$\langle E^2 \rangle = \frac{1}{\Theta} \int_{rv} E^2 \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dV_{rv}. \quad (10)$$

Bul jerde  $dV_{rv} = dV dV_v$  arqali koordinatalar ha'm tezlikler ken'isligidagi elementer ko'lem belgilengen.

$\Theta$  shaması normirovka sha'rtinen aniqlanadi ha'm mına tu'rge iye boladi

$$\left( \Theta = \iint_{v_v v} \exp\left(-\frac{E_p(\mathbf{r}) + E_k(\mathbf{v})}{kT}\right) dV dV_v \right):$$

$$\Theta = \int_{rv} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dV_{rv}. \quad (11)$$

(11)-an'latpaning' temperatura T boyinsha tuwindisin tabamiz:

$$\frac{d\Theta}{dT} = \frac{1}{kT^2} \int_{rv} E \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dV_{rv} = \frac{\Theta \langle E \rangle}{kT^2}. \quad (12)$$

(9) dı temperatura T boyinsha differentsiallasaq:

$$\begin{aligned} \frac{d\langle E \rangle}{dT} &= -\frac{1}{\Theta^2} \frac{d\Theta}{dT} \int_{rv} E \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dV_{rv} + \frac{1}{\Theta} \frac{1}{kT^2} \int_{rv} E^2 \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dV_{rv} = \\ &= \frac{1}{kT^2} \langle E \rangle^2 + \frac{1}{kT^2} \langle E^2 \rangle \end{aligned} \quad (13)$$

yamasa

$$\langle E^2 \rangle - \langle E \rangle^2 = kT^2 \frac{d\langle E \rangle}{dt}. \quad (14)$$

(14)-an'latpa aling'anda (9)-, (10)- ha'm (12)-formulalar paydalanilg'an.

Onda (4) ten'ligine sa'ykes sırtqı potentsial maydanda turg'an ideal gazdın' molekulasının' fluktuatsiyaların' ortasha kvadratı ushın an'latpag'a iye bolamız:

$$\langle (dE)^2 \rangle = kT^2 \frac{d\langle E \rangle}{dT}. \quad (15)$$

Joqarıda jazılğ'an (7)-formulanın' (15)- an'latpanın' dara jag'dayı ekenligin atap o'temiz.

Endi N molekulag'a iye ha'm turaqlı ko'lemdi iyeldeytug'ın ideal gazdın' ishkin energiyasının' fluktuatsiyaların esaplawg'a o'temiz. Bunday gaz ushın ishki energiya molekulaların' energiyaların' qosındısınan turadı dep esaplawg'a boladı:

$$U = \sum_{i=1}^N E_i \quad (16)$$

Onda ishki energiyanın' ortasha ma'nisi:

$$\langle U \rangle = \sum_{i=1}^N \langle E_i \rangle = N \langle E \rangle, \quad (17)$$

al onın' kvadratı sa'ykes mına formula menen anıqlanadı:

$$\langle U^2 \rangle = \left\langle \left( \sum_{i=1}^N E_i \right)^2 \right\rangle = \sum_{i=1}^N \langle E_i^2 \rangle + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^N \langle E_i \rangle \langle E_j \rangle = N \langle E^2 \rangle + N(N-1) \langle E \rangle^2. \quad (18)$$

(17)-(18) formulalardı esaplag'anımızda ideal gazdın' molekulaların' energiyaların' statistikalıq g'a'rezsizligi esapqa alındı. Sonın' menen birge bul jerde qarap atırılğ'an gaz ten' salmaqlıq halda turıptı ha'm onın' molekulaların' barlıg'ı birdey ortasha energiyag'a iye boladı dep boljandı.

(17)-(18) formulalar barlıq gazdın' ishki energiyasının' fluktuatsiyasının' kvadratı menen bir molekulanın' energiyasının' fluktuatsiyasının' kvadratı arasındag'ı qatnastı jazıwg'a mu'mkinshilik beredi:

$$\langle U^2 \rangle - \langle U \rangle^2 = N \left( \langle E^2 \rangle - \langle E \rangle^2 \right) \quad (19)$$

yamasa

$$\langle (\Delta U)^2 \rangle = N \langle (\Delta E)^2 \rangle. \quad (20)$$

Keyingi formulag'a molekulanın' fluktuatsiyaların' kvadratı ushın jazılğ'an (15) ti qoysaq:

$$\langle (\Delta U)^2 \rangle = kT^2 \frac{d\langle U \rangle}{dT}. \quad (21)$$

Bul jerde gazdin' ishkin energiyasının' ortasha ma'nisi ushın jazılg'an (17) esapqa alıng'an.

Bir atomlı ideal gazdin' ishki energiyası mına formula menen anıqlanadı:

$$\langle U \rangle = \nu C_V T. \quad (22)$$

Bul an'latpadag'ı  $\nu = \frac{N}{N_A}$  arqalı zattın' mollerinin' sanı belgilengen.  $C_V = \frac{3}{2}R$  bir atomlı gazdin' mollik jıllıq sıyımlıg'ı,  $N_A$  Avagadro sanı,  $R$  universal gaz turaqlısı.  $R = kN_A$  ekenligin esapqa alıp iye bolamız:

$$\langle U \rangle = \frac{3}{2} NkT. \quad (23)$$

(23) ti differentsiallasaq ha'm alıng'an n'a'tiyjeni (21) ge qoysaq mınanı alamız:

$$\langle (\Delta U)^2 \rangle = \frac{3}{2} Nk^2 T^2. \quad (24)$$

Usı an'latpalardı esapqa alıp ishki energiyanın' ortasha kvadratlıq salıstırmalı fluktuatsiyasın mına tu'rde jaza alamız:

$$\frac{\sqrt{\langle (\Delta U)^2 \rangle}}{\langle U \rangle} = \sqrt{\frac{2}{3N}}. \quad (25)$$

Bul formuladan makroskopiyalıq sistemalar ushın  $N \gg 1$  bolg'anda ishki energiyanın' salıstırmalı fluktuatsiyaların' esapqa alıstay kishi ekenligi ko'rinip tur.

Ten' salmaqlıq halda fluktuatsiyag'a tek ishki energiya emes, al sistemanın' basqa da termodinamikalıq parametrleri ushıraydı (basım, temperatura, ko'lem, entropiya h.b.). Usı ayıl'g'an barlıq parametrlar ushın olardıń salıstırmalı fluktuatsiyaların' ma'nisi sistemadag'ı bo'lekshelerdin' sanının' kvadrat tu'birine kerı proporsional:

$$\frac{\sqrt{\langle (\Delta x)^2 \rangle}}{\langle x \rangle} \sim \sqrt{\frac{1}{N}}. \quad (26)$$

Bul formulada proporsionallıq koeffitsienti shama menen birge ten'.

(26)-formulanı tek g'ana ten' salmaqlıq hallardı talqılag'anda g'ana paydalanıw mu'mkin. Ten' salmaqlıq halg'a alıs hallar jag'dayında (mısalı suyıqlıq-gaz fazalıq o'tiwindegi kritikalıq noqatta yamasa sistemag'a joqarı intensivliktegi sırtqa ta'sirler ta'sir etken jag'dayda) fluktuatsiyalar a'dewir o'sedi ha'm olardıń shamaları fluktuatsiyalanatug'ın parametrlerdin' shamaları menen barabar bolıp qaladı. Bunday termodinamikalıq sistemalardag'ı fluktuatsiyalar qaytımlı emes protsesslerdin' ju'riw xarakterin anıqlaydı ha'm olardıń teoriyasın islep shıg'ıw ten' salmaqlı emes termodinamikanın' ma'selesı bolıp tabıladı.

*Ma'sele: Gazdin' bir moli bar gaz termometrindgi temperaturanın' salıstırmalı ten' salmaqlıq fluktuatsiyaların' shamasın bahalan'ız.*

*SHeshimi: Gazdın' bir moli Avagadro sanına ten' molekulag'a iye boladı:  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$  mol<sup>-1</sup>. (26)-formulag'a sa'ykes qarap atırılğ'an gaz termometri ushın temperaturanın' salıstırmalı fluktuatsiyaların' ma'nisi mınag'an ten':*

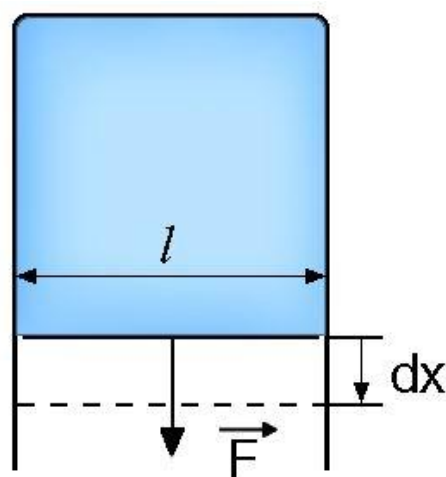
$$\frac{\sqrt{\langle(\Delta T)^2\rangle}}{\langle T \rangle} \sim \sqrt{\frac{1}{N_A}} = 1,3 \cdot 10^{-12}.$$

*A'lbette, usınday kishi fluktuatsiyalardı registratsiyalaw a'meliy jaqtan mu'mkin emes.*

## **Gaz, suyıqlıq ha'm qattı deneler arasındag'ı shegarada baqlanatug'ın qubılıslar**

Ta'jiriybeler suyıqlıqlardıń betinin' mu'mkin bolg'anınsha kishi maydang'a ten' etiwge umtılatug'ınlıg'ın ko'rsetedi. Bul qubılıs suyıqlıqtın' betine mexanikalıq ku'shlerdin' ta'sir etiwinin' saldarı bolıp, bul mexanikalıq ku'shler bettin' maydanın kishireytiwge tırısadı. Usınday ku'shler *bet kerimi ku'shleri* dep ataladı.

Suyıqlıq penen gaz arasındag'ı shegarada payda bolatug'ın qubılıslardı karap o'temiz. Meyli suyıqlıqtın' plenkası bar bolsın (mısalı sabınlı suwdın' plenkası), ol plenka bir ta'repi qozg'alatug'ın sım ramka menen kerip turılatus'ın bolsın (su'wrette keltirilgen).



*Suyıq plenkalı ramka*

Bet kerimi ku'shlerinin' esabınan plenka o'zinin' maydanın kishireytiwge umtıladı. Bul ku'shke kesent jasaw ushın ramkanın' qozg'alıwshı ta'repine (qozg'alıwshı sımg'a) F ku'shi menen ta'sir etiwimiz kerek. Ta'jiriybeler bul ku'shtin' shamasının' plenkanın' bet maydanına g'a'rezsiz ekenligin, al sol ta'reptin' uzınlıg'ı l ge proporsional ekenligin ko'rsetedi:

$$F = 2\sigma l. \quad (1)$$

Proporsionallıq koeffitsienti  $\sigma$  *bet kerimi (bet kerimi koeffitsienti)* dep ataladı. (1)-formuladag'ı 2 sanı suyıqlıqtın' plenkasının' eki betke iye bolatug'ınlıg'ına baylanıslı payda bolg'an. Sebebi plenkanın' qalın'lıg'ı molekulalar arasındag'ı qashılıqtan u'lken bolsa eki bettin' de qozg'alıwshı sımg'a bir birinen g'a'rezsiz ta'sir etiwı orın aladı. A'lbette F ku'shi bet kerimi

ku'shine ten' ha'm sonlıqtan (1)-formuladan *bet kerimi ku'shinin' san jag'ınan bet kerimi  $\sigma$  menen plenka menen simnın' kontakti sıztıg'ının' eki uzınlıg'ı 2l ge ko'beymesine ten'*. Bul ku'sh plenkanın' betine tu'sirilgen urınba bag'ıtında boladı.

Qozg'alıwshı sımdı a'ste-aqırınlıq penen  $dx$  shamasına ko'shirsek plenkanın' beti

$$dS_{\text{bet}} = 2l dx. \quad (2)$$

shamasına o'sedi. A'ste-aqırınlıq penen ko'shiriw protsessti izotermalıq ha'm kvazistatikalıq (qaytımlı) dep qaraw ushın za'ru'r.

(1)-formula tiykarında bet kerimi ku'shlerine qarsı islengen jumıs  $\delta A'$  bılayınsha anıqlanadı:

$$\delta A' = F dx = 2\sigma l dx = \sigma dS_{\text{get}} \quad (3)$$

Usıg'an sa'ykes bet kerimi ku'shleri ta'repinen islengen jumıs  $dA = dA'$  mına tu'rge iye boladı:

$$\delta A = -\sigma dS_{\text{get}}. \quad (4)$$

(3) *ten bet keriminin' sanlıq jaqtan bettin' maydanın qaytımlı izotermalıq protsesste bir birlikke u'lkeyiw ushın islengen jumısqı ten' ekenligi kelip shıg'adı*. Bul jumıs suyıqlıqtın' betinin' energiyasının' o'siwi ushın jumısaladı (*erkin betlik energiyanın' o'siwi ushın jumısaladı*). Demek *bet kerimi sanı jag'ınan salıstırmalı erkin bet energiyasına ten'*.

Erkin betlik energiyanın' bar bolıwı suyıqlıqtın' molekulaları arasındag'ı tartısıw ku'shinin' bar ekenliginin' na'tiyjesi. Usınday ku'shlerdin' tasirinde bet qatlamındag'ı molekulalar suyıqlıqtın' ishine tartıladı, al suyıqlıqtın' ishinde jaylasqan molekulalar ushın ten' ta'sir etiwshi tartılıs ku'shinin' shaması nolge ten'. Tap usınday jag'day Van-der-Vaals gazinde de orın aladı. Al bul o'z gezeginde gazdın' ıdıtın' diywalına tu'siretug'in basımın azaytıadı. Suyıqlıqta da molekulalar arasındag'ı tartılıs ku'shleri onın' betine tu'siretug'in basımdı azaytıadı.

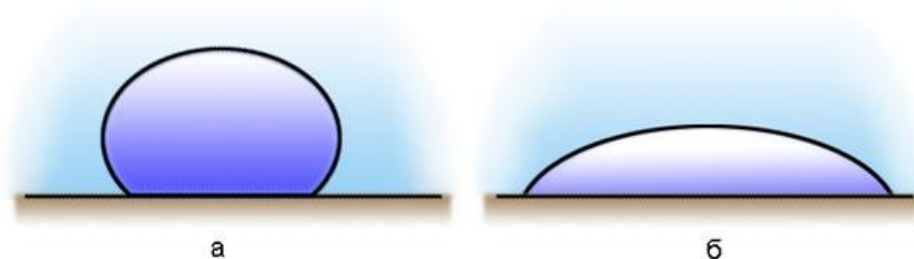
Molekulalar aralıq ku'shlerdi jen'iw ushın gaz molekulası ustinen jumıs islew kerek. Bul jumıs molekulanı suyıqlıqtın' ishinen onın' betine shıg'arg'anda islengen jumısqı ten'. Bul jumıstın' san shaması molekulanın' potentsial energiyasının' o'simine ten' bolıp, tap usı jumıstın' o'zi bet kerimi ku'shlerinin' payda bolıwına alıp keledi. Betlik qatlamdag'ı molekulalardıń sanı bettin' maydanına proporsional bolg'anlıqtan, barlıq molekulalardıń erkin energiyası da (erkin betlik energiya) bettin' maydanına tuwrı proporsional.

Gravitatsiyalıq tartısıw yamasa basqa da sırtqı ku'shler bolmag'anda suyıqlıqtın' berilgen ko'lemine sa'ykes keliwshi bettin' maydanı minimallıq ma'nisine iye boladı (salmaqsızlıq jag'daylarında suyıqlıq tamshılarının' shar ta'rizli formag'a iye bolatug'inlıg'ın eske tu'siremiz, sonın' menen birge sabın ko'bigi de salmag'ının' kishi bolg'anlıg'ı sebepli derlik shar ta'rizli formag'a iye boladı).

Endi qattı denenin' betindegi suyıqlıqtın' tamshısının' kanday awhallarda bolatug'inlıg'ın karap o'temiz. Bul jag'dayda fazalar arasındag'ı u'sh shegara boladı: gaz-suyıqlıq, suyıqlıq-gaz, gaz-qattı dene. Suyıqlıq tamshısının' qa'siyetleri (povedeniyesi) ko'rsetilgen shegaradag'ı bet keriminin' shaması menen anıqlanadı (erkin betlik energiyanın' salıstırmalı shamaları menen). Suyıqlıq penen gazdın' shegarasındag'ı bet kerim ku'shleri tamshıg'a sferalıq forma beriwge tırsadı. Bul jag'day eger suyıqlıq penen qattı dene arasındag'ı bet kerimi gaz benen qattı dene arasındag'ı bet keriminen u'lken bolg'an jag'dayda orın aladı. (a su'wrette keltirilgen). Bul



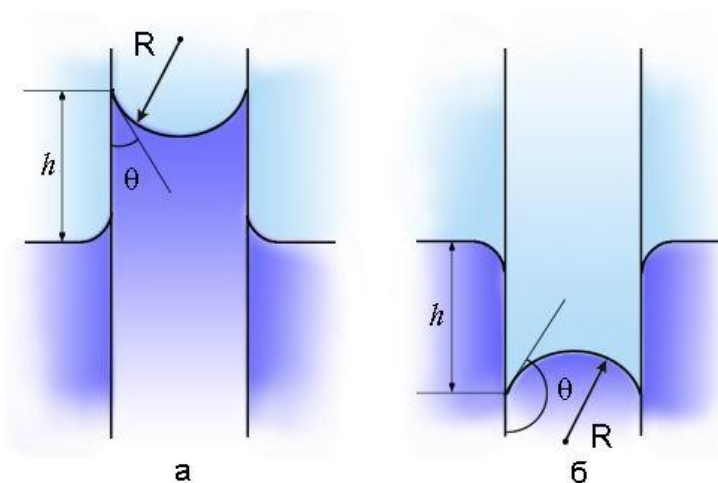
jag'dayda suyuq tamshini sferag'a tartiw protsessi suyuqliq-qatti dene shegarasinin' bet maydanin kishireytiwge alıp keledi ha'm usının' menen bir waqıtta gaz-suyuqliq shegarasinin' bet maydanı u'lkeyedi. Bunday jag'daylarda qatti denenin' betine suyuqliqtın' *juqpaslıg'ı* orın aladı. Tamshının' forması bet kerimi ku'shleri menen salmaq ku'shinin' ten' ta'sir etiwshisi menen anıqlanadı. Eger tamshı u'lken bolsa bette «jalpayadı», al kishi bolsa shar ta'rizli formag'a iye boladı.



*Qatti denenin' betindegi tamshıshın' ha'r qıylı formaları - (a) juqpaytug'ın ha'm (b) jug'atug'ın suyuqliqlar.*

Eger suyuqliq pene qatti denenin' shegarasındag'ı bet kerimi gaz benen qatti dene arasındag'ı bet keriminen kishi bolsa, onda tamshı gaz-qatti dene shegarasının' betinin' maydanın kishireytiwge umtıladı, Yag'nıy suyuqliq tamshısı qatti denenin' betinde jayıladı (b su'wret). Bul jag'dayda qatti denenin' betine suyuqliqtı jug'adı dep esaplaymız.

Qatti denenin' betine suyuqliqtın' jug'ıwı yamasa juqpaslıg'ı *kapıllıy efekt* dep atalatug'ın effektin' ju'zege keliwine alıp keledi. Kapıllıy dep ishine suyuqliq kuyılğ'an ıdıska salıng'an jin'ishke naydı tu'sinemiz. Kapıllıy efekt suyuqliqtın' nay diywalına jug'atug'ınlıg'ına yamas juqpaytug'ınlıg'ına baylanıslı kiplıy ishinde suyuqliq oyıq yamasa do'n'es formanı aladı. Birinshi jag'dayda suyuqliqtın' ishindegi basım sırtqı basımg'a salıstırg'anda kishireyedi ha'm suyuqliq kapıllıyadın' ishinde joqarıg'a ko'teriledi (a su'wret). Al ekinshi jag'dayda basım u'lkeyedi, al bul o'z gezeginde kapıllıyadag'ı suyuqliqtın' qa'dinin' ıdıstag'ı suyuqliqtın' qa'ddine salıstırg'anda to'menlewine alıp keledi (b su'wret).



*Jug'atug'ın (a) ha'm juqpaytug'ın suyuqliqlardag'ı kapıllıy*

Kapıllıyadag'ı suyuqliqtın' ko'teriliwi ha'm qosımsha basım potentsial energiya  $E_p$  nın' minimum sha'rtinen anıqlanadı:

$$\frac{dE_p}{dh} = 0. \quad (5)$$

Bul an'latpada  $dh$  arqalı kapillyardag'ı suıqlıq bag'anasının' elementar o'zgeriwi belgilengen.

TSilindar ta'rizli kapillyardag'ı suıqlıqtın' qa'ddin  $dh$  namasına o'zgertiw ushın salmaq ku'shlerine qarsı mınaday jumıs islenedi:

$$\delta A'_{\text{salmaq}} = \rho g h \pi r^2 dh \quad (6)$$

Al bet kerimi esabınan islengen jumıs mınag'an ten':

$$\delta A'_{\text{kerim}} = (\sigma_{23} - \sigma_{13}) 2\pi r dh. \quad (7)$$

Bul jerde  $\rho$  suıqlıqtın' tıg'ızlıg'ı,  $g$  erkin tu'siw tezleniwi,  $h$  suıqlıqtın' kapillyardag'ı ko'teriliw biyikligi,  $r$  kapillyardın' radiusı,  $\sigma_{13}$  ha'm  $\sigma_{23}$  ler arqalı sa'ykes gaz ha'm kapillyar, suıqlıq ha'm kapillyar aralarındag'ı bet kerimi berilgen. Bunday jag'dayda energiyanın' o'zgeriwi

$$dE_p = \delta A'_{\text{salmaq}} + \delta A'_{\text{kerim}} \quad (8)$$

yamasa

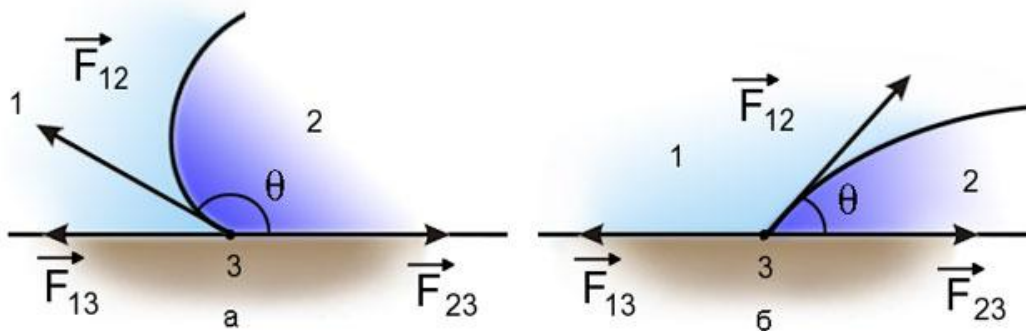
$$dE_p = \rho g h \pi r^2 dh + (\sigma_{23} - \sigma_{13}) 2\pi r dh.. \quad (9)$$

Solay etip (5)-sha'rt mına tu'rge iye boladı:

$$\rho g h r^2 + (\sigma_{23} - \sigma_{13}) 2\pi r = 0. \quad (10)$$

Bul anlatpanı mına tu'rge alıp kelemiz

$$\rho g h r - 2\sigma_{12} \cos\theta = 0. \quad (11)$$



$\theta$  mu'yeshinin' ma'nisin tu'sindiretug'in su'wretler

Bul an'latpadag'ı  $\sigma_{12}$  gaz benen suyıqlıq arasındag'ı bet kerimi. Bunnan suyıqlıqtın' kapillyar boyınsha ko'teriliw biyikligin anıqlaymız:

$$h = \frac{2\sigma_{12} \cos \theta}{\rho g r}. \quad (12)$$

Bul formuladan  $0 < \theta < \pi/2$  de kapillyarda suyıqlıqtın' biyikliginin' o'setug'ınlıg'ı, al  $\pi/2 < \theta < \pi$  bolg'anda to'menleytug'ınlıg'ın ko'remiz.

Suyıqlıqtın' beti ta'repinen payda etiletug'ın qosımsha basım  $\Delta P$  gidrostatikalıq basımdı ten'lestirip turıwı kerek. Sonlıqtan

$$\Delta P = \frac{2\sigma_{12} \cos \theta}{r} \quad (13)$$

yamasa

$$\Delta P = \frac{2\sigma_{12}}{R}, \quad (14)$$

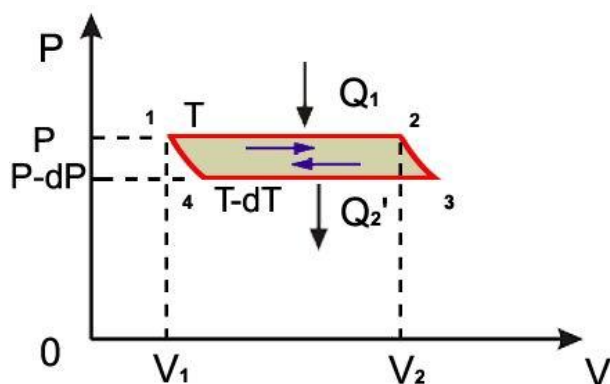
bul jerde suyıqlıqtın' sferalıq betinin' radiusı  $R = r/\cos \theta$  paydalanılğ'an (su'wretti qaran'ız). (14)-formula bet *kerimi ushın Laplas formulası* dep ataladı.

## Birinshi a'wlad fazalıq o'tiwleri

Birinshi a'wlad fazalıq o'tiwlerin ta'riplew ushın fazalıq o'tiw noqatlarındag'ı  $P = P(T)$  basımın' temperaturag'a g'a'rezliligin anıqlaw kerek (Yag'nıy eki fazanın' ten' salmaqlıq iymekliginin' formasın biliw kerek). Ten' salmaqlı termodinamika usılları bul g'a'rezliliktin' birinshi tuwındısın, Yag'nıy ten' salmaqlıq iymekliktin' qıyalıg'ın anıqlawg'a mu'mkinshilik beredi.

Meyli eki fazalı sistemanın' bir fazasına bazı bir  $Q_1$  jıllılıg'ı berilgende zattın' massası  $M$  bolg'an bo'legi bir fazadan ekinshi fazag'a o'tetug'ın bolsın. Qarap atırılğ'an o'tiw kvazi ten' salmaqlıq bolg'anlıqtan o'tiw barısında basım da, temperatura da turaqlı kaladı, Yag'nıy  $P = \text{const}$ ,  $T = \text{const}$ . Salıstırmalı ko'lem (ko'lemnin' massag'a katnası) birinshi faza ushın  $v_1$  ge, al ekinshi faza ushın  $v_2$  ge ten'. Massası  $M$  bolg'an zattın' mug'darı birinshi fazada  $V_1 = v_1 M$  ko'lemin, al ekinshi fazada  $V_2 = v_2 M$  ko'lemin iyeleydi.

Zattın' birinshi fazadan ekinshi fazag'a o'tiwi bazı bir aylanbalı protsesstin' 1-2 ushastkası sıpatında su'wrette keltirilgen. Usınday aylanbalı protsesstin' ja'rdeminde massası  $M$  bolg'an zat qaytadan da'slepki birinshi fazag'a qaytarıladı. Bul aylanbalı protsessti Karno tsikli dep qaraymız. Bunday jag'dayda 2-3 ha'm 4-1 protsessler adiabatlıq, al izotermalıq 3-4 protsess zat ekinshi fazadan birinshi fazag'a o'tkendegi jıllılıqtı kaytıp beriwdi ta'ripleydi. 3-4 protsessi  $P-dP$  basımında ha'm  $T-dT$  temperaturasında a'melge asadı ha'm olardıń shamaları 1-2 protsess ju'retug'ın basımın'  $P$ , temperaturanın'  $T$  ma'nislerine sheksiz jaqın dep esaplaymız.



Birinshi a'wlad fazalıq o'tiwin esaplaw  
ushın arnalg'an su'wret

Karnonın' birinshi teoreması tiykarında qarap atırılǵ'an tsikldin' paydalı ta'sir koeffitsienti (p.t.k.) ushın mına an'latpanı jazı alamız<sup>12</sup>:

$$\eta = \frac{\delta A_{12}}{Q_1} = \frac{T - (T - dT)}{T} = \frac{dT}{T} \quad (1)$$

Bul an'latpadag'ı  $\delta A_{12}$  tsikl barısındag'ı islegen jumıs. Birinshi juwıqlawda (pri pervom priblijenii)  $dP$  shamasının' sheksiz kishi ekenligin esapqa alsaq Karnonın' bir tsiklinde islegen jumıs  $\delta A_{12}$  tın' shaması sheksiz kishi biyiklikke iye tuwrı mu'yeshlik bolg'an tsikldin' jumısına jaqın dep esaplaymız. Bul Karno tsiklinin' qaptalındag'ı adiabatlardı  $V = \text{const}$  vertikal kesindileri menen almasırwıg'a mu'mkinshilik beredi (Yag'nıy Karno tsiklin biyikligi sheksiz kishi  $dP$  g'a ten' tuwrı mu'yeshlik tu'rinde karaymız). Usınday juwıqlawda mınag'an iye bolamız:

$$\delta A_{12} = P(V_2 - V_1) - (P - dP)(V_2 - V_1) = M(v_2 - v_1)dP \quad (2)$$

*Birinshi a'wlad fazalıq o'tiwleri sanlıq jaqtan fazalıq o'tiwdin' salıstırmalı jıllılıǵ'ı menen xarakterlenedi. Bul fazalıq o'tiw ushın zattın' bir birlik massasına beriletug'in jıllılıq bolıp tabıladi:*

$$q_{12} = \frac{Q_1}{M} \quad (3)$$

Bunday jag'dayda (2)- ha'm (3)- formulalardı esapqa alıp (1) di mına tu'rge keltiriw mu'mkin:

$$\frac{(v_2 - v_1)dP}{q_{12}} = \frac{dT}{T} \quad (4)$$

<sup>12</sup> Karnonın' (birinshi) teoreması: Karno tsikli menen isleytug'in jıllılıq mashinasının' paydalı ta'sir koeffitsineti tek qızdırg'ısh penen salqınlatqısh tın' temperaturaları  $T_1$  menen  $T_2$  ge g'ana g'a'rezli bolıp, mashinanın' du'zilisine ja'ne paydalanılatushın jumısshı zattın' ta'biyatına g'a'rezli emes.

Karnonın' ekinshi teoreması: Qa'legen jıllılıq mashinasının' paydalı ta'sir koeffitsienti qızdırg'ısh tın' ha'm salqınlatqısh tın' temperaturaları tap sonday bolg'an Karno tsikli menen isleytug'in ideal mashinanın' paydalı ta'sir koeffitsientinen u'lken bola almaydı. Yag'nıy

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \leq \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

yamasa

$$\frac{dP}{dT} = \frac{q_{12}}{T(v_2 - v_1)} \quad (5)$$

Bul an'latpa *Klapeyron-Klauzius ten'lemesi* dep ataladı ha'm ol ten' salmaqlıq birinshi a'wlad fazalıq o'tiwindegi o'tiwdin' salıstırmalı jıllılıg'ı, temperaturası, da'slepki ha'm aqırğ'ı fazalardıń salıstırmalı ko'lemlerine g'a'rezli basımnan tesperatura boyınsha alıng'an tuwındı beredi.

Klapeyron-Klauzius ten'lemesin salıstırmalı termodinamikalıq potentsialdın' ja'rdeminde de alıwg'a boladı. Bunın' ushın eki fazanın' turaqlı termodinamikalıq ten' salmaqlıqta turg'anda olardıń salıstırmalı termodinamikalıq potentsialların' ten'liginen paydalanamız:

$$\varphi_1(P, T) = \varphi_2(P, T)$$

Bul ten'liktin' eki ta'repin de differentziallaymız:

$$d\varphi_1(P, T) = d\varphi_2(P, T) \quad (6)$$

yamasa ( $s_2 - s_1 = q_{12}/T$  formulasın qaran'ız)

$$-s_1 dT + v_1 dP = -s_2 dT + v_2 dP. \quad (7)$$

Bul jerde  $s_1$  ha'm  $s_2$  ler arqalı birinshi ha'm ekinshi fazalardıń salıstırmalı entropiyası belgilengen.

(7) den mınağ'an iye bolamız:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{s_2 - s_1}{v_2 - v_1} \quad (8)$$

Zattın' bir fazadan ekinshi fazag'a o'tiwi ten' salmaqlıq protsess dep qaralatug'ın ha'm turaqlı temperaturada ju'retug'ın bolg'anlıqtan salıstırmalı entropiyalardıń ayırmasın mına tu'rde anıqlaw mu'mkin:

$$s_2 - s_1 = \frac{q_{12}}{T}. \quad (9)$$

Bul an'talatpanı (8)-formulag'a qoyıw (5)- Klapeyron-Klauzius ten'lemesi tu'rine alıp keledi.

Klapeyron-Klauzius ten'lemesine sa'ykes  $dP/dT$  tuwındısının' belgisi fazalardıń salıstırmalı ko'lemlerinin' qatnasınan g'a'rezli. Eger jıllılıq berilgende suyıqlıq gaz ta'rizli halg'a o'tse salıstırmalı ko'lemnerdin' o'siwi orın aladı ( $v_2 > v_1$ ) ha'm tuwındı  $dP/dT > 0$ . Sonlıqtan usınday o'tiwlerde basımın' o'siwi qaynaw temperaturasının' ko'teriliwine alıp keledi. Tap usınday g'a'rezlilik ko'pshilik qattı denelerdin' eriwinde de (balqıwında da) baqlanadı (ayırım zatlarda eriw salıstırmalı ko'lemnerdin' kishireyiwi menen ju'redi, Yag'nıy  $v_2 < v_1$ ). Usınday zatqa misal retinde suwdı keltiriw mu'mkin. Suw qattı haldan (muz halınan) suyıq halg'a o'tkende o'zinin'

salıstırmalı ko'lemin kishireytedi. (suwdın' tıg'ızlıg'ı muzdın' tıg'ızlıg'ınan u'lken). Bunday zatlarg'a basım jaqarılag'anda eriw temperaturasının' to'menlewi ta'n.

## Hal diagrammaları

Zatlardıń halların ha'm onın' fazalıq o'tiwlerin grafikalıq ta'riplegende a'dette P ha'm T o'zgeriwshileri qollanıladı. Grafiklerde berilgen zattag'ı fazalıq o'tiwlerdegi ten' salmaqlıq iymeklikleri sıızıladı. P ha'm T o'zgeriwshilerinde sıızılğan diagrammanı *hal diagramması* dep ataydı. Usı diagrammadag'ı ha'r bir noqatqa belgili bir ten' salmaqlıq hal sa'ykes keledi. Bul diagramma anaw yamasa minaw protseste kaday fazalıq o'tiwlerdin' bolatug'ınlıg'ın ko'rsetedi.

Ten' salmaqlıq halda fizika-ximiyalıq qa'siyetleri boyınsha bir tekli zattın' birden u'sh ten' salmaqlıq halda turatug'ın jag'daydı qaraymız (mısalı muz, suw ha'm puw). Bunday sistemanın' ten' salmaqlıg'ı bul u'sh fazanın' ten' salmaqlıg'ına sa'ykes keletug'ın u'sh sha'rttin' bir waqıtta orınlang'anda orın aladı. Bul sha'rtlerdi ulıwma jag'dayda bılayınsha jazamız:

$$\varphi_1(P, T) = \varphi_2(P, T) = \varphi_3(P, T). \quad (1)$$

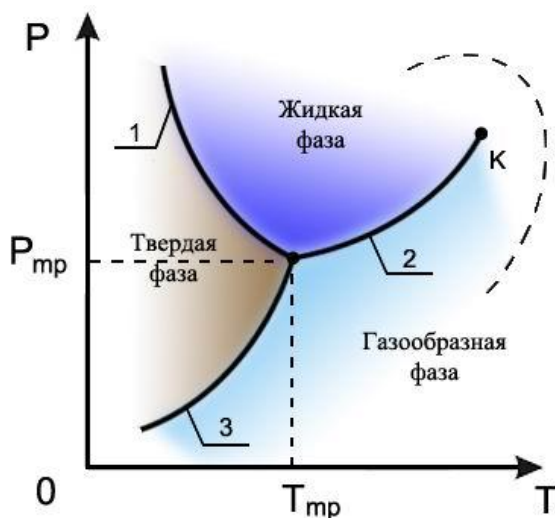
(1)-ten'lik eki bir birinen g'a'rezsiz ten'lemeler sistemasının' payda bolıwına alıp keledi:

$$\varphi_1(P, T) = \varphi_2(P, T), \quad (2)$$

ha'm

$$\varphi_2(P, T) = \varphi_3(P, T). \quad (3)$$

Bul ten'lemeler sistemasın (ximiyalıq reaktsiyalar bolmaytug'ın sha'rti orınlang'anda) sheshiw sol u'sh faza bir waqıtta bola alatug'ın basım  $P_{u'sh}$  ha'm temperatura  $T_{u'sh}$  nın' anıq ma'nislerin beredi. P ha'm T o'zgeriwshilerindegi hal diagrammasındag'ı joqarıda keltirilgen basım menen temperaturanın' ma'nislerine sa'ykes keletug'ın noqat (su'wrette berilgen) *u'shlik noqat* dep ataladı. Bul noqatta qattı ha'm suyıq ta'rizli fazalardı bo'lip turıwshı 1, suyıq ha'm gaz ta'rizli fazalardı ayırıp turatug'ın 2 *puwlanıw sıızıg'ı*, qattı ha'm gaz ta'rizli fazalardı ayırıp turıwshı 3 *vozgonka* iymekligi bar boladı.



Hal diagramması. 1-eriw iymekligi, 2-puwlaniw iymekligi, 3-vozonka iymekligi.

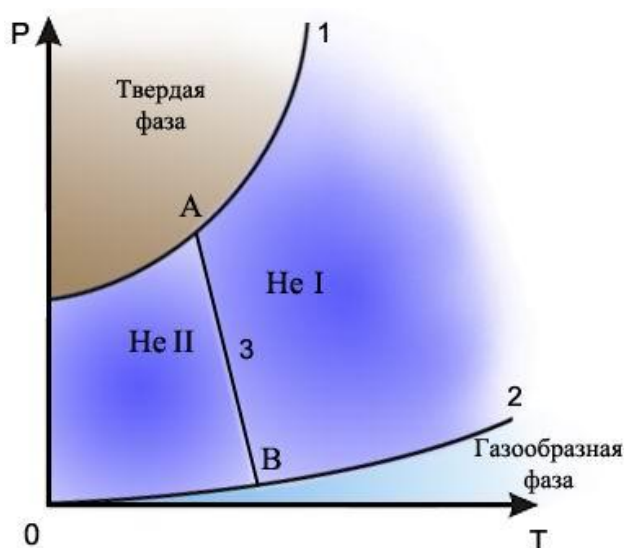
2-puwlaniw iymekligi *kritikalıq noqatta* (K) tamamladı. Bul noqatta suıq ha'm gaz ta'rizli fazalar arasındag'ı ayırma jog'aladı. Eger fazalıq o'tiw kritikalıq noqattı aylanıp o'tiw arqalı a'mege assa (su'wrettegi punktir sıziq tu'rinde ko'rsetilgen), puwlaniw iymekliginin' kesip o'tiwi orın almaydı ha'm fazalıq o'tiw fazalar arasındag'ı shegara payda bolmay u'zliksiz o'tiw menen a'melge asadı.

O'zinin' fizika-ximiyalıq qa'siyetleri boyınsha bir tekli zatlarda bir waqıtta en' ko'p bolg'anında tek u'sh faza (mısalı zattın' u'sh agregat halı) ten' salmaqlıqta tura aladı. U'sh fazadan artıq sandag'ı fazalardıń bir waqıtta jasay alatug'ın noqattın' bolıwı mu'mkin emes.

U'sh ha'r kıylı agregat xalg'a sa'ykes keliwshi zatlardın' halları u'shlik noqatqa sa'ykes kelmeytug'ın basım menen temperaturanın' ma'nislerinde de bir waqıtta jasaytug'ın jag'daylar bar. Mısalı ta'biyatta ha'r kıylı hawa raylarında bir waqıtta muz, suw ha'm puwdı ko'riw mu'mkin (a'llette puwdı tikkeley ko're almaymız, onı ko'riw ushın basqa a'sbaplardan paydalanamız). Biraq bul hallar ten' salmaqlıq hallar emes (u'shlik noqattag'ı hallar ten' salmaqlıq xallar edi). Sonlıqtan ta'biyattag'ı muz, suw ha'm puwlar arasında barlıq waqıtları o'tiwler bolıp turadı.

U'shlik noqattag'ı basım menen temperaturanın' ma'nisleri ko'pshilik zatlar ushın ju'da' turaqlı keledi. Sonın' ushın u'shlik noqatlar ha'r kıylı temperaturalıq shkalalardı kalibrovkalaw ushın paydalanıladı. Suwdın' u'shlik noqatı Kelvin ha'm TSelsiya shkalaları ushın tiykarg'ı reperlik noqattın' ornın iyeleydi.

Geliydin' diagrammasında u'shlik noqat bolmaydı (bul onın' en' tiykarg'ı o'zgesheligi bolıp tabıladı, su'wrette keltirilgen). Demek geliyde qattı, suıq ha'm gaz ta'rizli fazalar bir waqıtta jasadı degen so'z.



Geliydin' hal diagramması. 1- eriw iymekligi, 2-puwlaniw iymekligi, 3- Suyıq He I ha'm He II suyıq fazaların ayırıp turıwshı iymeklik, A ha'm B lar u'shlik noqatlar.

Su'wrette geliyde eriw ha'm puwlaniw iymekliklerinin' kesilispeytug'ınlıg'ı ko'rinip tur. Sebebi geliydin' qattı fazası tek 25 atm basımnan joqarı basımlarda gana payda boladı. Basım 25 atm nan kishi bolg'andı geliy teperaturanın' absolyut nolıne shekem suyıq bolıp qaladı (geliydin' bul qa'siyeti kvant mexanikasın paydalanıp tu'sindiriledi). Biraq bul geliyde u'shlik noqattın' joq ekenligin tu'sindire almaydı. Ma'sele sonnan ibarat, geliy qa'siyetleri ha'r kıylı bolg'an eki suyıq fazag'a iye: Ne I ha'm Ne II. Su'wrette keltirilgen A ha'm V noqatları u'sh faza da ten' salmaqlıq halda turatug'ın u'shlik noqatlar bolıp tabıladı ha'm bul noqatta u'sh faza ten' salmaqlıqta turadı: Ne I, Ne II ha'm (sa'ykes) kristallıq geliy (A nokatı) yamasa gaz ta'rizli geliy (V nokatı). B noqatına sa'ykes keliwshi temperatura shama menen 2,2 K ge ten'.

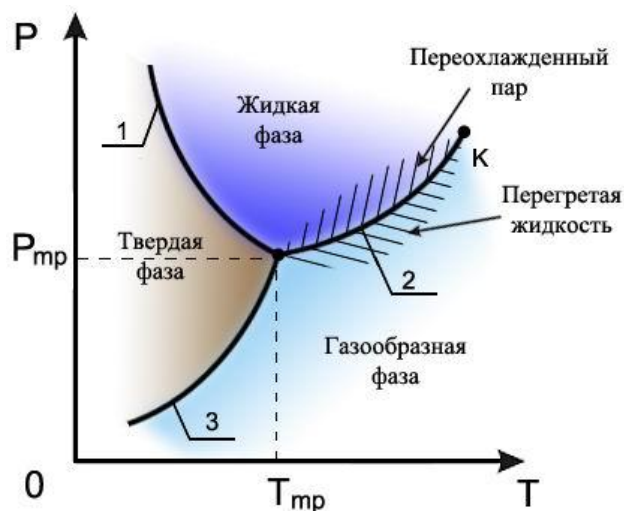
A'dette barlıq qattı zatlar bir neshe fazalıq xallarda bola aladı. Olar bir birinen strukturaları ha'r kıylı bolg'an *kristallıq modifikatsiyaları* menen ayrıladı. Bul fazalar o'z-ara da, ha'r kıylı agregat hallar menen baylanısqa fazalar menen de ten' salmaqlıq xallarda bola aladı. Hal diagrammasında usı fazalardıń ten' salmaqlıq sha'rti bolıp fazalıq o'tiwlerdegi ten' salmaqlıq iymeklikleri xızmet etedi. U'shlik noqatlar da boladı. Bunday noqatlarda u'sh faza ten' salmaqlıqta turadı. Olardıń ekewi kristallıq modifikatsiyalar bolıp, u'shinshisi gaz ta'rizli yamasa qattı faza bolıp tabıladı. Al bazı bir zatlarda u'shlik noqatta ten' salmaqlıqta turatug'ın fazalardıń barlıg'ı da qatta haldag'ı fazalar bolıp tabıladı.

Zatlardıń bir neshe kristallıq modifikatsiyalarg'a iye bolıw qa'siyeti *polimorfizm* dep ataladı. Usınday qa'siyetlerge, misalı, ku'kert, uglerod, qalayı, temir ha'm basqa zatlar iye boladı. Muz bir neshe kristallıq modifikatsiyag'a iye. Bir kristallıq modifikatsiyadan ekinshi modifikatsiyag'a fazalıq o'tiw *polimorfliq aylanıs* dep ataladı. Polimorfliq aylanısar ko'pshilik jag'daylarda birinshi a'wlad fazalıq o'tiwleri bolıp tabıladı ha'm fazalıq o'tiwdin' barısında jıllılıqtın' jutılıwı yamasa shıg'arılıwı orın aladı.

Ha'r kıylı kristallıq modifikatsiyalar ushın *metastabillik xallardıń* bar bolıwı ta'n (bunday hallarda bir faza ekinshi fazanın' temperaturalar ha'm basımları oblastında jasaydı). Tap usınday fazalıq o'tiwler u'shlik noqat janında bir agregat xaldan ekinshi agregat xalg'a o'tkende de orın aladı.

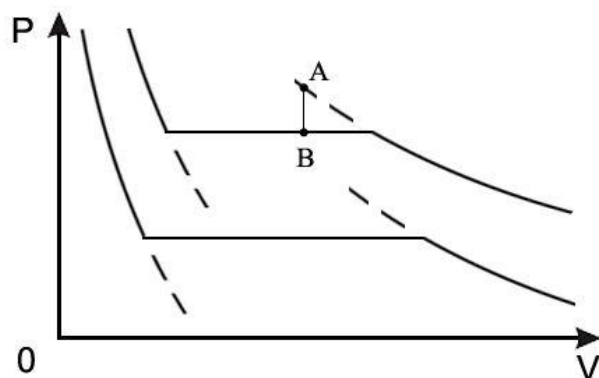
To'mendegi su'wrette suyıqlıq-gaz fazalıq o'tiwindegi metastabillik oblastları sxema tu'rinde ko'rsetilgen. 2-sızıqtan joqarıda *ko'birek salqınlatılğan* puwg'a, al to'mende *ko'birek kızdırılğan* suyıqlıqqa sa'ykes keliwshi oblastlar ko'rsetilgen. Usınday metastabil hallardag'ı zatlar Vilson kamerası ha'm ko'bikli kamera usag'an fizikalıq a'sbaplarda qollanıladı. Olardıń jumıs islew printsipleri to'mende keltirilgen.





Suyıqlıq-gaz fazalıq o'tiwindegi metastabillik hallar diagramması. 1-eriw iymekligi, 2-puwlaniw iymekligi, 3-vozgonka iymekligi.

Eki fazalı suyıqlıq-gaz sistemasının izotermalarnı sa'wlelendiretug'ın bolsaq (to'mendegi su'wrette), izotermalardıń gorizont bag'ıtındag'ı bo'limi zattın fazalıq o'tiwine sa'ykes keledi, gorizont bo'limnen on' ta'repte gaz ta'rizli fazanın izotermaları, al shep ta'repine suyıq fazanın izotermaları jaylasadı. Punktir sıziqlar metastabil hallarg'a sa'ykes keledi. On' ta'repte ko'birek salqınlatulg'an puw, shep ta'repte ko'birek kızıdırılǵ'an suyıqlıq orın alg'an. Bul hallar eger baska fazanın *zarodışları* (sa'ykes tamshılar, ko'biksheler) ele payda bolmag'an bolsa yamasa olarda joq bolıw tendentsiyası orın alg'an jag'dayda ju'zege keledi. Zarodışlardın payda bolıwına ha'r kiyli qosımtalar ha'm bir tekliklikin joqlıg'ı alıp keledi. Sonlıqtan metastabillik hallar jaqsı tazalang'an zatlar ushın ta'n.



Suyıqlıq-gaz eki fazalı sistemasının izotermaları

Ko'birek salqınlatılǵ'an puwdın basımı sol temperaturadag'ı toying'an puwdın basımınan joqarı bolatug'ın bolǵ'anlıqtan, bunday puw *ko'birek toying'an puw* dep ataladı. Bunday puwdag'ı suyıq fazanın *zarodışları*ın payda bolıwı ha'm o'siwı ko'p faktorlarg'a baylanisli boladı (birinshi gezekte *zarodışlardın* o'lishemlerinen, temperaturadan, *ko'birek toyınıw da'rejesi*  $S_p$  dan). *Ko'birek toyınıw da'rejesi usınday puwdın tıg'ızlıg'ının toying'an puwdın tıg'ızlıg'ına katnası tu'ride anıqlanadı:*

$$S_p = \frac{\rho}{\rho_{ko'b.toy.}}, \quad (4)$$

al, adiabatlıq ken'eyiwde onın ma'nisi

$$S_p = \frac{P_1}{P_2} \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^\gamma \quad (5)$$

an'latpası menen anıqlanadı. Bul jerde  $P_1$ ,  $V_1$  ha'm  $P_2$ ,  $V_2$  puwdın' da'slepki ha'm aqırğ'ı basımları menen ko'lemleri.

XIX a'sirdin' ortalarında o'tkerligen ta'jiriybeler eger puwda shan'nın' bo'leksheleri bolsa ha'tte u'lken emes toyınıwda da dumannın' payda bolatug'ınlıg'ın ha'm A noqatınan B nokatına o'tiwidin' orın alatug'ınlıg'ın ko'rsetti (joqarıdag'ı su'wret). Usınday protsess konvektsiyanın' saldarınan payda bolg'an ag'ıslar suw puwları bar hawanı ko'tergende ju'redi. Usının' na'tiyjesinde temperaturanın' to'menlewi menen ol ken'eyedi. Bul dumannın' payda bolıwına ha'm jawın tamshılarının' o'siwine alıp keledi (toying'an halg'a salıstırğ'anda puwdın' artıq kontsentratsiyanın' esabınan).

1870-jılı Tomson (lord Kelvin) ta'repinen bet kerimi saldarınan radiusı  $r$  bolg'an tamshının' betindegi toying'an puwdın' basımı  $\rho_r$  dın' suyuqlıqtın' tegis betindegi puwdın' basımı  $\rho_{bet}$  ten u'lken ekenligin ko'rsetildi. Sol eki basım to'mendegi qatnas penen baylanısqa:

$$\frac{\rho_r}{\rho_{bet}} = \exp\left(\frac{2\sigma}{r} \frac{\mu}{\rho RT}\right) \quad (6)$$

Bul an'latpadag'ı  $\sigma$  bet kerimi,  $\mu$  menen  $\rho$  suyuqlıqtın' mollik massası menen tıg'ızlıg'ı,  $T$  absolyut temperatura,  $R$  universal gaz turaqlısı. Bul an'latpadan eger puwdın' ko'birek toyınıw da'rejesi (6)-an'latpa ta'repinen beriletug'ın shamadan artıq bolsa tamshılardıń u'lkeyetug'ınlıg'ı ha'm dumannın' payda bolatug'ınlıg'ı kelip shıg'adı.

Tamshılar mayda bolg'an sayın usı tamshılardıń puwlanıp ketpewi, al o'siwi ushın ko'birek toyınıw kerek boladı. Suw ushın  $r = 2 \cdot 10^{-8}$  sm de  $S_p = 235$  ke iye bolamız, Yag'nıy molekular a'dette kondensatsiya orayları bola almaydı. Biraq eksperimentler  $S_p > 8$  bolg'anda suw puwlarında dumannın' payda bolatug'ınlıg'ın ko'rsetedi. Angliyalı fizik Djozef Djon Tomson (1856 - 1940) bul qubılıstı bilay tu'sindirdi: ta'sirlesiwidin' (kaogulyatsiyanın') saldarınan suw molekuları tamshı payda etedi. Bul tamshılardıń en' u'lken o'lsheimleri  $r = 5 \cdot 10^{-8}$  sm, al bul shamag'a  $S_p = 8$  shaması sa'ykes keledi.  $S_p$  nın' kishirek ma'nislerinde tek basqa «bo'leksheler» (mısalı shan') bolg'anda g'ana duman payda boladı.

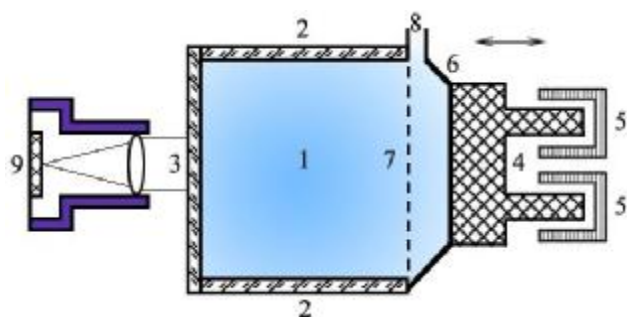
Angliyalı fizik *SHarlz Tomson Ris Vilson* (1869 - 1959) eksperimente belgili bir sharayatlar payda etilgende dumannın' zaryadlang'an ionlarda effektivli tu'rde payda bolatug'ınlıg'ın ko'rsetti. Zaryadlang'an tamshının' betine jaqın orınlardag'ı basımdı o'zgertetug'ın elektrostatalıq ku'shler ta'sir etedi. Bul o'z gezeginde kondensatsiya sha'rtlerin o'zgertedi. Bul jag'day Vilsong'a 1912-jılı yadroliq nurlanıw bo'lekshelerin registratsiya isleytug'ın a'sbaptı islep shıg'ıwg'a alıp keldi. Bul a'sbaptı *Vilson kamerası* dep ataymız<sup>13</sup>.

Bul a'sbapta ko'birek toying'an puw (a'dette suwdın', spirtin' ha'm inert gazlerdin' aralaspasınan turatug'ın) mo'ldir diywalları bar ıdıstag'ı porshennin' ja'rdeminde adiabatlıq ken'eytiw jolı menen payda etiledi. Ionlastırıwshı nurlar bo'leksheleri ıdısqı kelip tu'skende olardıń traektoriyaları boylap ionlardan turatug'ın iz kaladı. Bul ionlarda suyuqlıqtın' kondensatsiyanı orın aladı ha'm suyuqlıqtın' tamshılardan turatug'ın ko'zge ko'rinetug'ın trek (iz) payda boladı. Solay etip metastabil halda toplanğ'an energiya yadroliq nurlanıwdı

<sup>13</sup> Usınday kameranı do'retkeni ushın Vilsno 1927-jılı Nobel sıylıg'ın alıwg'a miyasar boldı.

vizualizatsiya ushin paydalanıladı. Bo'lekshenin' izin ha'm onın' formasın ortalıqtın' fotosu'wretin tu'siriw jolı menen a'melge asırıladı.

Vilson kamerasının' printsiptiallıq sxeması to'mendegi su'wrette keltirilgen. 1 izolyatsiyalang'an jumıs ko'leminde ko'birek toying'an, biraq toying'an halg'a jaqın haldag'ı suw menen spirttin' puwları jaylastırıladı. 4 porshendi tartatug'ın 6 diafragmanın' birden qozg'alıwı 1 ko'lemdegi usı puwların' tez adiabatlıq ken'eyiwge alıp kelinedi. Usı jol menen puwların' ko'birek toynıw da'rejesi jetiledi (a'dette 1,25 ten 1, 37 ge shekem). Onı bahalaw ushın (5)-an'latpanın' qollanıwı mu'mkin.



Vilson kamerasının' sxeması. 1 izolyatsiyalang'an jumısshı ko'lem, 2 shiyshe tsilindr, 3 fotosu'wret tu'siriw ushin arnalg'an shiyshe ayna, 4 jılıwshı porshen, 5 porshennin' ju'risin retlewshi, 6 rezina diafragma, 7 diafragma qozg'alg'anda turbulentlikti kemeytetug'ın sım tor, 8 suw-spirt aralaspasın jiberiwshi tesikshe (jumıs waqtında jabıq turadı), 9 su'wretke alıwshı apparat.

1 ko'lemi arqalı bo'leksheler o'tkende olardıń traektoriyaları boylap dumannan turatug'ın trekler payda boladı ha'm bul trekler su'wretke tu'siriledi. Usınnan keyin Vilson kamerası da'slepki halına qaytıp alıp kelinedi, Yag'nıy onın' jumıs islewi protsessi tsikllıq bolıp tabıladı. Tsikllerdin' sanı minutına 1 den 6 g'a shekem boladı. Jumıs islewinin' kishi tezligi Vilson kamerasının' belgili bir kemshiliklerinen bolıp esaplanadı. Mısalı Angliyalı fizik *Patrik Meynard Styuart Blekettket* (1897 - 1974)  $\alpha$  bo'lekshelerinin' azottag'ı millionday su'wretin tu'siriwge tuwrı keldi. Usı millionday su'wretin' ishinde  $\alpha$  bo'lekshesinin' azot atomları ta'repinen uslap qalınıp, usının' na'tiyjesinde protondı shıg'arıwı 20 ret g'ana su'wretke aling'an.

Vilson kamerasının' basqa bir kemshiligi retinde onın' jumısshı kamerasının' u'lkenliginde (a'dette onın' diametri bir neshe onlag'an santimetrge jetedi). Bul jag'daydın' aqibetinen joqarı energiyalı bo'lekshelerdin' treklerin izertlewge mu'mkinshilik bermeydi. Bul kemshilikten kutılıw ushın tıg'ızraq jumısshı zattan paydalanıw kerek. Bunday zatlardag'a bo'lekshelerdin' ju'riw uzınlıg'ı a'dewir kishireyedi. Usıg'an baylanıslı *ko'biksheli kameralar* islep shıg'ılǵ'an. Bunday kameralarda bo'lekshelerdin' treklerinin' vizualizatsiyası ushın (ko'riniwi ushın) bo'lekshe ushıp o'tkende bo'linip shıg'atug'ın ko'birek qızdırılǵ'an suyıqlıqtın' ishki energiyası paydalanıladı. Suyıqlıq hal diagrammasındag'ı punktir sıızıqlar menen ko'rsetilgen xalda turadı. Usınday suyıqlıqqa zaryadlang'an bo'lekshe kelip tu'sse onın' traektoriyası boylap puwdın' ko'bikshelerinen turatug'ın iz payda boladı.

Ko'biksheli kameranın' printsiptiallıq sxeması Vilson kamerasının' sxemasına uqsas. Metastabillik hal (ko'birek qızdırılǵan suyıqlıq) Vilson kamerasındaǵıday basımdı tez kishireytiw jolı menen alınadı. Treklerdi fotosu'wretke tu'siriw ushın suyıqlıq mo'ldir bolıwı sha'rt. Ko'biksheli kameralarda jumısshı dene retinde jaqsı tazartılǵ'an suyıq vodorod, propan ha'm ksenon paydalanıladı. Bunday kameralardıń tsikllerinin' jiyiligi minutına bir neshe ong'a jetedi.

## Ekinshi a'wlad fazalıq o'tiwleri

Ekinshi a'wlad fazalıq o'tiwlerin bayanlawdı 1933-jılı fizik-teoretik Paul Erenfest (1880 - 1933) ta'repinen usınılg'an usıl menen alıp baramız. Bunday o'tiwler ushın Klapayron-Klauzius ten'lemesin qollanıwg'a bolmaydı. Sebebi salıstırmalı termodinamikalıq potentsialdın' birinshi ta'rtipli tuwındılarının' ten'ligi sha'rtinen

$$\left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial T}\right)_P = \left(\frac{\partial \varphi_2}{\partial T}\right)_P, \quad (1)$$

$$\left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial P}\right)_T = \left(\frac{\partial \varphi_2}{\partial P}\right)_T \quad (2)$$

qosımshalardag'ı «Hal diagrammaları» paragrafındag'ı (1)- ha'm (2)- formulalardan salıstırmalı entropiyalar menen ko'lemnerdin' ten'ligi kelip shıg'adı:

$$s_1 = s_2, \quad (3)$$

$$v_1 = v_2. \quad (4)$$

Bul jag'day mınag'an alıp keledi:  $\frac{dP}{dT} = \frac{s_2 - s_1}{v_2 - v_1}$  ten'lemesinin' on' ta'repinin' alımı da, bo'limi

de bir waqıtta nolge aylanadı ha'm Klayperon-Klauzius ten'lemesinde de 0/0 tu'rindegi anıqsızlıq payda boladı.

(3)- ha'm (4)- formulalarg'a sa'ykes salıstırmalı entropiyalar menen salıstırmalı ko'lemnerdin' tolıq differentsialların tabamız ha'm olardı bir biri menen ten'lestiremiz:

$$\left(\frac{\partial s_1}{\partial T}\right)_P dT + \left(\frac{\partial s_1}{\partial P}\right)_T dP = \left(\frac{\partial s_2}{\partial T}\right)_P dT + \left(\frac{\partial s_2}{\partial T}\right)_T dP, \quad (5)$$

$$\left(\frac{\partial v_1}{\partial T}\right)_P dT + \left(\frac{\partial v_1}{\partial P}\right)_T dP = \left(\frac{\partial v_2}{\partial T}\right)_P dT + \left(\frac{\partial v_2}{\partial T}\right)_T dP. \quad (6)$$

Aling'an an'latpalar ushın tu'rlendiriw o'tkeremiz. Qayıtlı protsesste salıstırmalı entropiyadan temperatura boyınsha aling'an tuwındı mına tu'rge iye boladı:

$$\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_P = \frac{1}{T} \left(\frac{\partial q}{\partial T}\right)_P = \frac{1}{T} c_P. \quad (7)$$

Bul anlatpada q salıstırmalı jıllılıq,  $c_P$  salıstırmalı izobaralıq jıllılıq sıyımlıg'ı.

Salıstırmalı termodinamikalıq potentsialdın' ekinshi tuwındısı ushın mına ten'lik jazılatug'ın bolg'anlıqtan

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial P \partial T} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial T \partial P}, \quad (8)$$

to'mendegidey an'latpanı jaza alamız (qosımshalardag'ı «Hal diagrammaaları» paragrafindag'ı (1)- ha'm (2)- formulalardı qaran'ız):

$$-\left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_T = \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P. \quad (9)$$

(7)- ha'm (9)- an'latpalardı esapqa alg'anda (5)- ha'm (6)- an'latpalar beredi:

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dT} &= -\frac{(\partial s_2 / \partial T)_P - (\partial s_1 / \partial T)_P}{(\partial s_2 / \partial P)_T - (\partial s_1 / \partial P)_T} = \\ &= \frac{c_{P2} - c_{P1}}{T((\partial v_2 / \partial T)_P - (\partial v_1 / \partial T)_P)} = \frac{\Delta c_P}{T \Delta(\partial v / \partial T)_P}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\frac{dP}{dT} = -\frac{(\partial v_2 / \partial T)_P - (\partial v_1 / \partial T)_P}{(\partial v_2 / \partial P)_T - (\partial v_1 / \partial P)_T} = -\frac{\Delta(\partial v / \partial T)_P}{\Delta(\partial v / \partial P)_T}. \quad (11)$$

Bul an'latpalarda  $\Delta$  simvoli menen sa'ykes shamalardın' ayırması belgilengen.

Aling'an an'latpalar basımnın' temperaturadan aling'an tuwındısın ( $dP/dT$ , ten' salmaqılıq iymekliginin' qıyalıg'ı) *salıstırmalı izobaralıq jılılıq sıyımlıg'ı*  $c_P$  ha'm  $\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P$ ,  $\left(\frac{\partial v}{\partial P}\right)_T$  shamaları menen baylanıstıratug'ın ten'lemelerdi jazıwg'a mu'mkinshilik beredi. Bul shamalardın' o'zleri *ko'lemlik ken'eyiwdin' temperaturalıq koeffitsienti* ha'm

$$\alpha_P = \frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_P \quad (11)$$

*izotermalıq kısılıw koeffitsienti*

$$\beta_T = -\frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial P} \right)_T. \quad (12)$$

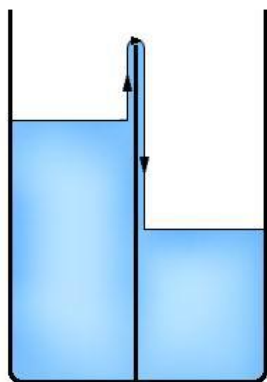
menen baylanısqa. Bul ten'lemeler Erenfest ten'lemeleri dep ataladı ha'm mına tu'rge iye boladı:

$$\Delta c_P = T \frac{dP}{dT} \Delta \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_P, \quad (13)$$

$$\Delta\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P = -\frac{dP}{dT}\Delta\left(\frac{\partial v}{\partial P}\right)_T. \quad (14)$$

Ekinshi a'wlar fazalıq o'tiwlerinin' en' ko'rgizbeli mısalı 2,2 K temperaturadag'ı suıyq Ne I din' suıyq Ne II ge aylanıwı bolıp tabıladı (to'mendegi su'wrette ko'rsetilgen). Usı fazalıq o'tiw menen Ne II de payda bolatug'ın *asa aqqıshlıq* kvant qubılısı baylanısqa. Bul qubılıs 1938-jılı P.L. Kapitsa ta'repinen ashıldı ha'm onın' teoriyalıq tu'sindiriliwi *Lev Davidovich Landau* (1908 - 1968) ta'repinen berildi. Asa aqqıshlıqtın' fenomenologiyalıq teoriiyası Ne II nin' eki suıyqlıqtın' aralaspasınan turatug'ıllıg'ına tiykarlang'an (kvant fizikası boyınsha Ne II atomların eki tu'rge bo'liwge bolmasa da). Biraq klassikalıq analogiya ko'rgizbalilik ushın qolaylıraq ha'm usıg'an baylanıslı Ne II nin' bir kurawshısı asa aqqısh, al ekinshi qurawshısı normal (asa aqqısh emes) bolıp tabıladı. Solay etip Ne II nin' ag'ısın eki suıyqlıqtın' ag'ısları tu'rinde ko'z aldımızg'a keltiremiz, sonın' ishinde asa aqqısh qurawshısının' jabısqaqlıg'ı nolge ten'.

Asa aqqıshlıq qubılısının' o'zi atap aytqanda Ne II nin' jabısqaqlıg'ının' joqlıg'ında. Jabısqaqlıqtın' joqlıg'ınan Ne II suıyqlıg'ı ju'da' jin'ishke kapillyarlar arqalı o'te aladı (P.L. Kapitsa Ne II nin' eki shlifovkalang'an shiyshe arqalı o'tiwi boyınsha ta'jiriybeler qoydı). Al diywal menen eki bo'limge ajratılğ'an ıdıstag'ı Ne II nin' qa'ddi sol diywal arqalı o'rmelewshin' saldarınan ten'lesedi (su'wrette ko'rsetilgen).



Ne II quylg'an ıdıstag'ı o'rmelewshi plenkanın' payda bolıwı

O'rmelewshi plenka  $10^{-5}$  sm den de kishi qalın'lıqqa iye boladı. Bul plenka sekundına bir neshe onlag'an santimetr tezlik penen qozg'aladı ha'm sonlıqtan suıyqlıq ıdıstın' bir ta'repinen ekinshi ta'repine o'tedi.

Normal qurawshı o'zinin' qozg'alıw barısında jıllılıqtı o'zi menen alıp ju'redi, al asa aqqısh qurawshı bolsa jıllılıqtı alıp ju'rmeıydi. Ne II juqa san'laq arqalı o'tkende tiykarınan asa aqqısh qurawshı o'tedi. Sonlıqtan o'rmelewshi Ne II nin' temperaturası o'rmelew a'melge asatug'ın bo'limdegi Ne II din' temperaturasınan to'men boladı. Bul qubılıs asa to'men temperaturalardı alıw ushın qollanıldı (kelvinnin' onnan bir u'lesi).

Ekinshi a'wlad fazalıq o'tiwlerine ayırım zatların' asa o'tkizgishlik halına o'tiwi de kiredi. Bunday o'tiw *asa o'tkizgishlerdin'* elektrlik qa'siyetlerinin' nolge shekem to'menlewi menen ju'zege keledi.

Ekinshi a'wlad fazalıq o'tiwlerine misal retinde temirdin' Kyuri noqatında ferromagnit haldan paramagnit halına o'tiwin ko'rsetiwge boladı. Sonın' menen birge ekinshi a'wlad fazalıq o'tiwlerine ayırım kristallıq pa'njerenin' simmetriyasının' o'zgeriwi menen bolatug'ın o'tiwleri de kiredi. Bul jag'dayda fazalıq o'tiw noqatında pa'njerenin' simmetriyasının' tipi o'zgeredi

(mısalı kublıq pa'njerenin' tetragonallıq pa'njerege o'tiwi). A'dette temperatura to'menlegende ju'retug'ın ekinshi a'wlad fazalıq o'tiwlerinde kristallıq pa'njerenin' simmetriyası to'menleydi. Sonlıqtan joqarı temperaturalarda ekinshi a'wlad fazalıq o'tiwleri orın alatug'ın kristallarda mu'mkin bolg'an en' joqarı simmetriya orın aladı.

Ekinshi a'wlad fazalıq o'tiwlerinde zatlardın' barlıq qa'siyetleri zatlardın' barlıq ko'lemi boyınsha u'zliksiz tu'rde o'zgeredi. Sonlıqtan ekinshi a'wlad fazalıq o'tiwlerinde birinshi a'wlad fazalıq o'tiwleri ushın ta'n bolg'an metastabillik hallardın' payda bolıwı mu'mkin emes.

«Tastıyıqlayman»

Oqıw isleri boyınsha prorektor

---

M.İbragimov

2008-jıl 25-avgust

Fizika-texnika fakultetinin' fizika qa'nigeliginin' (Ta'lim bag'darı: **5440100 - Fizika**) 1-kurs studentleri ushın «Molekulalıq fizika» pa'ni boyınsha

## SABAQLARG'A MO'LSHERLENGEN OQIW PROGRAMMASI

**Saatlar sanı 302.**

Sonın' ishinde:

Lektsiyalar 40 saat.

A'meliy sabaqlar 36 saat.

Laboratoriyalıq sabaqlar 76 saat.

O'z betinshe islewdir' ko'lemi 150 saat.

Pa'nnin' sabaqlarg'a mo'lsherlengen oqıw programması Qaraqalpaq ma'mleketlik universitetinin' ilimiy-metodikalıq ken'esinin' 2008-jıl 25-avgust ku'ngi ma'jilisinde qarap shıg'ıldı ha'm maqullandı. Protokol nomeri 1.

**Du'ziwshi** ulıwma fizika kafedrasının' baslıg'ı, fizika-matematika ilimlerinin' kandidatı, professor B.Abdikamalov

**Sınshılar:**

B.Jollıbekov, A'jiniyaz atındag'ı No'kis ma'mleketlik pedagogikalıq institutının' rektori, fizika-matematika ilimlerinin' kandidatı, dotsent.

---

B.Narimbetov, O'zbekstan İlimler Akademiyasının' Qaraqalpaqstan bo'limi baslıgının' orınbasarı, fizika-matematika ilimlerinin' kandidatı.

---

Pa'nnin' sabaqlarg'a mo'lsherlengen oqıw programması fizika-texnika fakultetinin' ilimiy ken'esinin' 2008-jıl «\_\_\_\_\_» avgustındag'ı ma'jilisinde talqılandı ha'm maqullandı. Protokol sanı 1.



İlimiy ken'es baslıg'ı

Q.İsmailov

**Kelisildi:**

Kafedra baslıg'ı

B.Abdikamalov

2008-jıl 25-iyun.

1-qosımsha

2008-2009 oqıw jılı ushın «Molekulalıq fizika» pa'ni boyınsha sabaqlarg'a mo'lsherlengen oqıw programmasına o'zgertiwler ha'm qosımshalar kirgiziw haqqında.

Ta'lim bag'darı: **5440100 – Fizika** boyınsha «Molekulalıq fizika» pa'ni boyınsha sabaqlarga mo'lsherlengen oqıw programmasına to'mendegidey o'zgerisler ha'm qosımshalar kirgizilmekte:

O'zgerisler ha'm qosımshalar kirgiziwshiler:

\_\_\_\_\_  
(Familiyası, atı, lawazımı, ilimiy da'rejesi ha'm ilimiy atag'ı)

\_\_\_\_\_  
(qolı)

\_\_\_\_\_  
(Familiyası, atı, lawazımı, ilimiy da'rejesi ha'm ilimiy atag'ı)

\_\_\_\_\_  
(qolı)

---

Sabaqlarg'a mo'lsherlengen oqıw programması fizika-texnika fakulteti ilimiy ken'esinde talqılandı ha'm maqullandı. Protokol sanı \_\_\_\_\_.

### «Molekulalıq fizika» g'a tiyisli laboratoriyalıq jumıslar dizimi

Mexanikalıq modelde Gauss tarqalıwın u'yreniw;  
 Loshmidt sanın anıqlaw;  
 Mexanikalıq modelde Maksvell tarqalıwın u'yreniw;  
 Termoparalar jasaw ha'm olardı graduırovkalaw;  
 Gazlerdin' saldıstırmalı jıllılıq sıyımlıqlarının' qatnasın anıqlaw;  
 Gaz basımının' termikalıq koeffitsientin anıqlaw;  
 Hawanın' ishki su'ykelis koeffitsientin ha'm molekulalardıń ortasha erkin ju'riw jolı uzınlıg'ın anıqlaw;  
 Hawanın' jıllılıq o'tkizgishlik koeffitsientin anıqlaw;  
 Efirdin' kritikalıq temperaturasını anıqlaw;  
 Suyıqlıqlardıń ko'lemge ken'eyiw koeffitsientin anıqlaw;  
 Suyıqlıqlardıń ishki su'ykelis koeffitsientin Stoks usılı menen anıqlaw;  
 Suyıqlıqlardıń ishki su'ykelis koeffitsientin kapılyar viskozimetr ja'rdeminde anıqlaw;  
 Terbelislerdin' so'niwi boyınsha suyıqlıqtın' ishki su'ykelis koeffitsientin anıqlaw  
 Suyıqlıqtın' bet kerimi koeffitsientin tamshı usılı menen anıqlaw  
 Bet kerimi koeffitsientin qalqanı suyıqlıqtan u'ziw usılı ja'rdeminde anıqlaw;  
 Bet kerimi koeffitsientin suyıqlıqtın' kapılyar naylarda ko'teriliw biyikligi boyınsha anıqlaw;  
 Suyıqlıqlardıń salıstırmalı puwlanıw jıllılıg'ın anıqlaw;  
 Qattı denelerdin' temperaturalıq sıızıqlı ken'eyiw koeffitsientin anıqlaw;  
 Qattı denelerdin' salıstırmalı jıllılıq sıyımlıg'ın ha'm haqıyqıy sistemanın' entropiyasınıń o'zgerisin anıqlaw;  
 Qattı denelerdin' salıstırmalı eriw jıllılıg'ın anıqlaw;  
**Qosımsha:** Joqarıda atları atalg'an laboratoriyalıq jumıslardıń keminde onının' ornılanıwı sha'rt.

### O'z betinshe jumıslar temaların' dizimi

Laboratoriyalıq ha'm a'meliy sabaqlarg'a teoriyalıq tayarlıq ko'riw.  
 Ortasha ma'nisler. Fluktuatsiyalar. Protsessler. Ten' salmaqlı ha'm ten' salmaqlı emes protsessler. Qaytımlı ha'm qaytımlı emes protsessler.  
 Gaz molekulaların' tezliklerin anıqlaw. Broun qozg'alısı. Perren ta'jriybesi. Gaz molekulaların' ortasha arifmetikalıq, ortasha kvadratlıq ha'm en' u'lken itimallıqqa iye tezlikleri. Maksvell tarqalıwın ta'jiriybede tekserip ko'riw.  
 Statsionar ha'm statsionar emes jıllılıq o'tkizgishlik. Ko'shiw koeffitsientleri arasındag'ı baylanıs.  
 İdeal gaz protsesslerindegi entropiyanın' o'zgerislerin esaplaw. Temperaturanın' termodinamikalıq shkalası. Termodinamikanın' u'shinshi baslaması.  
 Van-der-Valstin' keltirilgen ten'lemesi. Haqıyqıy gazdin' ishki energiyası. Gaz halınan suyuq halg'a o'tiw. Gazlerdi suyuqlıw usılları.  
 Suyıqlıqlardıń ko'lemlik qa'siyetleri. Suyıqlıqlardıń jıllılıq sıyımlıg'ı ha'm suyıqlıqlarda ko'shiw qubılısları. Puwlanıw ha'm qaynaw.  
 Kristallardıń simmetriyası ha'm simmetriya elementleri. Kristallardag'ı defektler. Kristallardıń eriwı ha'm sublimatsiyası.

### Tiykarg'ı a'debiyatlar

1. Kikoin A.K., Kikoin İ.K. Umumiy fizika kursi. Molekulyar fizika. «Wqituvshi» baspası. Tashkent. 1978. 507 b.
2. Sivuxin D.V. Umumiy fizika kursi. Termodinamika ha'm molekulyar fizika. «Wqituvshi» baspası. Tashkent. 1984. 526 b.
3. Sivuxin D.V. Umumiy fizika kursidan masalalar twplami. Termodinamika va molekulyar fizika. «Wqituvshi» baspası. Tashkent. 1983. 228 b.
4. Volkenshteyn V.S. Umumiy fizika kursidan masalalar twplami. «Wqituvshi» baspası. Tashkent. 1969. 464 b.
5. SHertov A., Vorobev A. Fizikadan masalalar twplami. «Wzbekiston» baspası. Tashkent. 1997. 496 b.
6. Nazirov E.N. ha'm boshqalar. Mexanika ha'm molekulyar fizikadan praktikum. «Wzbekiston» baspası. Tashkent. 2001.
7. İ.V.Savelev. Kurs obshey fiziki. Molekulyarnaya fizika i termodinamika. İzdatelstvo «Astel». 2002. 208 s.

### Qosimsha a'debiyatlar

1. Reyf F. Statisticheskaya fizika. İzdatelstvo «Nauka» 1977. 351 s.
2. Axmadjonov O. Mexanika ha'm molekulyar fizika. «Wqituvshi» baspası. Tashkent. 1981.
3. Kittel SH. Elementarnaya statisticheskaya fizika. İzdatelstvo İnostrannoy literaturı. Moskva. 1980.
4. Matveev A.N. Molekulyarnaya fizika. İzdatelstvo «Vısshaya shkola». 1987. 360 b.
5. İrodov İ.E. Zadashi po obshey fizike. İzdatelstvo «Nauka». Moskva. 1979. 416 s.
6. Gurev L.G., Kortnev A.V i dr. Sbornik zadash po obshemu kursu fiziki. İzdatelstvo «Vısshaya shkola». Moskva. 1972, 432 s.
7. Wlmasova M.X. va boshqalar. Fizikadan praktikum. Mexanika ha'm molekulyar fizika. «Wqituvshi» baspası. Tashkent. 1996.
8. Zaydel İ. Elementarnıe otsenki oshibok izmereniy. Moskva. 1959.
9. Telesnin R.V. Molekulyarnaya fizika. İzdatelstvo «Vısshaya shkola». 1965. 298 s.
10. R.M.Abdullaev, İ Xamidjonov, M.A.Karabaeva. «Molekulyar fizika» Universitet. Toshkent. 2003 y.
11. R.M.Abdullaev, X.M.Sattorov. «Molekulyarnaya fizika» Obshiy fizicheskıy praktikum. Tashkent. 2004.
12. B.A.Abdikamalov. Molekulalıq fizika boyınsha lektsiyalar tekstleri. No'kis. 2008 (adresı [www.abdikamalov.narod.ru](http://www.abdikamalov.narod.ru)).

## Sabaqlarg'a mo'lishlengen oqiw bag'larlamasi

Lektsiyaliq sabaqlar ko'lemi 40 saat. A'meliy sabaqlar 36 saat.

	Temalar atları	Lektsiyaliq saatlar sanı	A'meliy saatlar sanı	Paydalanıla- tug'in a'debiyatlar
1	<b>Kirisiw.</b> Molekulalıq fizika pa'ni. Pa'nnin' maqseti. Pa'nnin' wazıypası, metodikalıq ko'rsetpeler, bahalaw kriteriyleri. Pa'nnin' qa'nige tayarlawda tutqan ornı. Predmetler aralıq baylanıslar.	2		
2	<b>Statistikalıq usıl.</b> İtimallıqlar teoriyasınan elementar mag'lıwmatlar. Tosınnan ju'zege ketelug'in waqıyalar menen qubılıslar. İtimallıq. İtimallıqlar teoriyasının' tiykarg'ı tu'sinikleri.	2	2	
3	İtimallıqlar u'stinde a'meller. Tarqalıw funktsiyası. Gauss tarqalıwı. Sistemanın' makroskopiyaalıq ha'm mikroskopiyaalıq xalları. Binomallıq tarqalıw. Puasson tarqalıwı.	2	2	
4	<b>İdeal gazlerdin' kinetikalıq teoriyası.</b> İdeal gaz. Molekulalıq-kinetikalıq teoriyanın' tiykarg'ı ten'lemesi. Jıllılıq ha'm temperatura. Absolyut temperaturanı anıqlaw. Temperaturalar shkalaları.	2	2	
5	İdeal gazdin' hal ten'lemesi. İdeal gaz nızamları.	2	2	
6	Barometriklik formula. Boltsman tarqalıwı. Molekulalardın' tezlik qurawshıları boyınsha tarqalıwı. Molekulalardın' tezliklardin' modulleri boyınsha tarqalıwı – Maksvell tarqalıwı.	2	2	
7	Klassikalıq fizikanın' qollanıw shekleri. Boltsman tarqalıwı. Maksvell-Boltsman tarqalıwı. Fermi-Dirak ha'm Boze-Eynshteyn statistikaları haqqında tu'sinik.	2	2	
8	<b>Jıllılıqtın' kinetikalıq teoriyası.</b> İdeal gazdin' ishki energiyası. Ishki energiyanın' erkinlik da'rejeleri boyınsha ten' tarqalıw nızamı. Jumıs ha'm jıllılıq mug'darı.	2	2	
9	Termodinamikanın' birinshi baslaması. Gaz ko'lemi o'zgergende islengen jumıs.	2	2	
10	İdeal gazlerdin' jıllılıq sıyımlıg'ı. İdeal gazlardin' jıllılıq sıyımlıg'ının' ta'jiriybe juwmaqları menen saykes kelmeytug'inlig'ı. Jıllılıq sıyımlıg'ının' kvant teoriyası haqqında tu'sinik. Politroplıq protsess.	2	2	
11	<b>Ko'shiw protsesslerinin' elementar kinetikalıq teoriyası.</b> Molekulalıq qozg'alıslar ha'm ko'shiw qubılısları. Effektivlik kese-kesim. Ortasha erkin ju'riw jolı. Diffuziya ha'm zattın' ko'shiwi. Jabısqaqlıq ha'm impulstin' ko'shiwi.	2	2	
12	<b>Termodinamika elementleri.</b> Jıllılıqtı mexanikalıq jumısqa aylandırıw. Kaytımlı ha'm qaytımlı emes protsessler.	2	2	
13	İzoprotsessler. Tsikllıq protsess ha'm tsikl jumısı.	2	2	

14	Termodinamikadin' ekinshi baslamasi. Jilliliq mashinalari ha'm olardin' paydali jumis koeffitsienti (P.J.K.). Karno tsikli ha'm onin' P.J.K. Karno teoremlari. Termodinamikadin' ekinshi baslamasinin' ha'r tu'rli ta'ripleniwi.	2	2	
15	Entropiya. Klauzius ten'sizligi. Entropiya ha'm itimalliq. Entropiya ha'm ta'rtipsizlik.	2	2	
16	<b>Haqiyqiy gazler.</b> Molekulalar araliq o'z-ara ta'sirlesiw ku'shleri. Eksperimentalliq izotermalar. Haqiyqiy gazdin' hal ten'lemesi.	2	2	
17	Van-der-Vaals izotermalari. Kritikalik xal. Gazdin' boshliqqa ken'eyiwi. Djoul-Tomson effekti.	2	2	
18	<b>Suyiqliqlardin' qa'siyetleri.</b> Bet kerimi. Eki ortalik arasindag'i ten' salmaqliq sha'rtleri. Suyuqliqtin' iymeygen betinde ju'zege keliwshi ku'shler. Kapillyar qubilislar. Suyiq eritpeler. Ideal eritpeler. Osmosliq basim ha'm onin' ju'zege keliw mexanizmi.	3	2	
19	<b>Qatti deneler.</b> Kristalliq ha'm amorf deneler. Kristalliq pa'njere. Kristallografiya liq koordinatalar sisteması. Brave pa'njereleri.	2	2	
20	Qatti denelerdin' jilliliq qa'siyetleri. Jilliliq siyimlig'i. Eynshteyn ha'm Debay modelleri. Qatti denelerdin' hal ten'lemesi. I ha'm II a'wlad fazalaq o'tiwler.	2		
JA'MI		40 saat	36 saat	