

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

Berdaq atindag'ı Qaraqalpaq ma'mleketlik universiteti

Ulwma fizika kafedrası

B. A'bdikamalov

MOLEKULALIQ FIZIKA

pa'ni boyınsha lektsiyalar tekstleri

Fizika qa'nigeliginin' 1-kurs studentleri
ushın du'zilgen

No'kis 2005

Mazmuni

Mexanika ha'm molekulyar fizika kurslari ushin jazilg'an ulıwmalıq kirisiw	3
§ 2-1. Ko'p bo'lekshelerden turatug'm sistemalarđı u'yreniw usılları	5
§ 2-2. Matematikalıq tu'sinikler	10
§ 2-3. Sistemalardıń makroskopiyalıq ha'm mikroskopiyalıq halları.	21
§ 2-4. Birdey itimallıqlar postuladı ha'm ergodik gipoteza.	23
§ 2-5. Makrohallar itimallıg'ı.	28
§ 2-6. Fluktuatsiyalar.	34
§ 2-7. Maksvell bo'listiriliwi.	38
§ 2-8. Basım	45
§ 2-9. Temperatura	47
§ 2-10. Boltsman bo'listiriliwi.	50
§ 2-11. Energiyanıń erkinlik da'rejesi boyınsha bo'listiriliwi.	55
§ 2-12. Broun qozg'alısınń ma'nisi.	57
§ 2-13. Maksvell-Boltsman bo'listiriliwi.	58
§ 2-14. Termodinamikanıń birinshi baslaması.	60
§ 2-15. Differentsial formalar ha'm tolıq differentsiallar.	65
§ 2-16. Qaytımlı ha'm qaytımsız protsessler.	67
§ 2-17. Jıllılıq sıyımlılıg'ı.	69
§ 2-18. Ideal gazlerdegi protsessler.	76
§ 2-19. Ideal gaz entropiyası.	82
§ 2-20. Tsikllıq protsessler.	88
§ 2-21. Temperaturalardıń absolyut termodinamikalıq shkalası.	93
§ 2-22. Termodinamikanıń ekinshi baslaması.	96
§ 2-23. Termodinamikanıń ekinshi baslamasına berilgen anıqlamalar.	102
§ 2-24. Termodinamikalıq potentsiallar ha'm termodinamikalıq ornıqlılıq sha'rtleri.	104
§ 2-25. Molekulalardag'ı baylanıs ku'shleri.	112
§ 2-26. Fazalar ha'm fazalıq o'tiwler.	117
§ 2-27. Gaz halınan suyıq halg'a o'tiw.	120
§ 2-28. Klapeyron-Klauzius ten'lemesi.	122
§ 2-29. Van-der-Vaals ten'lemesi.	125
§ 2-30. Djoul-Tomson effekti.	129
§ 2-31. Bet kerimi.	134
§ 2-32. Suıqlıqlardıń puwlanıwı ha'm qaynawı.	137
§ 2-33. Osmoslıq basım.	139
§ 2-34. Qattı denelerdin simmetriyası.	141
§ 2-35. Qattı denelerdin jıllılıq sıyımlılıg'ı.	148
§ 2-36. Qattı denelerdin jıllılıq ken'eyiwi.	157
§ 2-37. Ko'shiw protsessleri.	159
Qosımshalar	165

Mexanika ha'm molekulyar fizika kurslari ushin jazilgan ulumiy kirish

Ushbu fizika kursining «Mexanika» ha'm «Molekulyar fizika» bo'limlari bo'yicha lektsiyalar mazmunini O'zbekiston Respublikasi universitetlarining fizika qanigeli studentlari ushin duzilgen oqiw bag'darlamasi tiykarida duzildi. Kursti u'yreniw barisinda studentlar noqat kinematikasidan baslap materialliq noqatlar sistemasini kinematikasi, dinamikaning barliq tiykarig'ini nizamlari ha'm da'stu'rge aylang'an joqari oqiw orinlari mexanikasi materiallari menen tanisadi.

Kursti o'tiw barisinda relyativistik mexanikaga a'dewir itibar berilgen. Studentlar Lorents tu'rlandiriwleri ha'm onnan kelip shig'atug'in na'tiyjeler, relyativistik qozg'alis ten'lemesi, joqari tezlikler ushin saqlanw nizamlarin toligh'iraq u'yrenedi.

Matematikaliq an'latpalardi jaziw kitaplarda qollanilatug'in shriflarda a'melge asirilgan. Vektorlar juwan ha'riplerde jazilgan. Misali \mathbf{v} tezlik vektorina sa'ykes keletug'in bolsa, \mathbf{v} sol vektordin san ma'nisin beredi.

Bo'lshek belgisi retinde ko'birek / belgisi qollanilgan. Biraq tiyisli orinlarda $\frac{1}{\mu}$ yamasa $\frac{1}{2}$ tu'rdegi jaziwlar da paydalaniladi. Sol siyaqli tuwindilardi belgilew ushin da eki tu'rli jaziw usili keltirilgen. Misali d/dt yamasa $\frac{d}{dt}$ (dara tuwindilar jag'dayinda $\frac{\partial}{\partial t}$) belgileri. Bul jaziwlaridin barligh'ini da lektisiya tekstlerin oqiwdi jen'illestiriw ushin paydalanilgan.

Kursta ko'p sanli bo'lekshelerden turatug'in sistemalardi u'yreniwidin matematikalik tiykarlari, molekulyarlarning ha'r qiyli parametrlar bo'yicha bo'listiriliwleri a'dewir orin aladi. Sonin na'tijesinde student statistikaliq fizikaga tikkeley baylanisli bolgan bilimlardi u'yrenedi. Bunnan keyin fizikadagi termodinamikaliq usillardi o'zlestiriw baslanadi. Bul jerde termodinamikaning baslamalari ha'm olardan kelip shig'atug'in na'tiyjeler toliq ko'lemde keltirilgen.

Barliq «Molekulyar fizika» kurslarindagi molekulyar o'z-ara ta'sir etisetug'in real gazler fizikasina a'dewir diqqat awdarilgan. Bul jerde barliq na'tiyjeler tiykaridan Van-der-Vaals ten'lemesinin ja'rdeminde keltirilip shig'arilgan. Qatti denelerdin qurilisindagi simmetriyalik nizamlar, qatti denelerdin jillilik siyimlilik mashqalari toligh'ini menen sholing'an. «Molekulyar fizika» bo'limi ko'shiw protsesslerin u'yreniw menen juwmaqlanadi.

Lektsiyalar tekstlerinde za'ru'rli bolgan formulalar tiykaridan SI ha'm SGS sistemalarinda jazilgan.

Lektsiyalar tekstleri eki bo'limge (mexanika ha'm molekulyar fizika) bo'lingan. Ha'r bir bo'limde paragraflar menen formulalar o'z aldina nomerlengen. Misali § 1-10 paragrafi mexanika bo'liminin 10-paragrafin, § 2-10 bolsa molekulyar fizika bo'liminin 10-paragrafin an'latadi.

Lektsiyalardi du'ziwde tariyxii a'debiyat ken' tu'rde paydalanildi. Ma'selen Nyuton nizamlari bayan etilgende onin 1686-jili birinshi ret jariq ko'rgen «Natural filosofiyaning matematikalik baslamasi» («Natural filosofiya baslamasi» dep te ataladi) kitabidan aling'an mag'liwmatlar paydalaniladi. Sonin menen birge lektisiya kurs 19-asirdin aqirinda jazilgan Petrograd universiteti professori O.D.Xvalsonnin «Fizika kursu» kitabidan mag'liwmatlar keltirilgen. Bul mag'liwmatlar fizika ilimine bolgan ko'z-qaraslardin bizin ku'nlerimizge shekem qanday o'zgerislerge ushirag'anlig'in ayqin sa'wlelendiredi.

Joqarida aytilganlar menen bir qatarda lektisiya tekstlerin tayarlawda son'g'i waqitlari rawajlang'an eller joqari oqiw orinlari menen kolledjlerinde ken'nen tanilgan a'debiyatlar da qollanildi. Olardin 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.

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

- А.Н.Матвеев. Механика и теория относительности. «Высшая школа». Москва. 1976. 416 с.
 И.В.Савельев. Курс общей физики. Книга 1. Механика. Москва. «Наука». 1998. 328 с.
 Д.В.Сивухин. Общий курс физики. Том I. Механика. Изд. «Наука». Москва. 1974. 520 с.
 С.П.Стрелков. Механика. Изд. «Наука». Москва. 1975. 560 с.
 С.Е.Хайкин. Физические основы механики. Изд. «Наука». Москва. 1971. 752 с.
 А.Н.Матвеев. Молекулярная физика. Изд. «Высшая школа». М. 1987. 360 с.
 Д.В.Сивухин. Общий курс физики. Том II. Термодинамика и молекулярная физика. Изд. «Наука». М. 1975. 552 с.
 Д.В.Сивухин. Умумий физика курси. Термодинамика ва молекуляр физика. Ташкент. «Ўқитувчи». 1984.
 А.К.Кикоин, И.К.Кикоин. Молекулярная физика. Изд. «Наука». М. 1976. 480 с.
 А.К.Кикоин, И.К.Кикоин. Умумий физика курси. Молекуляр физика. Ташкент. «Ўқитувчи». 1978.

§ 2-1. Ko'p bo'lekshelerden turatug'in sistemalardi u'yreniw usılları

Ko'p bo'lekshelerden turatug'in sistemalardi u'yreniwdin' 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. Ideal gaz modeli. Dinamikalıq, statistikalıq ha'm termodinamikalıq usıllar.

Materiallıq noqat ha'm absolyut qattı dene modellerin paydalanıw 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'lshemleri inabatqa alınbaydı. Ekinshiden ishki qurılıs penen o'lshemler esapqa alıng'an jag'daylarda bul tu'sinikler deneler iyelep turg'an ko'lemdegi inertlılıktin' bo'listirilıwin beriw ushın islendi. Sonın' menen birge bul bo'listirilıw waqıt boyınsha o'zgermeydi dep esaplandı. Demek, mexanikada materiallıq denelerdin' ishki qurılısı ha'm ishki qozg'alısları izertlenbeydi. Sonlıqtan materiallıq noqat penen absolyut qattı dene modelleri materiallıq denelerdin' ishki qa'siyetlerin u'yreniw ushın 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'daylarga 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'alısları 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 molekulalardıń bir biri menen ta'sirlesiwi 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 ushın ta'n bolg'an kvantlıq qa'siyetlerdi esapqa alıw za'ru'rligi payda boladı. Bul nızamlar da kvant mexanikasında belgili. Bul nızamlardıń mazmunı bul kursta a'hmiyetke iye emes. A'hmiyetlisi sol nızamlardıń belgili ekenliginde. Sonlıqtan *materiallıq denenin' modeli qozg'alıs nızamları ha'm o'z-ara ta'sirlesiwi belgili bolg'an atomlar menen molekulalardan turadı.*

Atomlar menen molekulalar massaları. Molekulalıq fizikada ko'pshilik jag'daylarda atomlar menen molekulalardıń massaları absolyut ma'nisi menen emes, al salıstırmalı o'lsheń birliǵi 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}C uglerod izotopı massasınıń $\frac{1}{12}$ u'lesi qollanıladı.

$$m_u = \frac{^{12}\text{C} \text{ углерод изотопы массасы}}{12} = 1.669 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1.669 \cdot 10^{-24} \text{ g.} \quad (1-1)$$

Salıstırmalı molekulalıq massa yamasa molekulanın' salıstırmalı massası

$$M = \frac{m_{\text{mol}}}{m_u} = \frac{\text{молекула массасы}}{^{12}\text{C} \text{ углерод изотопы массасы}} * 12 \quad (1-2)$$

formulası menen anıqlanadı. Bul jerde m_{mol} molekula massasınıń absolyut ma'nisi. Sa'ykes formula ja'rdeminde m_{mol} din' ornına atomlıq massanın' absolyut ma'nisi qoyılsa salıstırmalı atomlıq massa da anıqlanadı.

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

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

^{12}C uglerod izotopının' 0.012 kilogramında (12 gramında) qansha strukturalıq element bolsa zattın' 1 molinde de sonday strukturalıq element boladı. Solay etip anıqlama boyınsha qa'legen zattın' 1 moli birdey sandag'ı strukturalıq elementke iye boladı. Bul san Avagadro sanı dep ataladı.

$$N_A = [0.012 \text{ kg}/12 m_u] \frac{1}{\text{мол}} = 10^{-3} \text{ kg}/m_u \frac{1}{\text{мол}} = 6.02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{мол}}. \quad (1-3)$$

Demek

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

Mısal retinde vodorod atomlarının' bir moli haqqında ga'p etiw mu'mkin. Ha'r bir vodorod atomının' massasınıń $1.66 \cdot 10^{-24}$ g ekenligin esapqa alıp, bul sandı Avagadro sanına ko'beytsek 1 g/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 zatlardın' mug'darın anıqlaw ma'nisin jog'altadı. Mısalı ıdista suwdın' 2 moli bar dep aytıw

duris emes. Al idista suw molekularının' 2 moli bar dep aytiw duris boladı. Bul so'z idista $296.02 \cdot 10^{23}$ dana N_2O molekulasının' bar ekenligin bildiredi. Ja'ne de, eger de bazı bir ko'lemde 10^{24} erkin elektron bar bolatug'ın bolsa bul ko'lemde $10^{24}/(6.02 \cdot 10^{23}) = 1.66$ mol elektron bar dep aytamız. Eger suwdın' bazı bir mug'darı 1 mol N_2O suw molekulasınan turatug'ın bolsa onda ol 2 mol vodorod atomlarınan ha'm 1 mol kislorod atomlarınan (yag'niy 10 mol protonlardan, 8 mol neytronlardan ha'm 10 mol elektronlardan) turadı.

Molekulalıq fizikada 1 mol zattın' massası bolg'an *molyar massa* tu'sinigi qollanıladı:

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

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

$$M = m_{\text{mol}} \cdot 10^{-3} \text{ m}_u = 10^{-3} \text{ kg/mol}. \quad (1-6)$$

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

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

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

Moller shaması v strukturalıq elementler sanı n menen bılay baylanısqa:

$$v = n/N_A. \quad (1-7)$$

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

Zatlardın' agregat halları. Atomlar menen molekularların' o'z-ara ta'sir etisiwin izertlewler olar arasında salıstırmalı u'lken qashılıqlarda tartıswdın', al kishi qashılıqlarda iyerisiwdın' bolatug'ınlıg'ın ko'rsetedi. O'zlerinin' ta'biyatı boyınsha bul ku'shler elektromagnit ku'shleri bolıp tabıladı. Kishi qashılıqlardag'ı iyerisiwdın' orın alıwı atomlar menen molekularların' ken'isliktin' belgili bir bo'limin iyeleytug'ınlıg'ının' saldarı bolıp tabıladı. Sonlıqtan olar sol ko'lemnin' basqa atomlar menen molekularların' iyelewine qarsılıq jasaydı.

Atomlar menen molekular barlıq waqıtta qozg'alısta boladı ha'm sonlıqtan kinetikalıq energiyag'a iye boladı. Tartılıs ku'shleri atomlar menen molekularları tutas bir denege 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 intensivliligine baylanıslı. Eger atomlar menen molekularları 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 intensivliligi shama menen o'z-ara ten' bolsa onda suyıqlıq hal ju'zege keledi. Usı ayılq'anlardın' barlıg'ı da sapalıq xarakterge iye. «Intensivlilik» tu'sinigine sanlıq jaqtan o'lshem berilgen joq. Usınday sanlıq o'lshem molekularların' o'z ara tartısw potentsiallıq energiyası menen kinetikalıq energiyası bolıp tabıladı. Eger barlıq molekularların' kinetikalıq energiyaların' qosındısı potentsial energiyaların' 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'lemin de saqlamaydı. Gazdın' ko'lemi sol gaz jaylasqan ıdıstın' forması menen anıqlanadı. Idıs bolmag'an jag'dayda barlıq zat pu'tkil ko'lemde toltırıp turıwg'a umtıladı. Gazlerdegi molekularlar 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'zgeredi. 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. sh molekulanın' bir waqıtta soqlıg'ısıwı siyrek ushırasadı.

Qattı halda molekulalar menen atomlar bir biri menen baylanısqa. 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 salıstırg'andag'ı jaylasıwları belgilenbegen, olar bir birine salıstırg'anda salıstırmalı tu'rde a'stelik penen orınlardıń o'zgeredi.

Ideal 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 noqatlıq 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.* Ideal gaz bo'leksheleri arasındağ'ı sharlardın' soqlıg'ısıw nızamları boyınsha soqlıg'ısıwdın' orın alatug'ınlıg'ın ayırıqsha atap o'tiw kerek. 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. Ideal gazdın' qa'siyetine jetkilikli da'rejede siyrekletilgen gazler sa'ykes keledi.

Dinamikalıq usıl. Soqlıg'ısıwlar arasında bo'leksheler tuwrı sıziq boyınsha qozg'aladı. Gaz toltırılğ'an ıdistin' diywalları menen soqlıg'ısıw nızamları da belgili. Sonlıqtan belgili bir waqt 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 buring'ı orınları menen tezliklerinde printsipinde esaplaw mu'mkin. Qa'legen waqt 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 sm^3 gazde shama menen $2.7 \cdot 10^{19}$ molekula jaylasadı. Demek bazı bir waqt momentindegi barlıq molekulalardıń iyelegen orınlardıń (koordinataların) ha'm tezliklerin jazıw ushin $692.7 \cdot 10^{19}$ san kerek bolğ'an bolar edi. Eger qanday da bir esaplaw mashinası sekundına 1 mln. sandı esapqa alatug'ın bolsa, onda $692.7 \cdot 10^{13} \approx 6$ mln. jıl kerek bolğ'an bolar edi. Tap usınday tezliklerde kinetikalıq energiyanı esaplaw kerek bolsa onda shama menen 21 mln. jıl kerek bolğ'an bolar edi. Ma'seleni bunday etip sheshiwdin' texnikalıq jaqtan mu'mkin emes ekenligi endi belgili boldı.

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

Mısalı 1 sm^3 ko'lemdegi 1 mlrd. molekula sanlıq qatnasta Jerde jasawshı barlıq adamg'a salıstırg'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 atırg'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 ushin onshama ko'p ma'limlemelerdin' bolıwı kerek emes ekenligi de tu'sinikli.

Solay etip juwmaqlap aytqanda *ko'p sanlı bo'lekshelerden turatug'in sistemalarđı 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'in sistemalarđı 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 aytılwı 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'in sistemalarđın' 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'in sistemalarđı onın' ishki qurılısın esapqa almay-aq izertlewge boladı. Bunday jag'dayda sistemanı tolıg'ı menen qamtıytug'in 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 energiyanın' 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'in protsesslerdin' ishki mexanizmleri menen qızıqpaydı. Ko'p sanlı bo'lekshelerden turatug'in sistemalarđı u'yreniwdin' bunday usılın *termodinamikalıq usıl* dep ataymız.

Ko'p sanlı bo'lekshelerden turatug'in sistemalarđı 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 molekularlardın' ortasha kinetikalıq energiyası menen sol molekularlar arasındag'ı o'z-ara ta'sir etisiwge sa'ykes keletug'in ortasha potentsial energiyanın' o'z-ara qatnasına baylanıslı: gazlerde molekularlardın' ortasha kinetikalıq energiyası ortasha potentsial energiyasının' modulinen u'lken (tartılısqa sa'ykes keliwshi potentsial energiyanın' teris belgige iye bolatug'ınlıg'ın eske tu'siremisiz), suyuqlıqlarda energiyanın' sol eki tu'ri bir birine barabar (shama menen ten'). Qattı denelerde bolsa ta'sirlesidin' ortasha potentsial energiyası molekularlardın' ortasha kinetikalıq energiyasınan a'dewir (ko'p ese) ko'p.

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

Ko'p bo'lekshelerden turatug'in 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'in sistemani statistikalıq ha'm termodinamikalıq usıllar bir birin tolıqtıradı.

Sorawlar:

Molekulalıq fizikadag'ı zatlardın' modelinin' tiykarǵı elementlerin aytıp berin'iz.

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

Qanday sebeplerge baylanıslı ko'p bo'lekshelerden turatug'in sistemani 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'in sistemani termodinamikalıq ta'riplewdin' tiykarǵı o'zgeshelikleri nelerden ibarat?

§ 2-2. Matematikalıq tu'sinikler

Tosattan bolatug'in qubılıslar ha'm shamalar. Itimallıq. Itimallıqtı jiyiligi boyınsha anıqlaw. Itimallıq tıǵ'ızlıǵ'ı. Itimallıqlardı ulıwma jag'daylarda qosıw. Itimallıqlardıń normirovkası. Sha'rtli tu'rdegi itimallıq. Bir birinen g'a'rezsiz waqıyalar. Ko'p waqıyalar ushın itimallıqlardı ko'beytiw. Tosattan bolatug'in diskret shamanın' ortasha ma'nisi. Dispersiya. Itimallıqlardıń tarqalıw funktsiyası. Gauss bo'listiriliwi.

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

Tosattan bolatug'in waqıyalar. Qozǵ'alıstı dinamikalıq jaqtan ta'riplewden bas tartıwdın' na'tiyjesinde ma'seleni qoyıwı o'zǵertiwge 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 qoyılǵ'anda anıq juwap beriwdin' mu'mkinshiligi bolmaydı. Qarap atırılǵ'an aymaqta berilgen bo'lekshe bazı bir waqıt aralıǵ'ında bola ma? degen sorawǵ'a da juwap beriwdin' mu'mkinshiligi joq. Sonlıqtan ken'isliktin' bazı bir aymag'ında bo'leksheni tabıw tosattan bolatug'in waqıya bolıp sanaladı.

Turmıstag'ı geypara waqıyalardıń qashan bolatug'inlig'in bilmewimizdin' sebebinen solardıń tosattan ju'z beriwı sub'ektiv jag'day bolıp tabıladı. Biraq ko'pshilik jag'daylarda olardıń tosattan bolıwı ob'ektiv ha'm printsipiallıq jag'day bolıp tabıladı. Sonlıqtan tosattan ju'z beretug'in waqıyanı da'l boljaw haqqındaǵı ma'selenin' qoyılıwı fizikalıq ma'niske iye emes.

Tosattan bolatug'in waqıyalar ushın arnawlı tu'sinikler ha'm sa'ykes matematikalıq apparat bar. Bul ma'seleler menen *itimallıqlar teoriyası* shug'ıllanadı.

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

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

Itimallıqtı jıyılık boyınsha anıqlaw. Ideal gaz toltırılǵan kólemde eki birdey bólimge bólemiz. Meyli biz hár bir bóleksheni baqlaw múmkinshiligine iye bolǵan bolayıq (bólekshelerge sezilerliktey tásir etpey bir birinen ayıra alıw hám hár bir bólekshenin’ keyninen gu’zetiw múmkinshiligi). Sistemanı qorshap turg’an ortalıq ózgermeytug’ın bolsın. Gu’zetilip atırǵan bólekshenin’ kólemnin’ bir bóliminde bolıw waqıyasın qaraymız. Na’tiyje tek g’ana bólekshe sol bólimde «boldı» yamasa «bolmadı» degen sózlerden turadı. Meyli N arqalı baqlawlardın’ (sınap kóriwlerdin’) ulıwma sanı belgilengen bolsın. N_A waqıya «bolǵan» jag’daylar sanı. A - waqıyanın’ ózi. A waqıyasının’ bolıw itimallıǵı

$$R(A) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_A}{N} \quad (2-1)$$

formulası ja’rdeminde anıqlanadı.

Bul jerde ózgerissiz qalatug’ın sırtqı jag’daylardag’ı sınap kóriwler sanı $N \rightarrow \infty$ sha’rti úlken a’hmiyetke iye. Bir sistema ústinen júrgizilgen kóp sanlı sınap kóriwler ornına kóp sandag’ı birdey sistemalar ústinen júrgizilgen ayırım sınap kóriwler haqqında aytıwǵa boladı. Kóp sanlı birdey bolǵan sistemalar *ansambli* dep ataladı. Sonlıqtan (2-1) degi N_A sanı bólekshe ıdístın’ berilgen yarımında jaylasqan jag’dayına sa’ykes keletug’ın ansambldegi sistemalar sanı bolıp tabıladı. N ansambldegi sistemalardın’ ulıwma sanı. A’lbette, eki anıqlama da durıs bolıp tabıladı. Biraq ayqın jag’daylar ushın júrgizilgen teoriyalıq esaplawlarda eki anıqlamanın’ biri ekinshisine qarag’anda qolaylıraq bolıp shıǵıwı múmkin.

Itimallıq tıǵızlıǵı. Eger waqıya úziksiz ózgeretug’ın shamalar menen táriplenetug’ın bolsa (2-1) formula menen itimallıqtı anıqlaw ma’niske iye bolmay qaladı. Mısalı bólekshenin’ tezligi 10 m/s qa ten’ bolıwının’ itimallıǵı nege ten’ dep soraw ma’niske iye emes. Bunday jag’dayda itimallıq ornına *itimallıq tıǵızlıǵı* tu’siniginen paydalanamız.

Endi gaz toltırılǵan ıdístı ΔV_i kólemlerine bólemiz ($i = 1, 2, \dots$). Bunday kólemler sanı sheksiz kóp. Baqlawlar (sınap kóriwler) sanın N arqalı belgileymiz. Hár bir baqlaw aktinde molekula qanday da bir ΔV_i kóleminde tabıladı. Meyli N ret baqlaw júrgizilgende ($N \rightarrow \infty$) molekula N ret ΔV_i kóleminde tabılsın. (2-1) anıqlamasına muwapıq kelesi baqlawdı molekulanı ΔV_i kóleminde tabıwdın’ itimallıǵı

$$R(\Delta V_i) = \lim_{N \rightarrow \infty} (N_i / N).$$

Eger salmaq ku’shi bar bolatug’ın bolsa molekulanı ıdístın’ to’meninde tabıwdın’ itimallıǵı joqarisında tabıwdın’ itimallıǵınan úlken boladı. Bul itimallıq kólem ΔV_i ge de baylanıslı. Sonlıqtan

$$f(x, u', z) = \lim_{\Delta V_i \rightarrow 0} P(\Delta V_i) / \Delta V_i = \lim_{\substack{\Delta V_i \rightarrow 0 \\ N \rightarrow \infty}} N_i / (\Delta V_i N). \quad (2-2a)$$

Bul jerde ΔV_i sheksiz kishireyip kelip tireletug’ın noqattın’ koordinatalar x, u', z penen belgilengen. Solay etip itimallıq tıǵızlıǵı dep molekulanı sheksiz kishi kólemde tabıw itimallıǵının’ sol kólemge qatnasın aytadı ekenbiz.

dV kólemindegi x, u', z noqatının’ a’tirapında N_0 baqlaw júrgizilgende (2-2a) an’latpasınan molekula

$$dN = N_0 f(x, u', z) dV$$

ret tabılatug’ınlıǵı kelip shıǵadı. V_i kóleminde molekula

$$N(V_1) = N_0 \int_{V_1} f(x, u', z) dx du' dz$$

ret tabiladi. Bul jerden V_1 ko'leminde molekulaning tabiliw itimallig'ı $R(V_1)$ bilay esaplanatug'ınlig'ı kelip shig'adı:

$$R(V_1) = N(V_1)/N_0 = \int_{V_1} f(x, u', z) dx du' dz.$$

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

Eger V_1 ken'isligi retinde pu'tkil ken'islikti ($V_1 \rightarrow \infty$) alınatug'ın bolsa, onda usı ko'lemdegi baqlawlar sanı sinap ko'riwler sanına ten', yag'nıy $N(V_1 \rightarrow \infty) = N_0$. $V_1 \rightarrow \infty$ ko'leminde bo'leksheni tabıw itimallıg'ı

$$R(V_1 \rightarrow \infty) = N(V_1 \rightarrow \infty)/N_0 = 1 = \int_{V_1 \rightarrow \infty} f(x, y, z) dx dy dz.$$

$$\int_{V_1 \rightarrow \infty} f(x, y, z) dx dy dz = 1$$

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

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

$$\int_V f dV = 1.$$

Qoyılg'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 ornalastırılğ'an jag'dayda eshektin' qaysı portsiyanı saylap alatug'ınlig'ı diskussiya qiling'an. Bunday jag'dayda eshek ne qıladı yamasa ol ashtan o'le me? A'llette eshek bunday logikani maqullamaydı. Ilim de bunday logikani maqullamaydı.

Waqıyaların tosınnan bolatug'ınlig'ın moyınlaw sol waqıyalar arasındag'ı sebeplik qatnasların bar ekenligin biykarlamaydı. 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. Waqıyaların tosınnan bolıwı bul waqıyalardı basqarıwğ'a bolmaytug'ınlig'ın, olardıñ qadag'alawdan tıs ekenligin an'g'artpaydı. Mısalı lotoreyadan utıw mu'mkinshiligin joqarılátıw 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 (su'wrette ko'rsetilgen), onda bo'leksheni V_1 ko'leminde tabıw V_2 ko'leminde

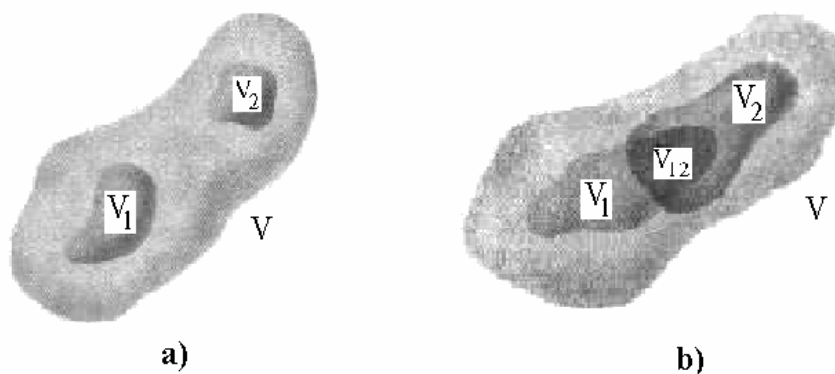
tabıwdı biykarlaydı. Solay etip eger bo'lekshe V_1 ko'leminde tabılg'an bolsa, bul waqıya sol bo'leksheni V_2 ko'leminde tabıwdı biykarlaydı.

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

$$R(V_1 + V_2) = (V_1 + V_2)/V = V_1/V + V_2/V = R(V_1) + R(V_2), \quad (2-3)$$

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.

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



2-1 su'wret.

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

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

Bunday waqıya ushın ulıwma formulanı bılay jazamız

$$R(A+V) = R(A) + R(V). \quad (2-4)$$

Bul formulada A yamasa V waqıyasının' ju'zege keliw itimallıg'ı $R(A+V)$ arqalı belgilengen. A ha'm V 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 bir birin biykarlaytug'ın ha'r qanday waqıyalardıń jıynag'ınan turatug'ın berilgen sistemadag'ı birdey mu'mkinshiliklerde orınlang'an sınıqlardıń sanı berilgen bolsın. Bul waqıyalardı 1, 2, ... n indeksleri menen belgileymiz. i belgisi menen belgilengen waqıyanın' ju'zege keliwler sanın N_i menen belgileymiz. Bunday jag'dayda

$$N_1 + N_2 + \dots + N_n = \sum_{i=1}^n N_i = N. \quad (2-5)$$

Demek

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

Bul formuladag'ı $R_i = i$ -waqıya itimallıg'ı.

$$\sum_{i=1}^n P_i = 1 \quad (2-6)$$

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

Itimallıqlardı 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 V waqıyası N_V ret baqlansın. Basqa sınaqlarda A waqıyası da, V waqıyası da baqlanbag'an bolsın. Biraq N_A menen N_V waqıyaların' arasında A waqıyasının' da, V waqıyasının' da ju'zege bir waqıtta kelgen jag'dayları da bar. Usınday waqıyalardıń sanın N_{AV} dep belgileyik. Bul na'tiyje eki ret esapqa alıng'an (A waqıyası menen de, V waqıyası menen de). Sonlıqtan A ha'm V waqıyaların' ulıwma sanı

$$N_{A+V} = N_A + N_V - N_{AV}.$$

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

$$R(A+V) = R(A) + R(V) - R(AV). \quad (2-7)$$

Bul jerde

$$R(AV) = N_{AV} / N \quad (2-8)$$

A ha'm V waqıyaların' bir waqıtta ju'zege keliw itimallıg'ı. Eger $R(AV) = 0$ bolsa (2-7) (2-4) ke o'tedi.

Itimallıqtı kontinuallıq interpretatsiya qıl'anda (2-7) formula a'piwayı tu'rge keledi. Meyli V_1 ha'm V_2 ko'lemli kesilisetug'ın bolsın. Kesilisiwden payda bolg'an ko'lemdi V_{12} dep belgileyik. Onda V_1 ha'm V_2 ko'lemli qosıwdan alınatug'ın ko'lem $V_1 + V_2 - V_{12}$. Usı ko'lemde bo'leksheni tabıwdın' itimallıg'ı

$$R(V_1 + V_2) = [V_1 + V_2 - V_{12}] / V = V_1 / V + V_2 / V - V_{12} / V = R(V_1) + R(V_2) - R(V_{12}).$$

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

Sha'rtli itimallıq. V waqıyasınan keyin A waqıyasının' sha'rtli tu'rde ju'zege keliw itimallıg'ı A waqıyasının' ju'zege keliwinin' sha'rtli itimallıg'ı dep ataladı.

N_V V waqıyası ju'zege kelgen sınaqlar na'tiyjesi sanı bolsın. Bul san ishinde N_{AV} ret A waqıyası ju'zege kelsin. Onda

$$R(A/V) = N_{AV} / N_V. \quad (2-9)$$

Itimallıqtı kontinual anıqlag'anda

$$R(V_1 / V_2) = V_{12} / V_2.$$

(2-9) formulasındag'ı ten'liktin' on' jag'ının' alımı menen bo'limin N ge bo'lsek

$$R(A/V) = (N_{AV} / N) / (N_V / N) = R(AV) / R(V). \quad (2-10)$$

$R(AV)$ (2-8) ja'rdeminde aniqlang'an A ha'm V waqiyalarinin' bir waqitta ju'zege keliw itimallig'ı.

$$R(AV) = R(V) \cdot R(A/V) = R(A) \cdot R(V/A) \quad (2-11)$$

tu'rinde ko'shirip jazılg'an (2-10) formulası *itimallıqlardı ko'beytiw formulası* dep ataladı.

G'a'rezsiz waqiyalar. Eger bir waqıyanın' ju'zege keliwi ekinshi waqıyanın' ju'zege keliwine baylanıssız bolsa bunday waqıyalardı g'a'rezsiz waqıyalar dep ataymız. Mısalı A waqıyası V waqıyasınan g'a'rezsiz bolsa $R(A/V) = R(A)$. G'a'rezsiz waqıyalar ushın (2-11)

$$R(AV) = R(A) \cdot R(V) \quad (2-12)$$

tu'rine iye boladı.

Ko'p waqıyalar ushın itimallıqlardı ko'beytiw formulası. Bul formula (2-11) formulasınan tikkeley alınadı. Mısalı A, V ha'm S waqıyalarinin' bir waqıtta ju'zege keliw itimallıg'ı

$$R(AVS) = R(AV) \cdot R(S/AV) = R(A) \cdot R(V/A) \cdot R(S/AV). \quad (2-13)$$

Eger waqıyalar g'a'rezsiz bolsa

$$R(AVS) = R(A) \cdot R(V) \cdot R(S). \quad (2-14)$$

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

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

$$\langle x \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i. \quad (2-15)$$

x_i shamalarinin' arasında o'z ara ten' keletug'inlar bolıwı mu'mkin. Sonlıqtan (2-15) qosındısınan' on' ta'repin tek g'ana ha'r qıylı bolg'an x_i kiriwi ushın toparlarg'a bo'liw kerek.

$$\langle x \rangle = \sum_j (N_j/N) x_j. \quad (2-16)$$

Bul formuladag'ı $N = \sum_j N_j$, sonın' menen birge N_j (2-15) tegi birdey x_i ler sanı. $N_j/N = R_j$ -

X tın' x_i ma'niske iye bolıw itimallıg'ı bolg'anlıqtan ortasha ma'nisti esaplaw (2-16) formulasın bılaysınsha jazamız:

$$\langle x \rangle = \sum_j P_j x_j. \quad (2-17)$$

Bul formula *itimallıqtı esapqa alıp tosattan bolatug'in shamanı matematikalıq ku'tiwdi* aniqlaydı.

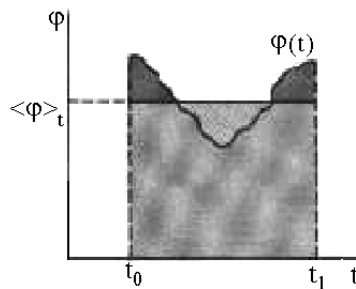
U'zliksiz o'zgeriwshi shamanın' ortasha ma'nisi. Ortasha ma'nis (2-15) sa'ykes keliwshi formula tiykarında esaplanıwı kerek. Meyli $\varphi(t)$ waqıt t nın' funktsiyası bolsın. Bunday jag'dayda t_0 den t_1 ge shekemgi intervalda ortasha ma'nis

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

formulası ja'rdeminde anıqlanadı. $\langle \varphi \rangle$ shamasının' geometriyalıq interpretatsiyası 3-su'wrette berilgen.

(2-17) an'latpası tosattan bolatug'ın u'zliksiz o'zgeretug'ın shama ushın bılayınsha ulıwmalastırıladı:

$$\langle x \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx. \quad (2-18)$$



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'.

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) birqansha tolıq jazılıwı mu'mkin.

a) diskret tosattan bolatug'ın shama ushın

$$\sigma^2 = \sum_j (x_j - \langle x \rangle)^2 R_j; \quad (2-19b)$$

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

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x_j - \langle x \rangle)^2 f(x) dx; \quad (2-19v)$$

Itimallıqtın' bo'listiriliw formulası. Tosattan bolatug'ın x shamasının' bazı bir x_0 shamasınan kishi bolıw itimallıg'ı (yag'nıy $x < x_0$):

$$R(x < x_0) = G'(x_0) = \sum_{x_j < x_0} P_j. \quad (2-20)$$

(2-20) ja'rdeminde aniqlang'an $G'(x_0)$ funktsiyasi itimalliqning bo'listiriliw funktsiyasi dep ataladi. zliksiz o'zgeretug'in shama ushın $G'(x_0)$ itimalliq tıg'ızlıg'ı menen to'mendegidey formula boyınsha baylanisqan:

$$G'(x_0) = \sum_{-\infty}^{x_0} f(x) dx. \quad (2-21)$$

(2-21) den

$$f(x) = dG'(x)/dx \quad (2-22)$$

ekenligi kelip shıg'adı. Bul formulaning ja'rdeminde $f(x) dx$ kiretug'in an'latpalar $dG'(x) = f(x) dx$ ten'ligin esapqa alg'an halda basqasha ko'shirilip jazılıwı mu'mkin. Mısalı (2-18)-formula bılay ko'rsetiledi:

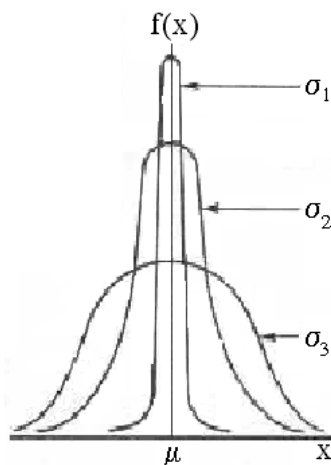
$$\langle x \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} x dF(x). \quad (2-23)$$

Soday-aq (2-20) menen (2-21) di esapqa alıp tosattan bolatug'in x shamasının' $x_1 < x < x_2$ intervalında bolıw itimallıg'ı

$$R(x_1 < x < x_2) = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx = \int_{x_1}^{x_2} dF(x) = G'(x_2) - G'(x_1) \quad (2-24)$$

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



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

Barlıq bag'ıtlardıń ekvivalent ekenligi tu'sinikli, al noqattın' X ha'm : ko'sherleri bag'ıtındag'ı awısıwları bir birinen g'a'rezsiz. Noqattın' X ko'sherinin' on' ha'm teris bag'ıtları boyınsha birdey itimallıqta ekenligine baylanıslı noqat tın' x koordinatasın iyelew itimallıg'ının' tıg'ızlıg'ı x^2 qa baylanıslı boladı, yag'nıy $\varphi(x^2)$ qa ten'. Usıg'an sa'ykes : koordinatası ushın $\varphi(u^2)$. (x,u) koordinatalarına iye $dS = dxdu$ maydanı elementinde jaylasıw itimallıg'ı:

$$dR = \varphi(x^2) \varphi(u^2) dS \quad (2-25)$$

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

$$dR = \varphi(x'^2) dS \quad (2-26)$$

Bul shamanın' (2-25) tegi shama menen bir ekenligi tu'sinikli. Sonlıqtan

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

φ funksiya'sının' tu'rın anıqlaw ushın kerek bolg'an funktsionallıq ten'leme. Bul ten'leme x penen u tin' qa'legen iqtıyarlı o'zgerisleri ushın durıs bolıwı kerek. An'latpanın' eki ta'repin de logarifmleybiz ha'm olardıń differentsialların tabamız:

$$\{\varphi'(x^2)/\varphi(x^2)\} 2xdx + \{\varphi'(u^2)/\varphi(u^2)\} 2udu = \{\varphi'(x^2+u^2)/\varphi(x^2+u^2)\} (2xdx + 2udu)$$

yamasa

$$[\varphi'(x^2)/\varphi(x^2) - \varphi'(x^2+u^2)/\varphi(x^2+u^2)] xdx + [\varphi'(u^2)/\varphi(u^2) - \varphi'(x^2+u^2)/\varphi(x^2+u^2)] udu = 0.$$

Bunnan differentsiallardın' bir birinen g'a'rezsizliginen

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

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

ekenligi kelip shıg'adı. Onda

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

eken. Olay bolsa

$$\frac{\varphi'(x^2)}{\varphi(x^2)} = \frac{\varphi'(y^2)}{\varphi(y^2)} = \pm \alpha. \quad (2-27)$$

Bul ten'lemenı integrallap

$$\varphi(x^2) = A \exp(\pm \alpha x^2), \varphi(u^2) = A \exp(\pm \alpha y^2) \quad (2-28)$$

ekenligine isenemiz.

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

Itimallıqlar tıg'ızlıg'ının' bo'listiriliwi bolg'an $\varphi(x^2) = A \exp(\pm \alpha y^2)$ funktsiyası *Gauss bo'listiriliwi* dep ataladı.

x boyınsha bo'listiriliwdi qaraymız. (2-28) boyınsha bo'listiriw maksimumı $x = 0$ noqatına tuwra keledi. Eger bul maksimum «noqatına tuwra keletug'in bolsa, onda

$$f(x) = V \exp[-\alpha(x-\mu)^2]. \quad (2-29)$$

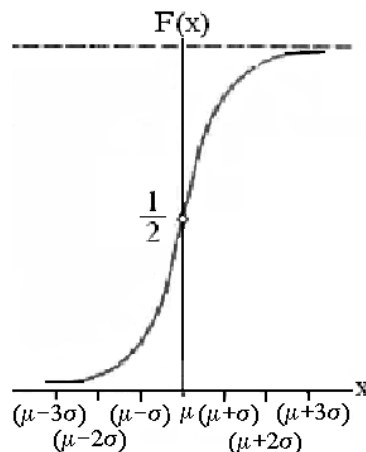
$$\int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-x^2) dx = \sqrt{\pi} \text{ ekenligin esapqa alıp, normirovka sha'rtinen}$$

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

Demek $V = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}}$. Sonlıqtan

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

Endi x shamasının' ortasha ma'nisi menen σ^2 dispersiyanı esaplaymız:



2-4-su'wret. Gauss itimallıqlar funktsiyasının' bo'listiriliwi

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

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

Demek $\alpha = 1/(2\sigma^2)$ ha'm itimallıqtın' bo'listiriliwinin' tıg'ızlıg'ı standart formada bılay jazıladı:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right]. \quad (2-30)$$

(2-21) ge sa'ykes itimallıqtın' bo'listiriliw funksiyası [(2-21) ge sa'ykes]

$$G'(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] dx. \quad (2-31)$$

Bul funksiya bo'listiriliwdin' **Gauss** yamasa **normal nızamı** dep ataladı. $\frac{x-\mu}{\sigma} = z$ dep belgilep

$$F(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp(-z^2/2) dz \quad (2-32)$$

bo'listiriliwdin' standart normal nızamı formulasın alamız.

Ko'p bo'lekshelerden turatug'ın sistemanı dinamikahq ta'riplewdin' mu'mkin emes ekenligi sebepli onın' mikrohahn baqlaw mu'mkin emes. Qala berse mikrohاللاردın' o'zgerisin baqlap barıw da mu'mkin emes. Usı mikrohاللاردın' bar ekenligin ha'm olardıń o'zgeretug'ınlıg'ın qalay da'lillewge boladı? Biz ayırım bo'lekshenin' halın ta'ripleytug'ın ha'rıyılı parametrlerdi o'lsheymiz ha'm usı bo'lekshenin' sistema menen ta'sirlesiwın baqlay alamız. Usınnan bo'leksheler sistemasının' mikrohالی ha'm bul mikrorhاللardın' o'zgeriwi haqqında juwmaq shıg'aramız.

Sorawlar:

Itimallıqtın' anıqlamasın berin'iz.

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

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

Shamanın' ortasha ma'nisi ortashalaw alınıp atırğ'an o'zgeriwshinin' ma'nisine g'a'rezli me? Usı juwaptı tastıyıqlaytug'ın mısallar keltirin'iz.

§ 2-3. Sistemalardıń makroskopiyaalıq ha'm mikroskopiyaalıq halları

Sistemalardıń makroskopiyaalıq ha'm mikroskopiyaalıq halları. Ten' salmaqlıq hal. Sistemalardıń statistikaalıq ansambli. Mikrokanonik ansambl.

Anıqlamalar. Ken'isliktin' sheklengen oblastına jaylasqan izertlenetug'ın fizikaalıq ob'ektlerdin' jıynag'ı sistema dep ataladı. Sistema shegarası materiallıq dene (mısalı ıdístın' diywalı) bolıwı da, sonın' menen birge oylap tabılğ'an ken'islikte ju'rgizilgen shegaralar bolıwı da mu'mkin. Shegara qozg'almaytug'ın da, qozg'alatug'ın da boladı. Sonın' menen birge shegara zatlardı yaki energiyanı o'tkizetug'ın yamasa o'tkizbeytug'ın da boladı.

Sistema shegarası menen birge usı sistemag'a kiriwshi zatlardın' fizikalıq ha'm ximiyalıq qa'siyetlerine de ta'riplenedi. U'yreniw baslanatug'ın 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' ıdıs diywalına urılıwı absolyut serpimli bolsın, al urılıwdın' saldarınan ıdıstın' diywalları o'zgeriske ushıramaydı dep esaplayıq (ıdıstın' massası u'lken bolg'an jag'day). Solay etip V ko'lemindegi ideal gaz usı ko'lemnin' sırtındag'ı materiallıq deneler menen energiya almaspaydı, yag'nıy izolyatsiyalang'an bolıp tabıladı. Usınday sha'rtler orınlang'anda ıdıstıg'ı gaz sırttan bolatug'ın 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 ayılğ'an. Da'l anıqlama keyinirek beriledi.

«Jetkilikli waqıt o'tkennen keyin» waqıtı degenimizde basımlar menen temperaturalar ten'lesetug'ın waqıtı tu'sinemiz. Bul waqıt ko'shiw qubılısların u'yreniw din' na'tiyjesinde bahalanıwı mu'mkin. Ha'zirshe ten'lesiw ses tezligi v_{ses} menen boladı dep qabıl etemiz. Eger 1 ıdıstın' sıızılıq o'lshepleri bolatug'ın bolg'an jag'dayda basımlardın' ten'lesetug'ın waqıtı shama menen $1/v_{\text{ses}}$ ke ten'. Uzunlıg'ı 1 m ge ten' ıdıs ushın $3 \cdot 10^{-3}$ sekundtı quraydı. Eger u'yrenshikli makroskopiyalıq sezimler tiykarında aytsaq bul waqıt ju'da' kishi waqıt. Al mikroskopiyalıq qubılıslar ko'z-qarasınan bul u'lken waqıt. Misalı, normal jag'daylarda 1 molekula 1 sekund waqıt 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, temperatura 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 misallar bolıp tabıladı. Bunday parametrler ishki ha'm sırtqı parametrler bolıwı mu'mkin. Ishki parametrler dep sistemanın' fizikalıq ob'ektleri ta'repinen anıqlanatug'ın parametrlerge aytamız. Al sırtqı parametrler 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 $1^3 = 1 \text{ sm}^3$ 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, u_i, z_i) koordinataları ha'm olardın' tezliklerinin' 3n proektsiyaları (v_{xi}, v_{ui}, 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 aling'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 waqıttın' 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'hamiyetke iye. Eger sistema izolyatsiyalang'an bolmasa ten'salmaqlıq emes statsionar hallardın' bolıwı mu'mkin.

Mısalı gaz jaylasqan ıdıs diywalnıń ha'r qıylı bo'limleri sırtqı dereklerden ja'rdeminde ha'r qıylı, biraq turaqlı temperaturalarda uslap turılıwı mu'mkin. Bunday jag'dayda gazde waqıtqa 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.

Sistemalardın' statistikalıq ansambli.

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

Birdey bolg'an statistikalıq sistemalardın' jıynag'ı statistikalıq ansambl dep ataladı.

Bir makroskopiyaqlıq hal ansamblın' ha'r qıylı mikroskopiyaqlıq 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 ansamblen 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 sistemalardın' birdey jıynag'ına aytamız.

Sorawlar:

Gazdegi basımın' ten'lesiwı ushın kerek bolatug'ın waqıttın' shamasın qalay anıqlawg'a boladı?

Gazdin' makroskopiyaqlıq ha'm mikroskopiyaqlıq halları qanday shamalar menen ta'riplenedi?

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

§ 2-4. 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'zgertedi. 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'zgeriwı 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 molekullardın' belgili bir o'lshemlerge iye bolatug'ınlıg'ı jaqsı belgili. Olardın' diametri $\sim 10^{-8}$ sm = 10^{-10} m. Demek molekula yamasa atom $d^3 \sim 10^{-24}$ sm³ ko'lemdi iyeleydi. «Ko'lemdi 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'lemdi taslap, ekinshi ko'lemge o'tkenliginen derek beredi. Usınday ko'z-qarasta barlıq ko'lem bo'leksheler menen iyelengen ko'lemi d³ bolg'an ko'lemlerge bo'lingen tu'rinde qabıl etiliwi kerek. Bo'lekshelerdin' qozg'alısı bir qutishadan ekinshi qutishıg'a sekiriw menen o'tiwlerden turadı. Ha'r bir qutishada bo'lekshe shama menen d/v waqt intervalı dawamında turadı (v arqalı bo'lekshenin' tezligi belgilengen).

Endi mikrohاللardı bo'lekshelerdin' awhalları arqalı ayırıwg'a boladı. Ko'lemdegi awhal boyınsha mikrohal pu'tkil ko'lemdi bo'liwden payda bolg'an qutishalar boyınsha bo'lekshelerdin' bo'listiriliwi menen ta'riplenedi. bo'lekshenin' bir qutidan ekinshi qutıg'a o'tiwleri sistemanın' mikrohاللarının' o'zgeriwinin' ma'nisin beredi. Usınday ko'z-qarastan paydalanıw ushin gazdin' bo'lekshesi haqıyqatında da d o'lishemine iye dep qaraw talap etilmeydi. Buring'ısınsha ideal gazdin' molekulları nollik geometriyalıq o'lishemlerge iye, biraq qozg'alıs nızamları boyınsha ha'r bir qutishada tek bir bo'lekshe bola aladı dep esaplaw mu'mkin. Endigiden bılay ideal gaz boyınsha tap usınday pikirde bolamız.

Joqarıda aytilg'anınday 1 sm³ ko'lemde barlıg'ı bolıp $N = 1/d^3 \approx 10^{24}$ qutisha bolıwı kerek. Normal atmosfera basımında 1 sm³ ko'lemde $n = 2.7 \cdot 10^{19}$ bo'lekshe jaylasadı. Sonlıqtan a'dettegi jag'daylarda bir bo'lekshege $N/n \approx 4 \cdot 10^4$ qutisha sa'ykes keledi. Demek qutishalardıń basım ko'pshiligi bos, tek ayırım qutishalar g'ana bo'leksheler menen iyelengen bolıp shıg'adı. Eger qutishalırdı kublarg'a jıynaytug'ın bolsaq 1 bo'lekshe 40 000 qutisha jaylasqan kubta jaylasadı. Usınday kubtın' qabırg'ası boyınsha 30 qutisha jaylasadı. Bul alıng'an sanlar iyelengen qutishalar arasındag'ı ortasha qashıqlıq qutishanın' sıızılıq o'lishemlerinen 30 ese ko'p degendi bildiredi.

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

Bo'lekshenin' qozg'alıs 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» qutishaların 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'lemdi, sonday-aq tezlikler boyınsha da «ko'lem» di iyelemeytug'inlig'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'alısı onın' tezligi v menen emes, al impulsı r ja'rdeminde anıqlanadı. Bir bo'lekshe ta'repinen iyeleniwi mu'mkin bolg'an qutisha koordinatalar yamasa impulsar ken'isliginde emes, al fazalıq ken'islik dep atalatug'ın koordanatalar-impulsar ken'isliginde anıqlanadı. Bir bo'lekshe ta'repinen iyelenetug'ın fazalıq ken'isliktegi qutishanın' 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 $\hbar = 1.0545887(57) \cdot 10^{-34}$ 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 qutishalar da nomerlengen bolıwı mu'mkin. Bazı bir waqt momentinde bazı bir bo'lekshe ansambldin' ha'rqanday sistemalarında, ha'r qıylı qutishalarda boladı. Eger baslang'ısh waqt momentinen baslap bir qansha waqt o'tse, sistemalar o'zlerinin' da'slepki halların «umıtqan» bolsa, berilgen waqt momentindegi bo'lekshe jaylasqan qutisha tosattan bolg'an qutisha bolıp tabıladı. Qarap atırılğ'an bo'lekshe ushın qanday da bir ayqın qutishada jaylasıwg'a tiykar joq. Barlıq qutishalar da birdey bahag'a iye ha'm bo'lekshenin' alg'an orınları birdey huqıqlı. Eger ansambl ju'da' u'iken N_a sistemalg'a iye bolsa, qarap atırılğ'an bo'lekshe 1-qutishada bolatug'ın sistemalar sanı bo'lekshe 2-qutishada bolatug'ın sistemalar sanına ten' h.t.b. basqa 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'nıy ko'lem bo'lingen barlıq qutishalar boyınsha bo'lekshelerdin' jaylasıwları menen ta'riplenedi).

Ha'r bir bo'lekshe ushın ba'rshe qutishalar birdey mu'mkin bolg'anlıqtan bo'lekshelerdin' qutishalar boyınsha barlıq bo'listiriwleri birdey mu'mkinlikke iye. Bul barlıq mikrohاللardın' birdey itimal ekenligin bildiredi. Bul ten'dey itimallıqlar postuladı dep ataladı.

Joqarıda keltirilgen mısallar ten'dey itimallıqlar postuladının' da'lili bola almaydı. Sonlıqtan bul tek postulat bolıp tabıladı.

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

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

Bul ten'likte a indeksi esaplanıp atırğ'an shamanın' ma'nisin ansambl boyınsha ortasha ma'nis ekenligin bildiredi. N_a ansambldegi sistemalar sanı, x_i i-sistemadag'ı bo'lekshenin' koordinatası. Ansamblidin' 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 O-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 toparlastırıw maqsetinde (4-2) ni tu'rlendiremiz. Ansamblidin' N_{aj} sistemasındag'ı j-qutishada bo'lekshe jaylasatug'ın bolg'anlıqtan

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

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

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

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

tu'rine keledi. Bul jerde x_j j-qutishanın' x koordinatası, R_j - bo'lekshenin' usı qutishada jaylasıw itimallıg'ı. Bul formula tosattan bolatug'ın shamanın' matematikalıq ku'tiliwin ta'ripleytug'ın (2-17)-formulag'a sa'ykes keledi. Onın' on' ta'repinde sistemalar ansampli haqqında tikkeley hesh na'rse joq.

Waqt boyınsha ortasha shamalardı esaplaw. Anıqlama boyınsha waqt boyınsha ortasha ma'nis

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

Bo'lekshenin' bir qutishadan ekinshi qutishag'a izbe-iz sekiriwlerin i indeksi ja'rdeminde belgileymiz. i-sekiriwden keyin bo'lekshe o'tetug'in qutishanin' koordinatasi x_i . Δt_i usi qutishada bo'lekshenin' turıw waqtı. Usı aytlg'anlardan (4-6) integralın bılay tu'rlendiriw mu'mkin:

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

Bul jerde T waqtı ishindegi sekiriwler sanı m arqalı belgilengen.

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

$T \rightarrow \infty$ de bo'lekshe ha'r bir qutishag'a ko'p ret tap boladı. Sonlıqtan T waqtı ishinde j-qutishada

$$T_j = \sum \Delta t_i \quad (4-8)$$

waqtı 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:

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

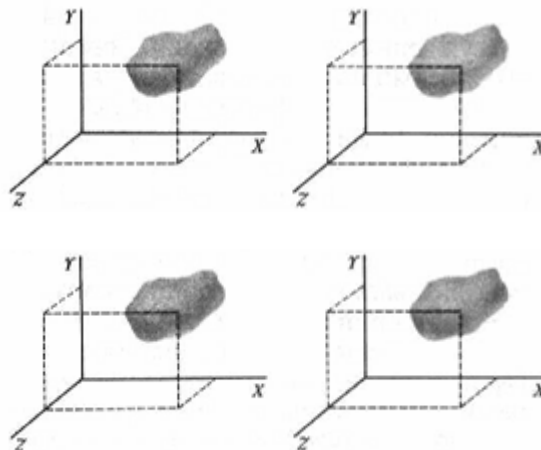
(4-6) nı (4-7a.b) menen (4-8) di esapqa alıp ko'shirip jazamiz:

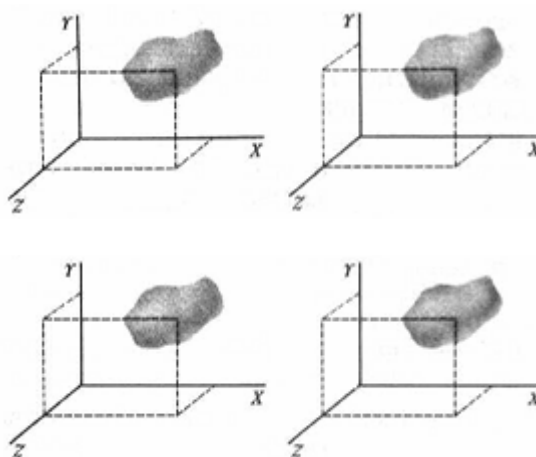
$$\langle x^2 \rangle_t = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{j=1}^N T_j x_j^2 = \sum_j \tilde{P}_j x_j^2. \quad (4-10)$$

Bul formulada

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

Bul barlıq waqtqa salıstırg'andag'ı bo'lekshenin' j-qutishada turıw waqtı. (2-2v) dag'ı itimallıqqa berilgen anıqlama boyınsha \tilde{P}_j bo'lekshenin' j-qutishada bolıw itimallıg'ı.





2-5 su'wret. Statistikalıq ansambl

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

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

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) waqıt 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 boljawların' biri bolıp sanaladı.

Bul gipoteza birinshi ret 1871-jılı L.Boltsman (1844-1906) ta'repinen usınıldı. Keyin Dj.Maksvell 1879-jılı waqıt boyınsha ortasha shamalardıń ansambl boyınsha ortasha shamalar menen almasırwıdı 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 waqıt ishinde barlıq bo'leksheler sol «irarxiyalıq baspaldaqtın' barlıq tekshelerinde» bolıp shıg'adı. Qala berse ha'r barlıq bo'leksheler de sol tekshelerdin' ha'r birinde ortasha birdey waqıt aralıg'ında boladı.

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

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

§ 2-5. Makrohalar itimallıg'ı

Makrohalar itimallıg'ı. Elementar kombinatorika formulaları. Makrohallardıń 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 makrohaldıń belgileri belgili bolsa, onda printsipinde usı makrohalg'a sa'ykes keliwshi barlıq mikrohallardı tabıwg'a boladı. G_α arqalı mikrohallar sanın belgileyimiz. α makrohaldı ta'ripleydi. Makrohaldıń belgisin $G(\alpha)$ arqalı belgileyik. G_0 arqalı ergodik gipoteza tiykarında alınıwı mu'mkin bolg'an hallardıń ulıwma sanı. Bunday jag'dayda qarap atırılǵ'an makrohal itimallıg'ı

$$R_\alpha = G_\alpha / G_0. \quad (5-1)$$

Mikrohalar sanı G_α makroskopiyalıq haldıń **termodinamikalıq itimallıg'ı** dep te ataladı. Matematikalıq ma'niste R_α itimallıq bolıp tabılamaydı. Sebebi ol birge ya ten', yamasa kishi ma'niske iye, al G_α 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 hallardıń sanın tabıwdan ibarat boladı. A'lbette tikkeley hallar sanın esaplaw tek ayırım jag'daylardı a'melge asırılardı. Sonlıqtan ko'pshilik jag'daylarda teoriyanın' aldına birim-birim esaplamay-aq hallar sanın yamasa R_α nin' ma'nisin anıqlawdan ibarat ma'sele qoyılardı.

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

Elementar kombinatorika formulaları. Mikrohallar 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 jaylastırılardı. Sonlıqtan u'sh zat n orında $n(n-1)(n-2)$ usıl menen jayg'asadı. Demek n zat n orında

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

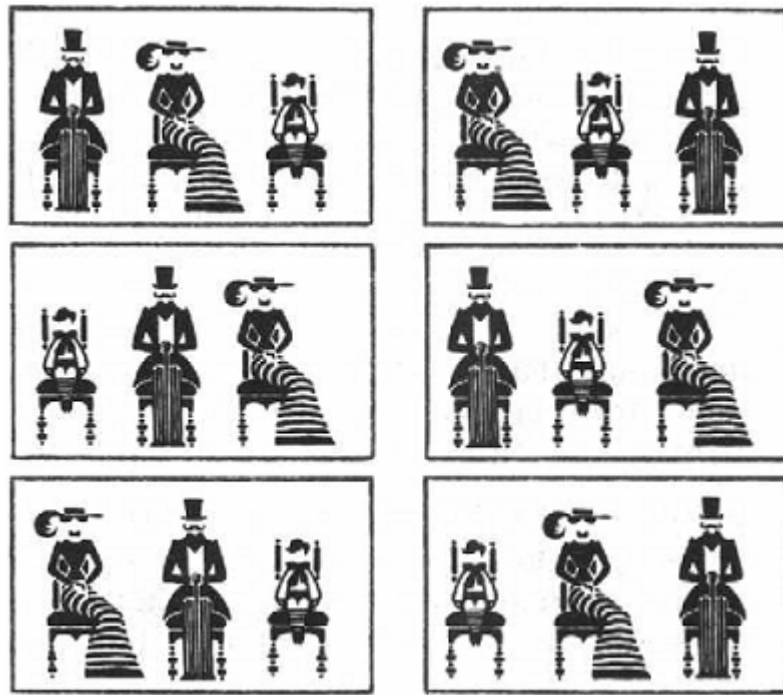
dana ha'r qıylı usıl menen jaylasıwı mu'mkin.

(5-2) den 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 jaylastırıw mu'mkin dep soraw qoyılardı. Ha'r bir jaylastırıwda $n-m$ orın bos qaladı. Bunday jag'dayda m dana zattı n dana orıng'a jaylastırıwlar sanı

$$R(n, n-m) = n! / (n-m)!. \quad (5-3)$$

Mısal retinde u'sh stulda eki adamnıń $3! / [(3-2)!] = 6$ usıl menen jaylasıwı mu'mkin ekenligin ko'rsetiwge boladı.



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

$$S(n,m) = n!/[m!(n-m)!]. \quad (5-4)$$

Mısalı birdey eki adam ($m=2$) u'sh stulda $3!/2!(3-2)! = 3$ usıl menen jaylasadı.

Ja'ne de bir ma'selege kewil bo'lemiz. Meyli n dana ha'r qıylı zat bar bolsın. Soraw beriledi: bir birinen zatlardan' quramı boyınsha ayırılutug'ın qansha usıl menen m dana zattan turatug'ın bir birinen o'zgeshe toparlar du'ziwge boladı? Topardag'ı zatlardan' 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 kombinatsiyalardan' ulıwma sanı $n(n-1)$. Aqırında

$$\begin{aligned} S(n,m) &= \{n(n-1)(n-2) \dots [n-(m-1)]\}/m! = \\ &= n!/[m!(n-m)!] \end{aligned} \quad (5-5)$$

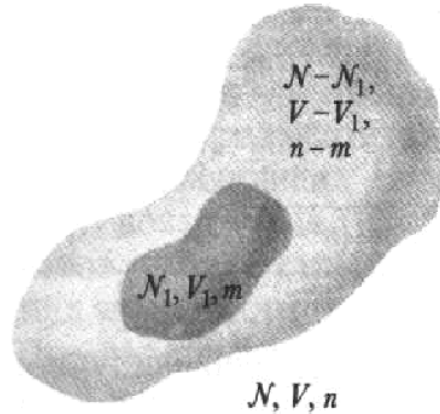
formulasın alamız.

Makrohallar itimallıg'ın esaplaw. Ideal gaz iyelegen ko'lem V , bul ko'lemdegi bo'leksheler sanı n bolsın. Bo'lekshe iyelewi mu'mkin bolg'an qutıshalar sanı $N = V/d^3 \approx 10^{24} \text{ sm}^3$ bolsın. Bul san ju'da' u'lken ha'm barlıq waqıtta $N \gg n$ sha'rti orınlanadı. V ko'lemi ishinde aling'an V_1 ko'leminde m bo'lekshe turıwının' itimallıg'ın esaplaymız. Ma'selenin' sha'rti boyınsha $V_1 < V$, $n \geq m$. Sonın' menen birge V_1 ju'da' kishi bolmawı kerek ha'm m dana bo'leksheni sıydıra alıwı kerek. V_1 ko'lemindegi qutıshalar sanı $N_1 = V_1/d^3$, sonlıqtan $N_1 \geq m$.

Mikrohallardan' ulıwma sanı n bo'leksheni N qutıshag'a jaylastırıwlar sanına ten'. Bo'leksheler bir birinen ayırıladı dep boljaymız (mısalı nomerlengen). Bul bo'leksheler orınları menen almasqandag'ı payda bolg'an mikrohallar bir birinen ayırıladı degendi an'latadı. Sonın' menen birge qarap atırılğ'an bo'leksheler qa'siyetleri boyınsha birdey. Sonlıqtan bo'leksheler orın almastırg'anda

payda bolg'an mikrohollar qa'siyetleri boyınsha birdey bolıwı sha'rt. Biraq sol sha'rtlerge qaramastan mikrohollar birdey emes dep esaplaymız.

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



2-6 su'wret. Mikroholların' itimallıg'ın esaplaw ushın arnalg'an su'wret.

$$\Gamma_0 = N!/(N - n)! \quad (5-6)$$

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

$$\gamma(V_1, m) = N_1!/(N_1 - m)! \quad (5-7)$$

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

$$\gamma(V - V_1, n - m) = (N - N_1)!/[N - N_1 - (n - m)]! \quad (5-8)$$

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

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

Solay etip (5-1) tiykarında makrohalıdın' itimallıg'ı ushın

$$R(V_1, m) = G(V_1, m)/G_0 = \frac{n!}{m!(n - m)!} * \frac{N_1!(N - N_1)!(N - n)!}{(N_1 - m)![N - N_1 - (n - m)]!N!} \quad (5-10)$$

formulasın alamız. Solay etip makrohalıdın' 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.

Ju'da' u'lken n sanında

$$n! \approx (n/e)^n. \quad (5-11)$$

Bul *Stirling formulasi* bolıp tabıladı ha'm bılay da'lillenedi:

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

U'lken n lerde Δn kishi shama dep esaplanadı. Sonlıqtan (5-12) summasınan integralg'a o'temiz

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

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

Makroaldın' 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

$$(N_1 - m)! = \left(\frac{N_1 - m}{e} \right)^{N_1 - m} = \left(\frac{N_1}{e} \right)^{N_1 - m} \left(1 - \frac{m}{N_1} \right)^{N_1 - m} = \left(\frac{N_1}{e} \right)^{N_1 - m} e^{-m},$$

bul jerde $\lim_{n \rightarrow \infty} (1+x/n)^n = e^x$.

Basqa faktoriallar da usınday etip esaplanadı. Na'tiyjede

$$R(V_1, m) = \frac{n!}{m!(n-m)!} * \frac{N_1^m (N - N_1)^{n-m}}{N^n} = \frac{n!}{m!(n-m)!} * \left(\frac{N_1}{N} \right)^m \left(1 - \frac{N_1}{N} \right)^{n-m} \quad (5-14)$$

ten'liklerin alamız. Olar a'piwayı ma'niske iye: $r = (N_1/N) = (V_1/V)$ bo'leksheni V_1 ko'leminde tabıwdın' itimallıg'ı, $q = 1 - N_1/N = 1 - r$ bo'leksheni ko'lemnin' basqa bo'liminde $(V - V_1)$ tabıwdın' itimallıg'ı. $r+q = 1$ bolıwı kerek. (5-14) ti r ha'm q arqalı basqasha jazamız

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

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

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

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

$$R(V_1, m \rightarrow 0) \approx q^n \rightarrow 0,$$

$$R(V_1, m \rightarrow n) \approx r^n \rightarrow 0.$$

m nin' bazı bir aralıqtag'ı ma'nisinde $R(V_1, m)$ maksimumg'a jetedi. Bul jag'daydı tabıw ushın $dR(V_1, m)/dm = 0$ ten'lemesin sheshiwimiz kerek.

Bul tuwındını V_1 ha'm r jetkilikli da'rejede kishi, al q birge jaqın bolg'an jag'day ushın sheshemiz. Biraq V_1 dım kishi bolmawı kerek. Bul jag'dayda r^m dım az 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'rlendiriw mu'mkin. Biraq sonın' menen qatar barlıq waqıtları da m di n ge salıstırıp alıp taslay beriwge bolmaydı. Oндаy jag'dayda

$$\frac{n!}{m!(n-m)!} \approx \frac{(n/e)^m}{(m/e)^m [(n-m)/e]^{n-m}} \approx \left(\frac{n}{m}\right)^m \frac{(1-m/n)^m}{(1-m/n)^n}. \quad (5-16)$$

$n \rightarrow \infty$ bolg'anda $(1-m/n)^n = e^{-m}$. Sonlıqtan (5-15a)

$$R(V_1, m) \approx \left(\frac{ne}{m}\right)^m r^m q^{n-m} = \left(\frac{nep}{mq}\right)^m q^n. \quad (5-17)$$

Bul an'latpanı m boyınsha differentsiallap, tuwındını nolge ten'leseک maksimumg'a sa'ykes keliwshi m_0 din' ma'nisin alamız:

$$\ln \left(\frac{nep}{m_0 q}\right) - 1 = 0. \quad (5-18)$$

$q \approx 1$ bolg'anlıqtan

$$m_0 \approx nr/q \approx nr. \quad (5-19)$$

Esaplawlardın' barlıg'ı da juwıq tu'rde islendi. Sonlıqtan (5-19) tek juwıq ma'nisti beredi. Da'lireк 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'ınlg'ın ko'rsetedi. Bul na'tiyjenin' ma'nisi a'piwayı. $n/V = n_0$ - ko'lemdegi bo'leksheler konsentratsiyası (eger bo'leksheler ko'lemde ten' o'lshewli tarqalg'an bolsa), $n_{\text{maks}} = m_0/V_1 - V_1$ ko'lemindegi en' itimal konsentratsiya. $r = V_1/V$ ekenligin esapqa alıp (5-19) dı bilay jazamız

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

Demek V_1 ko'lemindegi en' itimal konsentratsiya 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' konsentratsiyasının' en' itimal bo'listiriliwi ten' o'lshewli bo'listiriliw bolıp tabıladı. Tuyıq sistemanın' usınday halı statsionar ha'm ten' salmaqlı bolıp tabıladı. Sonın' ushın aling'an juwmaqtı bilayınsha jazamız:

Sistemanın' ten' salmaqlıq halı onın' en' itimal halı bolıp tabıladı.

Binomial bo'listiriv. Nyuton binomi formulasına muvafiq (5-15a) binomial bo'listiriliw dep ataladı. Nyuton binomi bilay jazıladı:

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

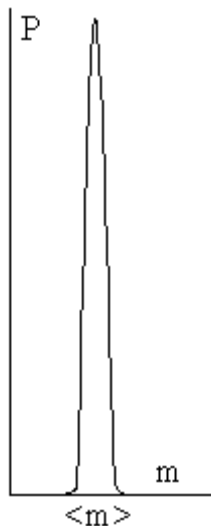
$r + q = 1$ bolg'anlıqtan (5-21) itimallıqtın' normirovkası sha'rtine aylanadı:

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

$R(V_1, m)$ nin' m nen $g'a$ rezililigi su'wrette ko'rsetilgen. Iymeklik $m_{maks} = m/V$ shamasında maksimumg'a iye. Piktin' biyikligi menen ken'ligi normirovka sha'rti menen baylanisqan

$$\Delta m R(V_1, m_{maks}) \approx 1. \quad (5-22)$$

Bul jerde Δm - piktin' ken'ligi.



Demek, V_1 ko'lemindegi bo'leksheler sanı m_{maks} nan awısıwı ju'da' az shama boladı. Usı awısıw menen R nın' ma'nisi tez kemeyedi. Biraq sog'an qaramastan barlıq waqıtta m_{maks} g'a ten' emes, al usı shama do'gereginde terbeledi. Bul awıtqıwlar **fluktuatsiyalar** dep ataladı.

Binomial bo'listirivdin' shektegi formaları. Sheksiz ko'p sanlı sinaqlarda ($n \rightarrow \infty$) (5-15b) shektegi tu'rine umtıladı. Sonın' ishinde eki a'hmiyetli jag'daydı qarap o'temiz:

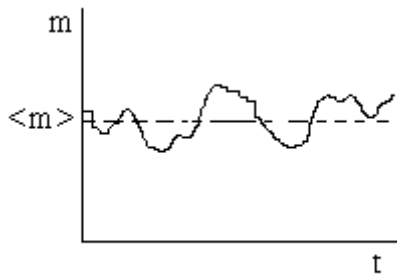
- 1) $n \rightarrow \infty$ bolg'anda $r = \text{const}$ - normal bo'listiriliw.
- 2) $n \rightarrow \infty$ bolg'anda $nr = \text{const}$ - Puasson bo'listiriliwi.

$$R(m) = \lim_{n \rightarrow \infty} R_n(m) = \frac{(<m>)^m}{m!} * e^{-<m>} \quad (5-23)$$

2-7 su'wret. n menen $<m>$ bo'listiriliwi Puasson bo'listiriliwi dep ataladı. nin' u'lken ma'nislerindegi binomliq bo'listiriliw.

§ 2-6. Fluktuatsiyalar

Ko'lemdegi bo'leksheler sanının' ortasha ma'nisi. Joqarıda aytilg'anınday ko'lemdegi bo'lekshelerdin' ortasha ma'nisi turaqlı bolıp qalmaydı, u'lken emes sheklere o'zgeriske ushıraydı. Printsipinde u'lken awısıwlar da mu'mkin, biraq itimallıg'ı kem ha'm sonlıqtan ju'da' siyrek boladı. V_1 ko'lemindegi bo'leksheler sanının' waqıtqa baylanislılıg'ı su'wrette ko'rsetilgen. Anıqlama boyınsha V_1 ko'lemindegi bo'lekshelerdin' ortasha sanı $T \rightarrow \infty$ bolg'anda:



$$\langle m \rangle_t = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} m(t) dt \quad (6-1)$$

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

2-8 su'wret. Bo'leksheler sanı fluktuatsiyaları

$$\langle m \rangle_t = \langle m \rangle_a = \sum_{m=0}^n m R(V_1, m) = \sum_{m=0}^n \frac{n!}{m!(n-m)!} r^m q^{n-m}. \quad (6-2)$$

Bul shamanı bılay esaplawg'a boladı:

$$\sum_{m=0}^n \frac{n!}{m!(n-m)!} r^m q^{n-m} = r \frac{\partial}{\partial p} \sum_{m=0}^n \frac{n!}{m!(n-m)!} r^m q^{n-m} = r \frac{\partial}{\partial p} (r+q)^n = n(r+q)^{n-1}. \quad (6-3)$$

$r+q=1$ bolg'anlıqtan

$$\langle m \rangle_t = \langle m \rangle_a = rn. \quad (6-4)$$

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

Fluktuatsiyalar. Ortasha ma'nis a'tirapında terbeletug'in shamanı fluktuatsiyalanadı dep esaplaydı. Ulıwma ma'nisi boyınsha fluktuatsiya tu'sinigi matematikalıq tu'sinik bolıp tabıladı. Biraq molekualıq fizikada termodinamikalıq ten' salmaqlıqtag'ı ishki parametrlerdin' fluktuatsiyası na'zerde tutiladı. Fluktuatsiyalardıń o'lishemi (2-19) ja'rdeminde anıqlang'an shamanın' ortasha ma'nisinen standart awısıw bolıp tabıladı. Bul shamanı esaplag'anda waqıt boyınsha ortalawdı ansambl boyınsha ortashalaw menen almasırwıw kerek. (2-19) standart awısıwdı esaplaw ushın $\langle m \rangle$ menen qatar $\langle m^2 \rangle$ shamasın da esaplaw kerekligin ko'rsetedi:

$$\langle m^2 \rangle = \sum_{m=0}^n \frac{n! m^2}{m!(n-m)!} r^m q^{n-m}. \quad (6-5)$$

(6-3) ti esaplag'andag'ı usıldan paydalanamız:

$$\begin{aligned} \sum_{m=0}^n \frac{n! m^2}{m!(n-m)!} r^m q^{n-m} &= r \frac{\partial}{\partial p} r \frac{\partial}{\partial p} \sum_{m=0}^n \frac{n!}{m!(n-m)!} r^m q^{n-m} = \\ &= r \frac{\partial}{\partial p} r \frac{\partial}{\partial p} (r+q)^n = r[n(r+q)^{n-1} + n(n-1)(r+q)^{n-2}]. \end{aligned} \quad (6-6)$$

$r+q=1$ ekenligin esapqa alıp

$$\langle m^2 \rangle_a = nrq + n^2 r^2. \quad (6-7)$$

(2-19a) formuladan dispersiya ushın:

$$\langle (\Delta m)^2 \rangle = \langle m^2 \rangle - (\langle m \rangle)^2 = n p q. \quad (6-8)$$

Demek standart awısıw:

$$\sigma = \sqrt{\langle (\Delta m)^2 \rangle} = \sqrt{n p q}. \quad (6-9)$$

Bul ten'lik sistemadag'ı bo'lekshelerdin' ulıwma sanına qarag'anda standart awısıwdın' a'stelik penen o'setug'ınlıg'ın ko'rsetedi. 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. Onı bılayınsha ko'shirip jazayıq:

$$\frac{\sqrt{\langle (\Delta m)^2 \rangle}}{\langle m \rangle} = \sqrt{\frac{V}{V_1} - 1} \frac{1}{\sqrt{n}}. \quad (6-11)$$

$V \rightarrow V_1$ fluktuatsiyanın' salıstırmalı ma'nisi nolge umtıladı, al $V_1 = V$ da nolge ten' boladı. Sebebi barlıq ko'lemde bo'leksheler sanı anıq n shamasına ten' ha'm bo'lekshelerdin' hesh qanday fluktuatsiyası bolmaydı. V_1 din' kishireyiwi menen fluktuatsiyalardın' salıstırmalı ma'nisi o'sedi. $V_1 \ll V$ bolg'anda (6-11) degi 1 di esapqa almay ketiwge boladı (sebebi $V_1/V \gg 1$) ha'm formulanı bılay 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 $n = \langle m \rangle V/V_1$. (6-12) den ***fluktuatsiyanın' salıstırmalı tutqan ornı usı fluktuatsiya qarap atırılğan oblasttın' kemeyiwi menen artatug'ınlıg'ı ko'rinedi.*** Mısalı eger bir neshe bo'leksheden turatug'ın ko'lem alınsa fluktuatsiyalardın' shaması bo'leksheler sanının' sezilerliktey u'lesindey boladı. Ortasha 10 bo'leksheden turatug'ın ko'lemde standart awısıw shama menen 1/3 ti quraydı. Normal atmosferada 1 mm³ ko'lemde ortasha $\langle m \rangle = 2.7 \cdot 10^{16}$ bo'lekshe boladı, al standart awısıw 10⁻⁸ di quraydı (yag'nıy ju'da' kishi shama boladı). Sonlıqtan makroskopiyalıq sistemalarda statistikalıq fluktuatsiyalar a'hmiyetke iye emes. U'lken da'llik penen bul shamalardı olardın' ortasha ma'nisine ten' dep aytıwg'a boladı.

Fluktuatsiyalardın' salıstırmalı ma'nisi. Meyli G' shaması n bo'leksheden turatug'ın sistemanı ta'ripleytug'ın ha'm bo'lekshelerge tiyisli sa'ykes shamalardın' qosındısınan turatug'ın bolsın:

$$G' = \sum_{i=1}^n f_i. \quad (6-13)$$

f_i - i -bo'lekshe ushın f shamasının' ma'nisi. Mısalı, eger G' kinetikalıq energiya bolatug'ın bolsa f_i i -bo'lekshenin' kinetikalıq energiyası. (6-13) ten

$$\langle F \rangle = \sum_{i=1}^n \langle f_i \rangle. \quad (6-14)$$

$\langle G' \rangle$ 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:

$$\langle G' \rangle = n \langle f \rangle. \quad (6-16)$$

G' tin' $\langle G' \rangle$ ten ortasha kvadratlıq awısıwın tabamız. Anıqlama boyınsha

$$\Delta G' = G' - \langle G' \rangle = \sum_{i=1}^n (f_i - \langle f \rangle) = \sum_{i=1}^n \Delta f_i. \quad (6-17)$$

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

$$\langle (\Delta G')^2 \rangle = \left\langle \sum_{i,j=1}^n \Delta f_i \Delta f_j \right\rangle = \sum_{i=1}^n \langle (\Delta f_i)^2 \rangle + \sum_{i \neq j} \langle \Delta f_i \Delta f_j \rangle. \quad (6-18)$$

Bul an'latpanın on' ta'repindegi qosındı eki bo'limge bo'lingen. Birinshi summa birdey indekske iye, al ekinshisi ha'r qıylı indeksli ag'zalırdı birlestiredi. Δf_i ha'm Δf_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

$$\langle (\Delta G')^2 \rangle = n \langle (\Delta f_i)^2 \rangle. \quad (6-19)$$

(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) ulıwma jag'dayda bo'leksheler sistemasına tiyisli shamanın salıstırmalı standart awısıwının bo'leksheler sanının kvadrat korenine kerı proporsional kemeyetug'ınlig'in da'lilleydi, al bo'leksheler sanı u'lken bolg'anda salıstırmalı standart awısıw ju'da' kishi boladı.

Ten' salmaqlıq halda turıp sistema bir mikrohaldan basqa mikrohاللarg'a o'tip turaqlı tu'rde o'zgerip turadı. Ulıwma tu'rde aytqanda usınday o'tiwlerdin' na'tiyjesinde sistemanı ta'ripleytug'ın makroskopiyaqlıq parametrler de o'zgeriske ushıraydı. 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 ushıraydı. Bunday o'zgerisler haqqında ga'p etilgende ortasha shamalar fluktuatsiyag'a ushıraydı dep aytadı.

Fluktuatsiyalardin' salıstırmalı tu'rde tutqan ornı sistemadag'ı bo'leksheler sanının' artıwı menen kemeyedi. Sonlıqtan makroskopiyaqlıq sistemalarda

flukuatsiyalardıń salıstırmalı shaması esapqa alarlıqtay u'iken emes ha'm sistemanın' barlıq makroskopiyalıq parametrleri u'iken da'llikte olardıń waqıt boyınsha ortashasına ten'.

Sorawlar:

Flukuatsiyalardı qanday sebeplerge baylanıslı ortasha ma'nisten awısıwdın' ortasha shaması menen ta'riplewge bolmaydı?

§ 2-7. Maksvell bo'listiriliwi

Molekulalardıń 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 sanı saqlanatug'ın statsionar ten' salmaqlıq hal ornaydı. Tezlikler boyınsha molekulalardıń bo'listiriliwi birinshi ret Djeyms Klerk Maksvell (1831-1879) ta'repinen tabıldı ha'm onın' atı menen ataladı.

Molekulalardıń ortasha kinetikalıq energiyası. Ortasha kinetikalıq energiya molekulalardıń tezlikler boyınsha bo'listiriliwin ta'ripleytug'ın a'hmiyetli makroskopiyalıq parametr bolıp tabıladı. Sebebi izolyatsiyalang'an ko'lemdegi ha'r qıylı sorttag'ı molekulalardıń barlıg'ı da birdey ortasha kinetikalıq energiyag'a iye boladı. Bul ha'r qıylı sorttag'ı ha'r qıylı kinetikalıq energiyag'a iye molekulalar ta'sir etiskende kinetikalıq energiyalardıń ortasha ten'lesetug'ınlıg'ın bildiredi.

Da'lillew ushın eki sorttag'ı molekulalardan turatug'ın gaz aralaspasın qaraymız. Olardı 1 ha'm 2 indeksleri menen belgileyemiz. Barlıq mu'mkin bolg'an molekulalar jubın alıp qaraymız ha'm olardıń $v_2 - v_1$ salıstırmalı tezlikleri menen olardıń massa oraylarının' tezliklerin ($v_{m.o.}$) esaplaymız:

$$v_{m.o.} = (m_1 v_1 + m_2 v_2) / (m_1 + m_2). \quad (7-1)$$

Soqlıg'ısıw protsessinin' ta'rtipsiz ekenligine baylanıslı massa oraylarının' tezlikleri menen molekulalardıń bir birine salıstırg'andag'ı tezlikleri arasında koorelyatsiyanın' bolıwı mu'mkin emes. Sonlıqtan $\langle [v_{m.o.}(v_2 - v_1)] \rangle$ skalyar ko'beymesi nolge ten' boladı. Onda

$$\langle v_{m.o.}(v_2 - v_1) \rangle = [1/(m_1 + m_2)] [(m_1 - m_2) \langle (v_1 v_2) \rangle + m_2 \langle v_2^2 \rangle - m_1 \langle v_1^2 \rangle] = 0$$

Eki sorttag'ı molekulalar tezlikleri o'z-ara korrelyatsiyalanbag'anlıqtan $\langle (v_1 v_2) \rangle = 0$. Sonlıqtan

$$\langle \frac{m_1 v_1^2}{2} \rangle = \langle \frac{m_2 v_2^2}{2} \rangle. \quad (7-2)$$

Demek molekulalar sistemasındag'ı barlıq molekularadıń ortasha kinetikalıq energiyaları, sonday-aq sistemanın' barlıq ken'isliklik bo'limlerindegi (molekulalardıń) ortasha kinetikalıq energiyalar birdey boladı.

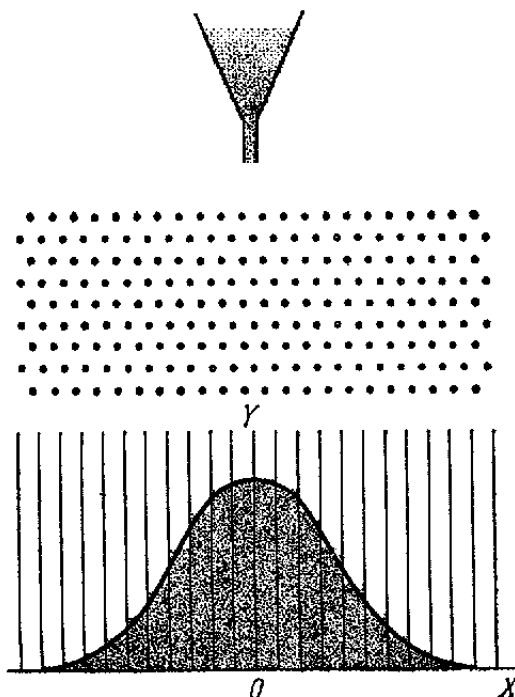
Sistemanın' usınday halı **termodinamikalıq ten' salmaqlıq** dep ataladı. Al ortasha kinetikalıq energiya **temperatura** dep atalatug'ın fizikalıq shama menen ta'riplenedi. Ortasha kinetikalıq energiyanın' turaqlılıg'ının' ornına a'dette temperaturanın' turaqlılıg'ın aytadı, al ortasha kinetikalıq energiyanın'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

Temperatura. Anıqlama boyınsha T temperatura molekulalardıń ortasha kinetikalıq energiyası menen bilay baylanısqan:

$$\langle \frac{1}{2}mv^2 \rangle = \frac{3}{2}kT. \quad (7-3)$$

Bul jerde proporsionallıq koeffitsient $k = 1.380662 \cdot 10^{-23}$ Dj/K - Boltsman turaqlısı dep ataladı. (7-3) te temperatura anıqlama sıpatında formal tu'rde kirgizilgen. Bul temperatura termodinamikalıq temperatura bolıp tabıladı.

SI 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.

Molekulalardıń tezlikleri boyınsha bo'listiriliw haqqındaǵı ma'selenin' statistikalıq ma'sele ekenligin tolǵıraǵ 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 jabılǵ'an jiyi tu'rde shaxmat ta'rtibinde mıyıqlar qag'ılǵ'an doska bolıp tabıladı. Mıyıqlardan to'mende bir birine parallel bolǵ'an metall plastinkalar ornalasırılǵ'an. Bul plastinkalar doska menen shiyshe arasındaǵı ken'islikti qutishılar dep atalatug'ın o'z-ara birdey ko'lemlerge bo'ledi. Mıyıqlardıń joqarısında, a'sbaptın' ortasında sharshar ornalasırılǵ'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 soqlıǵısıwlarg'a ushırıp, aqır ayag'ında qutishalırdın' birine barıp tu'sedi. Qaysı qutishag'a bo'lekshenin' barıp tu'setug'ınlıǵın usı bo'lekshenin' qozǵalısına ta'sir jasaytug'ın tosınnan ushırasatug'ın faktorlardın' ko'p bolǵ'anlıǵı sebepli aldın aytıw mu'mkin emes. Tek g'ana bo'lekshenin' anaw yamasa minaw qutishag'a barıp tu'setug'ınlıǵının' itimallıǵın aytıwǵa boladı. Bo'lekshenin' oraylıq qutishag'a barıp tu'siw itimallıǵı 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 qutishalarına shettegi qutishalarg'a qarag'anda ko'birek bo'lekshe kelip tu'setug'ınlıǵına ko'z jetkeriwge boladı. Eger sharshar arqalı jetkilikli da'rejedegi bo'leksheler o'tse olardıń qutishalar arqalı bo'listiriliwinin' anıq statistikalıq nızamı ko'rinedi. Bul nızamlı analitikalıq formula menen de ko'rsetiw mu'mkin. Ta'jiriye bo'leksheler sanı ko'p bolǵ'anda bul bo'listiriliw

$$u = \varphi(x) \equiv A e^{-\alpha x^2}$$

iyemekligine asimptotalıq jaqınlasadı. A ha'm α on' ma'niske iye turaqlılar. α nın' ma'nisi a'sbaptın' qurılısına baylanışlı bolıp, bo'leksheler sanına g'a'rezli emes. A turaqlısı bo'leksheler sanına baylanışlı ha'm α menen normirovka sha'rti arqalı baylanısadı.

$u = \varphi(x) \equiv A e^{-\alpha x^2}$ 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'lsheude 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 qanaatlandırırıwı kerek:

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

Bul sha'rt tiykarında A turaqlısın α turaqlısı menen baylanıstırıw mu'mkin. α qanshama u'lken bolsa qa'teler iymekliginin' maksimumı ensiz (o'tkir ushlı) bolıp sa'ykes o'lsheuler da'l ju'rgizilgen boladı. Sonlıqtan α shaması ortasha kvadartalıq yamasa ortasha arifmetikalıq qa'telikler menen baylanışlı 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 Δv_x , Δv_u , Δv_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 tezlikler:

$$v_x = \sum_i \Delta v_{xi}, v_u = \sum_i \Delta v_{ui}, v_z = \sum_i \Delta v_{zi}. \quad (7-4)$$

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 shamalardıń qosındısınan turadı. Bul tosattan ju'z beretug'in sanlar Gauss bo'listiriliwin qanaatlandıradı. Sonlıqtan (2-28) formulasına sa'ykes

$$\begin{aligned} \varphi(v_x^2) &= A \exp(-\alpha v_x^2), \\ \varphi(v_u^2) &= A \exp(-\alpha v_u^2), \\ \varphi(v_z^2) &= A \exp(-\alpha v_z^2). \end{aligned} \quad (7-5)$$

Shamalardıń barlıg'ı da tosattan shamalar bolg'anlıqtan, koordinata ko'sherleri bag'ıtlarının' bir birinen g'a'rezsizliginen A ha'm α ler barlıq formulada da birdey ma'niske iye ekenligi kelip shıg'adı. Tezliktin' X ko'sherine tu'sirilgen proektsiyasınan' $[v_x, v_x+dv_x]$ intervalında jatiw itimallıg'ı

$$dR(v_x) = \varphi(v_x^2) dv_x = A \exp(-\alpha v_x^2) * dv_x. \quad (7-6)$$

Tap usınday formulalar tezliktin' basqa da proektsiyaları ushın da orn aladı. Al tezliktin' $[v_x, v_u, v_z, v_x+dv_x, v_u+dv_u, v_z+dv_z]$ intervalda jatiw itimallıg'ı itimallıqlardı ko'beytiw formulasınan bılay anıqlanadı:

$$dR(v_x, v_u, v_z) = A^3 \exp[-\alpha (v_x^2 + v_u^2 + v_z^2)] * dv_x dv_u dv_z.$$

A turaqlısı normirovka sha'rtinen anıqlanadı:

$$\iiint_{-\infty} dP(v_x, v_y, v_z) = 1. \quad (7-8)$$

(bul integral $-\infty$ ten $+\infty$ ke shekem alınadı, al $+\infty$ texnikalıq jaqтан jetispewshilikтин' saldarınan tu'sip qalg'an).

$$A \int_{-\infty}^{+\infty} \exp[-\alpha (v_x^2)] dv_x = A \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} = 1. \quad (7-9)$$

Bunnan

$$A = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}}. \quad (7-10)$$

Molekulanın' kinetikalıq energiyasının' ortasha ma'nisin esaplaymız:

$$\begin{aligned} \langle mv^2/2 \rangle &= \frac{m}{2} \langle v_x^2 + v_u^2 + v_z^2 \rangle = \frac{m}{2} \iiint_{-\infty} (v_x^2 + v_u^2 + v_z^2) dR(v_x, v_u, v_z) = \\ &= \frac{m}{2} (\alpha/\pi)^{3/2} \iiint_{-\infty} (v_x^2 + v_u^2 + v_z^2) \exp[-\alpha (v_x^2 + v_u^2 + v_z^2)] dv_x dv_u dv_z. \end{aligned} \quad (7-11)$$

(7-11) di integrallasaq:

$$\langle \frac{1}{2} mv^2 \rangle = \frac{3m}{4\alpha}. \quad (7-12)$$

ten'ligine iye bolamız. (7-3) penen (7-13) tin' on' ta'replerin ten'lestirsek

$$\alpha = m/(2kT) \quad (7-13)$$

ekenligin alamız. Onda

$$dR(v_x, v_u, v_z) = \left[\frac{m}{2\pi kT} \right]^{3/2} \exp[-m(v_x^2 + v_u^2 + v_z^2)/(2kT)] dv_x dv_u dv_z. \quad (7-15)$$

Tezliklerdin' bo'listiriliwi izotrop. Sonlıqtan tezliklerdin' proektsiyaların' bo'listiriliwi bolg'an (7-15) ten tezlikтин' modulininin' bo'listiriliwine o'temiz. Bul maqsette sferalıq koordinatalar sistemasına o'tken maqsetke muwapıq boladı. Na'tiyjede

$$dR(v) = 4\pi \left[\frac{m}{2\pi kT} \right]^{3/2} \exp\left[-\frac{mv^2}{2kT}\right] v^2 dv. \quad (7-18)$$

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

$$\boxed{f(v) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} v^2 \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right)} \quad (7-19)$$

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

Biz ha'zir D.V.Sivuxinnin' «Obshiy kurs fiziki» kitabı (Москва. «Hayka» 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 $G'(v)dv$ dep belgileyemiz. $G'(v)dv$ ni bo'leksheler sanı N ge ko'beytsek usınday tezliklerge iye bolg'an molekullar sanı dN di alamız. Demek

$$dN = NG'(v)dv.$$

Al $G'(v)$ bolsa (7-19) dag'ı $f(v)$ g'a ten'. Bunday jag'dayda

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

A.K.Kikoin menen I.K.Kikoinnıń «Molekulyarnaya fizika» kitabında (Москва. «Hayka» baspası. 1976. 480 b.) tezlikleri $[v, v+dv]$ intervalındag'ı molekullardıń salıstırmalı sanı ushın $dn/n = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{m}{2kT} \right)^{3/2} v^2 \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT} \right) dv$ formulası berilgen. Demek

$$f(v) = \frac{dn}{ndv} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{m}{2kT} \right)^{3/2} v^2 \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT} \right).$$

(7-18) benen (7-19) formulalar ja'rdeminde tezlikleri berilgen intervalda bolg'an (biz qarap atırg'an jag'dayda $[v, v+dv]$ intervalında) molekullardıń sanın tabıw mu'mkin. Bunday molekullar sanı

$$dn(v) = n dR(v). \quad (7-20)$$

n sistemadag'ı barlıq molekullardıń sanı. Bul intervaldag'ı molekullardıń salıstırmalı sanı

$$dn(v)/n = dR(v) = f(v) dv. \quad (7-21)$$

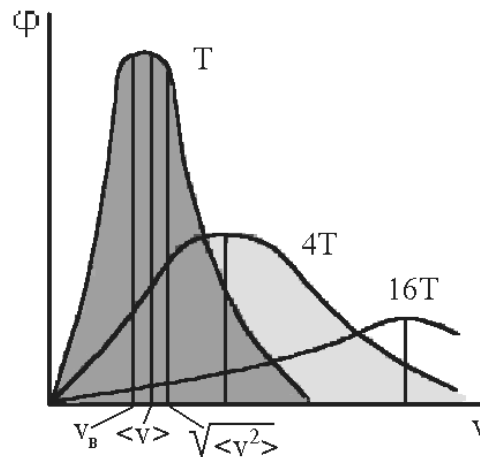
Tezlikтин modulinen g'a rezli bolg'an $\varphi(v)$ funktsiyasının ortasha ma'nisi ortasha ushın formula ja'rdeminde esaplanadı:

$$\langle \varphi \rangle = \int_0^{\infty} \varphi(v) f(v) dv. \quad (7-22)$$

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

$$\langle v \rangle = [8kT/(\pi m)]^{1/2}, \quad \langle v^2 \rangle^{1/2} = (3kT/m)^{1/2}. \quad (7-23)$$

Maksvell bo'listiriliwi su'wrette keltirilgen. Bul iymektiktin maksimumına



2-10 su'wret. Maksvell bo'listiriliwi.

sa'ykes keliwshi v_v tezligi **en' itimal tezlik** dep ataladi. Bul ma'nis ekstremum sha'rti $df(v)/dv = 0$ menen aniqlanadi, yag'niy

$$v_v = (2kT/m)^{1/2}. \quad (7-24)$$

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

$$(\langle v^2 \rangle)^{1/2} = (3\pi/8)^{1/2} \langle v \rangle = (3/2)^{1/2} v_v. \quad (7-25)$$

Komnatahq temperaturalarda hawadag'i kislorod penen azot molekulalarinin' tezliklari shama menen (400-500) m/s qa ten'. Vodorod molekulasiyin' tezligi usinday jag'daylarda shama menen 4 ese u'lken. Temperaturanin' o'siwi menen tezliktin' shaması $T^{1/2}$ ge proporsional o'sedi.

Idis diywalına molekulalardin' urilwının' jiyiligi. X ko'sherin diywalg'a perpendikulyar etip bag'itlaymiz ha'm molekulalar kontsentratsiyasin n_0 arqali belgileymiz. Bunday jag'dayda diywalg'a bag'itlang'an molekulalar ag'isinin' tig'izlig'i

$$n_0 f(v_x^{(+)}, v_u, v_z) v_x^{(+)} dv_x^{(+)} dv_u dv_z. \quad (7-26)$$

$v_x^{(+)}$ tezliktin' X ko'sherinin' on' bag'itindag'i qurawshisi (tezligi diywal betine qarama-qarsi bolg'an molekulalar ag'isqa qatnaspaydi). Onday jag'dayda idis diywalı betinin' bir birligindagi soqlig'isıwlar sanı

$$v = n_0 [m/(2\pi kT)]^{3/2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp[-m(v_u^2 + v_z^2)/(2kT)] dv_u dv_z \cdot \int_0^{\infty} \exp[-mv_x^2/(2kT)] v_x dv_x = n_0 \{kT/(2\pi m)\}^{1/2}. \quad (7-27)$$

(7-23) formulasın na'zerde tutıp aqırg'i formulanı bılay jazamız:

$$v = n_0 \langle v \rangle / 4. \quad (7-28)$$

Mısal retinde tezligi 195-205 m/s aralıg'ında bolg'an 0.1 kg kislorod molekulalarinin' $[O_2]$ molekulalar sanın esaplayıq.

195 ten 205 ke shekemgi interval ju'da' kishkene bolg'anlıqtan ortasha haqqındag'ı teoremadan paydalanıwg'a boladı ha'm

$$\Delta n/n \approx 4\pi \left[\frac{m}{2\pi kT} \right]^{3/2} \exp [-mv^2/(2kT)] v^2 dv,$$

bul jerde $v = 200$ m/s, $dv = 10$ m/s. Kislorodtın' salıstırmalı molekulaıq massası $M_{O_2} = 32$, molekula massası $m = 3291.66 \cdot 10^{-27}$ kg = $5.31 \cdot 10^{-26}$ kg. Kislorodtın' molyar massası $M = 32 \cdot 10^{-3}$ kg/mol. Sonlıqtan 0.1 kg kislorodta $n = [0.1/(32 \cdot 10^{-3})] \cdot 96.02 \cdot 10^{23} = 1.88 \cdot 10^{24}$ molekula bar.

$$kT = 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 273 \text{ Dj} = 3.77 \cdot 10^{-21} \text{ Dj}.$$

$$\text{Sonlıqtan } \Delta n = 2.3 \cdot 10^{22}.$$

Kese-kesim. Gazdegi molekula o'zinin' qozg'alıw barısında ko'p sanlı soqlıg'ısıwılarg'a ushıraydı ha'm o'zinin' qozg'alıw bag'ıtın o'zgertedi. Biraq soqlıg'ısıwlar basqa da na'tiyjederge de alıp keliwi mu'mkin. Mısali 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 beriwı 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'ısaturug'ın nıshana-bo'leksheler ken'islikte kelip soqlıg'ısaturug'ın bo'lekshenin' qozg'alıw bag'ıtına perpendikulyar bag'ıtta bazı bir σ kese-kesimine iye dep sanaladı.

Bul geometriyalıq emes, al oyda alıng'an maydan bolıp tabıladı. Qarap atırılğ'an soqlıg'ısıwdın' itimallıg'ı soqlıg'ısıwshı bo'lekshe tuwrı sıziq boyınsha qozg'alıp, usı σ maydanına kelip soqlıg'ısıw itimallıg'ına ten' etip alınadı.

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

$$dR = dS/S = \sigma n_0 dx \quad (8-1)$$

qa ten'. Bul qarap atırılğ'an protsess ushın kese-kesim σ tin' anıqlaması bolıp tabıladı.

Erkin ju'rgen joldın' ortasha uzınlıg'ı. σ 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 jolınin' ortasha ma'nisi dep ataladı. Bul ma'nisti anıqlaw ushın (8-1) den $\sigma n_0 \langle l \rangle = 1$ alınadı ha'm

$$\langle l \rangle = 1/(\sigma n_0). \quad (8-2)$$

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

$$\nu' = 1/\tau = \langle \nu \rangle / \langle l \rangle = \sigma n_0 \langle \nu \rangle$$

soqlig'ısıwlar jiyiligi dep ataladı.

Molekulanın' energiyasının' o'zgeriwi soqlig'ısıwlarda ju'zege keledi. Ayqın molecula ushın soqlig'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 molecula 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 tiywshi bo'lekshe noqatlıq dep qabıl etiledi. Kese-kesimnin' bo'lekshenin' geometriyalıq o'lsheplerine qatnası joq ha'm bir bo'lekshe ushın ha'r qanday protsesste ha'r qıylı kese-kesim alınadı. Kese-kesim arqalı protsesstin' itimallıg'ı ta'riplenedi.

§ 2-8. Basım

Ideal gazlerdin' kinetikalıq teoriyasının' tiykarg'ı ten'lemesi. Klapeyron-Mendeleev ten'lemesi. Dalton nızamı. Avagadro nızamı. Basımdı o'lshew. Molyar ha'm salıstırmalı shamalar.

Ideal gazlerdin' kinetikalıq teoriyasının' tiykarg'ı ten'lemesi. Basım molekulalardın' ıdı diywallarına urılıwının' saldarınan payda boladı. Eger X ko'sherin ıdı diywalına perpendikulyar etip bag'ıtlasaq bir soqlig'ısıwdag'ı ıdı diywalı ta'repinen alınatug'ın impuls $2mv_x^{(+)}$ ke ten'. Basım 1 sm^2 (1 m^2) diywalg'a 1 s waqıt ishinde berilgen impulsqa ten'. Sonlıqtan basım ıdı diywalına normal bag'ıtlang'an molekulalardın' impulsının' ekiletılgen ag'ısına ten'.

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

$$n_0 f(v_x^{(+)}, v_u, v_z) v_x^{(+)} dv_x^{(+)} dv_u dv_z m v_x^{(+)} \quad (9-1)$$

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

$$p_x = 2n_0 m \int f(v_x^{(+)}, v_u, v_z) [v_x^{(+)}]^2 dv_x^{(+)} dv_u dv_z = n_0 k T. \quad (9-2)$$

Tap usınday jol menen basqa qurawshılardı da tabamız:

$$p_x = p_y = p_z = p = n_0 k T. \quad (9-3)$$

Bul formuladag'ı temperaturanı (7-23) boyınsha ortasha kvadratlıq tezlik $\langle v^2 \rangle$ arqalı an'latıp (9-3) ti bılay jazamız:

$$p = \frac{2}{3} \langle \frac{mv^2}{2} \rangle n_0. \quad (9-4)$$

Bul ten'leme *ideal gazlerdin' kinetikalıq teoriyasının' tiykarg'ı ten'lemesi dep ataladı.*

Klapeyron-Mendeleev ten'lemesi. $n_0 = n/V$ bolg'anlıqtan n arqalı V ko'lemdegi gazdin' molekulalar sanı belgilengen. Olay bolsa (9-3) ti bılay jazamız

$$pV = nkT. \quad (9-5)$$

n nin' shaması tikkeley o'lishenbeytug'in bolg'anlıqtan bul ten'lemege basqasha qolaylı tu'r beremiz. Molekulalardın' n molindegi molekulalardın' ulıwma sanı $n = vN_A$. Sonlıqtan (9-5) ti bılay jazamız:

$$pV = vN_A kT = vRT. \quad (9-6a)$$

Bul ten'lik **Klapeyron-Mendeleev ten'lemesi** dep ataladı. T = sonst bolg'anda **Boyl-Mariott ten'lemesine** iye bolamız, al $p = \text{const}$ ta **Gey-Lyussak ten'lemesin** alamız. $R = kN_A = (8.31434 \pm 0.00035) \text{ Dj}/(\text{mol} \cdot \text{K}) = (8.31434 \pm 0.00035) \cdot 10^7 \text{ erg}/(\text{mol} \cdot \text{grad})$ **mollik gaz turaqlısı** dep ataladı. Zattın' moline tiyisli shamalar **mollik** dep ataladı.

Mollik ko'lem tu'sinigin kirgiziw arqalı (9-6a) g'a basqa tu'r beremiz. Mollik ko'lem dep zattın' 1 molinin' ko'lemine aytamız:

$V_m = (\text{gaz ta'repinen iyelengen ko'lem})/(\text{gazdegi moller sanı}) = V/v$. Bunday jag'dayda

$$pV_m = RT. \quad (9-6b)$$

Ko'pshilik jag'daylarda (9-6a) g'a gaz massasın kirgizedi. Zattın' massası m menen mollik massa M arasında $M = m/v$ baylanısı bar. Demek

$$pV = (m/M) RT. \quad (9-8)$$

(9-6a) formulasına B.P.E.Klapeyron ha'm D.I.Mendeleevlerdin' atının' beriliwi to'mendegi jag'daylarga 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 Tselsiya shkalasındag'ı temperatura. Klapeyron gazdın' temperaturalıq ken'eyiw koeffitsienti $1/273$ tin' ornına $1/267$ ge ten' shama aldı. Bunnan keyin jazıw D.I.Mendeleev ta'repinen jetilistirildi. Ol ten'lemege mollik gaz turaqlısın endirdi ha'm ten'lemeni (9-8) tu'rinde jazdı.

Dalton nızamı. Gazlerdin' aralaspasının' ha'r bir qurawshısının' bir birinen g'a'rezsiz ekenligi joqarıda aytılp o'tilgen edi. Sonlıqtan ha'r bir qurawshı (9-3) ke sa'ykes basım payda etedi. Al tolıq basım ha'r bir qurawshı payda etken basımlardın' qosındısına ten':

$$p = n_{01}kT + n_{02}kT + \dots + n_{0i}kT = p_1 + p_2 + \dots + p_i. \quad (9-9)$$

Bul formulada r_i arqalı **partsiyalıq basım** belgilengen. (9-9) ten'ligi menen an'latılğan nızam **Dalton nızamı** dep ataladı. A'llette jetkilikli u'lken basımlarda Dalton nızamı juwıq tu'rde orınlanadı. Sebebi bul jag'daylarda aralaspasının' 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.

Gaz aralaspasının' qurawshılarının' partsiyalıq basımın, massasın ha'm mollik massasın sa'ykes r_i , m_i ha'm M_i arqalı belgilep Dalton nızamı (9-9) nın' ja'rdeminde (9-8) ten'lemesin bılayınsha jazamız:

$$(p_1 + p_2 + \dots + p_i)V = (m_1/M_1 + m_2/M_2 + \dots + m_i/M_i)RT. \quad (9-10a)$$

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 $1/\langle M \rangle = (1/m)(m_1/M_1 + m_2/M_2 + \dots + m_i/M_i)$ ten'ligi menen anıqlanatuğ'ın gaz aralaspası ushın ortasha mollik massa shamasın kirgizip (9-10a) ten'lemesin bir komponentalı gaz ushın jazılğan (9-8) ten'lemesindey etip jazamız:

$$pV = (m/\langle M \rangle)RT. \quad (9-10b)$$

Avagadro nızamı. Ideal gazlerdin' hal ten'lemesi $pV = nkT$ dan birdey temperatura menen birdey basımlarda qa'legen gazdin' o'z-ara ten'dey bolg'an ko'lemlerinde birdey sandag'ı molekulalardin' jaylasatug'inlig'ı ko'rinip tur. 1811-jılı belgilengen bunday tastıyıqlaw **Avagadro nızamı** dep ataladı.

Demek qa'legen gazdin' bir moli belgili temperatura menen basımda birdey ko'lemge iye boladı. Normal sharayatlarda ($p = 101.325 \text{ kPa}$; $T = 273.15 \text{ K}$) bul ko'lem

$$V_m = (RT/p) = 22.41383 \text{ m}^3/\text{mol}.$$

Usınday sharayatlardag'ı kontsentratsiya **Loshmidt sanı** ja'rdeminde beriledi:

$$N_1 = 2.6867754 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3} = 2.6867754 \cdot 10^{19} \text{ sm}^{-3}.$$

§ 2-9. Temperatura

Termometrlik dene ha'm termometrlik shama. Temperaturanın' empirikalıq shkalası. Empirikalıq temperaturanın' termometrlik shama menen termometrlik shamadan g'a'rezliligi. Temperaturanın' absolyut termodinamikalıq shkalası. Kelvin boyınsha nol.

Termometrlik dene ha'm termometrlik shama. Temperatura denenin' «qızdırılǵ'anlıǵ'ının» sanlıq o'lishemi bolıp tabıladı. «Qızdırılǵ'anlıq» tu'sinigi subektov tu'sinik bolıp tabıladı. «Qızdırılǵ'an» dene «qızdırılmag'an» dene menen uzaq waqıt bir birine tiydirilip qoyılsa «qızdırılǵ'an» deneden «qızdırılmag'an» denegе jıllılıq o'tedi ha'm na'tiyjede «qızdırılmag'an» denenin' temperaturası artadı dep esaplaymız. Denenin' «qızdırılǵ'anlıq» da'rejesi usı «qızdırılǵ'anlıq» qa baylanıslı bolg'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 basqa bir shamanı o'lishewge alıp klinedi.

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

Temperaturanın' empirikalıq shkalası. En' aldı menen termometrlik deneni saylap alamız. Termometrlik shamanı 1 ha'ripi menen belgileyemiz. 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'in shamanın' san ma'nisine aytamız.** Temperaturanın' o'zi termometrlik shama bolıp tabılmaydı. Onın' ma'nisi termometrlik shamadan alınadı ha'm **graduslarda** an'latıladı.

Temperaturanın' gradusı dep

$$1^0 = (l_2 - l_1)/(t_2 - t_1) \quad (10-1)$$

shamasına aytamız.

Termometrlik denenin' temperaturası dep

$$t = t_1 + (l_t - l_1)/1^0 = t_1 + (l_t - l_1)(t_2 - t_1)/(l_2 - l_1) \quad (10-2)$$

shamasına aytamız. Bul jerdegi t_1 o'lshep atırlıg'an «qızdırg'anlıqtı» o'lshegende alıng'an termometrlik shama.

(10-1) ha'm (10-2) 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 bir gradustın' shaması ha'r qanday shkalalarda ha'r qanday eken. Sonın' menen birge ha'r bir temperaturalar shkalası ushın termometrlik deneden g'a'rezli boladı.

Temperaturaların' absolyut termodinamikalıq shkalası. Termometrlik dene ushın qoyılatug'ın talaplar usınday dana retinde ideal gazdı alıw haqqındag'ı pikirde payda etedi. Ideal gazdın' hal ten'lemesi $pV = \nu RT$ termometrlik shama retinde da'l o'lshepiwi mu'mkin bolg'an V yamasa r shamaların alıwdın' mu'mkin ekenligin ko'rsetedi. Bunday termometrlik denede qaytadan o'lshepler ju'rgizgende da'slepki dey shamaların' da'l alınatug'ınlıg'ına gu'man tuwılmaydı. Biraq bunday dene ta'biyatta bolmaydı. Usıg'an baylanışlı qa'siyetleri ideal gazge jaqın keletug'ın gazdı saylap alıwg'a boladı. Eksperiment jetkilikli da'rejede siyrekletilgen gazdın' qa'siyetlerinin' ideal gazdın' qa'siyetlerine jaqın ekenligin ko'rsetedi. Sonlıqtan olardı termometrlik dene retinde paydalanıw mu'mkin. Ideal gazdın' ten'lemesi bolg'an (9-6a) u'sh o'zgermeli shamalı 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 r yamasa V shamaların alıw mu'mkin. Eger V alınatug'ın bolsa Gey-Lyussak nızamı nızam bolıwdan qaladı ha'm ol qabıl etilgen temperaturanın' anıqlamasının' na'tiyjesi bolıp qaladı. Bul jag'dayda ideal gazdın' ekinshi g'a'rezsiz nızamı retinde $p_1/p_2 = T_1/T_2$ Sharl nızamı alınadı.

Reperlik noqatlar retinde suwdın' eriw ha'm qaynaw temperaturaların alıwg'a boladı. Bul temperaturaların' T_1 ha'm T_2 arqalı belgileybiz. 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 gazdın' qa'siyetlerine jaqın etip alıng'an gazdın' suwdın' eriw temperaturasındag'ı r_1 ha'm qaynaw temperaturasındag'ı r_2 basımların o'lshep mu'mkin. Usınday o'lsheplerdin' 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 ayılğ'anday etip temperaturalar shkalasın qabıl etiw tolıg'ı menen qanaatlandırırılıq emes. Sebebi suwdın' eriw menen qaytaw temperaturası basınnan g'a'rezli. Sonlıqtan SI sistemasında suwdın' eriw temperaturasına 273.16 K, al temperatura birligi retinde suwdın' eriw temperaturası menen absolyut nol arasındag'ı ayırmanın' $1/273.16$ bo'legi qabıl etilgen.

Termometrlik dene retinde ideal gazdı qabıl etip temperaturanı

$$T = 273.16 \cdot p/p_0 \quad (10-5)$$

formulası menen esaplawg'a boladı. p_0 suwdın' eriw temperaturasındaǵı basım, p - o'lsheńip atırǵan temperaturadaǵı basım. O'lsheń barısında gazdın' ko'lemi V turaqlı bolıp qalıwı kerek.

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

Kelvin boyınsha nol. (9-6) ten'lemesinen to'mendegiler kelip shıǵadı:

Ideal gazdın' teris ma'nisli basımınan bolmawına baylanisli absolyut termodinamikalıq temperatura belgisin o'zgerge 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 jetiwidin' mu'mkin emesligin ko'rsetedi. 0 K ge shekli sandag'ı operatsiyalardıń na'tiyjesinde mu'mkin emesligi termodinamikada **termodinamikanın' u'shinshi baslaması** dep atalıwshı postulat sıpatında qabil etiledi.

Temperatura termometrlik shama bolıp tabılmaıdı. Sonlıqtan temperaturanı o'lsheń barlıq waqıtta da barometrdin' ja'rdeminde biyiklikti o'lshewdi eske tu'siredi. Barometrdin' ja'rdeminde biyiklik basımdı o'lsheń yamasa barometrdi biyiklikten erkin tu'rde taslap jiberip, onın' Jer betine kelip jetemen degen she wairı o'lsheń arqalı a'melge asırıladı. Basqa jolı joq.

Belgilenip alıng'an shkala menen reperlik noqat bar bolg'an jag'dayda termometrlik dene menen termometrlik shamalı ha'r qıylı etip saylap alg'anda emperikalıq temperatura birdey ma'niske iye bolmaıdı.

Temperaturanın' xalıqaralıq a'meliy shkalası o'lsheń a'sbapların an'sat kalibrovkalaw ha'm temperaturanın' absolyut termodinamikalıq shkalasın jetkilikli da'rejede a'piwayı ha'm da'l etip du'zip alıwdı a'melge asırıwg'a karatılǵan.

Absolyut termodinamikalıq temperatura o'z belgisin o'zgerge almaydı. Bul temperaturanı on' ma'niske iye dep esaplaw ulıwma tu'rde qabil etilgen. Sonlıqtan bunday temperatura teris ma'niske iye bolmaıdı.

Absolyut termodinamikalıq temperaturanın' noline jetiw mu'mkin emes. Biraq qa'legen da'rejege shekem sol nolge jaqınlaw mu'mkinshiligi biykarlanbag'an.

§ 2-10. Boltsman bo'listiriliwi

Idıstag'ı gazler aralaspası. Maksvell ha'm Boltsman bo'listiriwleri arasındag'ı baylanis. Boltsman bo'listiriliwin eksperimentte tekseriw. Barometrlik formula. Ko'teriw ku'shi.

Temperaturanın' sırtqı potentsial maydanna g'a'rezsizligi. Sırtqı potentsial maydanda turg'an gazdın' tolıq energiyası $E = mv^2/2 + E_p$ g'a ten', E_p - molekulanın' potentsial energiyası. Potentsial maydanda qozg'alg'anda bo'lekshenin' kinetikalıq energiyası o'zgeredi. Da'slepki ko'z-qaras penen qarag'anda molekulalardıń ortasha energiyası ha'm sog'an sa'ykes temperatura o'zgeredi dep oylaw mu'mkin. Biraq onday emes.

Joqarıda ortasha kinetikalıq energiya ha'm temperatura haqqında aytilg'anlar potentsial maydanda turg'an jag'daylar ushin da orınlanadı. Maksvell bo'listiriliwi de o'zinin' a'hmiyetin tolıq

saqlaydi. Demek *termodinamikaliq ten' salmaqlıq halında sırtqı potentsial maydanda turg'an sistemanın' barlıq noqatlarında temperatura birdey ma'niske iye boladı.*

Sırtqı potentsial maydan molekulların' kontsentratsiyasına u'lken ta'sirin tiygizedi.

Boltsman bo'listiriliwi. Molekulanın' potentsial energiyası E_p bolsa, bul molekulag'a $F = -\text{grad}E_p$ ku'shi ta'sir etedi. X ko'sheri bag'ıtındag'ı ku'shlerdin' balansın qaraymız.

Qabırğ'alarının' uzınlıg'ı dx , du , dz bolg'an kubtın' ishindegı molekullarg'a ta'sir etetug'in ku'sh:

$$dF_{1x} = -n_0 du dz dx \partial E_p / \partial x. \quad (11-1)$$

n_0 - molekullar kontsentratsiyası. Kubtın' X ko'sheri bag'ıtındag'ı jaqları arasındag'ı basımlar ayırması $(\partial p / \partial x) dx$ qa ten'. Al usı ayırmanın' bar bolıwı sebepli payda bolg'an X ko'sheri bag'ıtında ta'sir etiwshi ku'sh:

$$dF_{2x} = -(\partial p / \partial x) dx du dz. \quad (11-2)$$

Ten' salmaqlıq halda bul ku'shler bir birin ten'estiriwi kerek, yag'nıy $dF_{1x} + dF_{2x} = 0$ yamasa

$$(\partial p / \partial x) dx = -(\partial E_p / \partial x) dx du dz. \quad (11-3)$$

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 iye bolamız:

$$(\partial p / \partial x) dx + (\partial p / \partial u) du + (\partial p / \partial z) dz = -n_0 [(\partial E_p / \partial x) dx + (\partial E_p / \partial u) du + (\partial E_p / \partial z) dz] = -n_0 dE_p. \quad (11-4)$$

Bul an'latpadag'ı dr menen dE_p basım menen potentsial energiyanın' o'zgeriwiniń tolıq differentsialları. (9-3) penen $T = \text{const}$ sha'rtinen

$$dp = kT dn_0 \quad (11-5)$$

ha'm

$$dn_0/n = -dE_p/(kT). \quad (11-6)$$

(x_0, u_0, z_0) ha'm (x, u, z) noqatları arasındag'ı ıqtıyarlı aling'an jol boyınsha bul an'latpanı integrallap **Boltsman bo'listiriwin** alamız:

$$n_0(x, u, z) = n_0(x_0, u_0, z_0) * \exp\left[-\frac{E(x, y, z) - E(x_0, y_0, z_0)}{kT}\right] \quad (11-7a)$$

Bul jerde potentsial energiya E ha'ripi ja'rdeminde belgilengen (p indeksi jazılmag'an).

Eger (x_0, u_0, z_0) noqatındag'ı potentsial energiyanı nolge normirovkalasaq

$$n_0 = n_{00} \exp\left[-\frac{E(x, y, z)}{kT}\right], \quad (11-7b)$$

bul jerde $n_0 = n_0(x, u, z)$, $n_{00} = n_0(x_0, u_0, z_0)$.

Eger molekulların' kontsentratsiyası hesh bir jerde belgisiz bolsa Boltsman bo'listiriwin bılayınsha jazamız:

$$n_0 = A \exp\left[-\frac{E(x,y,z)}{kT}\right], \quad (11-8)$$

al normirovka turaqlısın normirovka sha'rtinen tabamız:

$$\int_V n_0(x,u,z) dx du dz = n,$$

bul jerde V sistema ko'lemi. Bul sha'rtten (11-8) di esapqa alıp iye bolamız:

$$n/A = \int_V \exp\left[-\frac{E(x,y,z)}{kT}\right] dx dy dz. \quad (11-9)$$

Boltsman bo'listiriwi (11-8) potentsial energiya $E_p=E(x,u,z)$ tek g'ana koordinatag'a baylanisli bolg'anda emes, al basqa da o'zgermeli shamalarg'a baylanisli bolg'an jag'daylarda da duris boladi. Mısalı elektrlik momenti r bolg'an polyar molekulanın' kernewliligi E bolg'an sırtqı elektr maydanındag'ı potentsial energiyası $E_p = -rE \cos\theta$, bul jerde θ elektr momenti vektori menen kernewlilik vektori arasındag'ı mu'yesh. Termodinamikalıq ten' salmaqlıqta polyar molekulanın' elektr momentleri (11-8) formulasında $E_p = -rE \cos\theta$ bolg'ang'a sa'ykes denelik mu'yeshler boyınsha bo'listiriledi.

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

Molekulanın' potentsial energiyası $h = 0$ de nolge ten' etip normirovkalansın. h biyikligindegi potentsial energiya $U = mgh$ boladi. Demek kontsentratsiyanın' bo'listiriliwi (11-7a) g'a sa'ykes

$$n_{01}(h) = n_{01}(0) \exp [-m_1gh/(kT)],$$

$$n_{02}(h) = n_{02}(0) \exp [-m_2gh/(kT)]. \quad (11-10)$$

Normirovka sha'rtinen

$$S \int_0^{h_0} n_{01}(h) dh = n_1, S \int_0^{h_0} n_{02}(h) dh = n_2 \quad (11-11)$$

to'mendegidey ten'likler alamız:

$$n_{01}(0) = [n_1 m_1 g / (S k T)] [1 - \exp \{-m_1 g h_0 / (k T)\}]^{-1},$$

$$n_{02}(0) = [n_2 m_2 g / (S k T)] [1 - \exp \{-m_2 g h_0 / (k T)\}]^{-1}. \quad (11-12)$$

Ha'r qanday biyikliklerdegi molekulanın' kontsentratsiyalarının' qatnası:

$$\begin{aligned} n_{02}(0)/n_{01}(0) &= [n_2 m_2 / (n_1 m_1)] * [1 - \exp \{-m_1 g h_0 / (k T)\}] / [1 - \exp \{-m_2 g h_0 / (k T)\}] * \\ &* \exp [-(m_2 - m_1) g h_0 / (k T)]. \end{aligned} \quad (11-13)$$

(11-10) formulasınan u'ikenirek massalı molekulanın' biyiklikke baylanisli kontsentratsiyanın' tezirek kemeyetug'inlıg'ı ko'rinip tur. (11-13)-formula awır gaz

tiykarınan ıdıtın' to'meninde, al jen'il gaz ıdıtın' joqarısında ko'birek kontsentratsiyalanadı. Bul hawadan jen'il bolg'an ushıw apparatlarının' ko'teriliw ku'shinin' payda bolıw sebebi bolıp tabıladı.

Maksvell ha'm Boltsman bo'listiriliwleri arasındag'ı baylanıs. Maksvell ha'm Boltsman bo'listiriliwleri Gibbs bo'listiriliwinin' quramlıq bo'lekleri bolıp tabıladı.

Gibbs (yamasa kanonikalıq bo'listiriliw dep ataladı) bo'listiriliwi bılay jazıladı:

$$R_a = A \exp(-\beta E_a).$$

Bul formulada $\beta = 1/kT$, E_a energiya.

Temperatura ortasha kinetikalıq energiyadan kelip shıg'adı. Sonlıqtan potentsial maydanda nelikten temperatura turaqlı bolıp qaladı dep soraw beriledi. Energiyanın' saqlanıw nızamı boyınsha potentsial energiya o'zgerse kinetikalıq energiya da, sog'an sa'ykes temperatura da o'zgeriwi kerek g'o. Basqa so'z benen aytqanda bo'lekshe joqarı qaray qozg'alg'anda kinetikalıq energiyaları kemeydi, temperatura bolsa o'zgermey qaladı, al bo'lekshe to'menge qaray qozg'alsa kinetikalıq energiya artadı, al ortasha energiya turaqlı bolıp qala ma?

Bul jag'day bılayınsha tu'sindiriledi: Ko'terilgende bo'leksheler jıynag'man 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'in ortasha kinetikalıq energiya nollik biyikliktegi ha'r bir bo'lekshege sa'ykes keletug'in kinetikalıq energiyag'a ten'. Al nollik biyikliktegi «a'ctelik penen qozg'alıwshı salqın» bo'leksheler h biyikligine jete almaydı. Eger nollik biyiklikte h biyikligine ko'terile alatug'ınday kinetikalıq energiyag'a 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 biyikligindegi ha'r bir bo'lekshenin' ortasha kinetikalıq energiyası haqıyqatında da kemeydi dep ayta alamız. Bunday ma'niste bo'leksheler toparı joqarig'a ko'terilgende «salqınlawdın'» ju'z bergenligin ko'remiz. Biraq, eger h biyikliginde ha'm nollik biyiklikte usı biyikliklerdegi barlıq bo'leksheler esapqa alınatug'in bolg'anda olardıń ha'r birine sa'ykes keliwshi ortasha energiyalar, sog'an sa'ykes temperaturalar birdey boladı. Bunnan

temperaturanın' turaqlılıg'ı menen bo'lekshelerdin' kontsentratsiyalarının' o'zgerisi arasında anıq qatnas orın alatug'inlig'ı kelip shıg'adı.

Planetaların' atmosferası. Shar ta'rizli dene payda etken awırlıq maydanındag'ı m massalı bo'lekshenin' potentsial energiyası:

$$E_p(r) = - Gvm/r. \quad (11-16)$$

Planetaların', sonın' ishinde Jerdin' atmosferası ten' salmaqlıq halda turmaydı. Jer atmosferası ten' salmaqlıq halda turmag'anlıqtan biyiklikke baylanışlı temperatura to'menleydi. Planetanın' atmosferasının' ten' salmaqlıqta turıwının' printsipinde mu'mkin emes ekenligin ko'rsetemiz. Eger de mu'mkin bolg'anda atmosferanın' tıg'ızılıg'ı biyiklikke baylanışlı (11-7a) boyınsha o'zgerer edi. Bul jag'dayda (11-7a) mına tu'rge enedi:

$$n_0(r) = n_0(r_0) \exp \{ - G[Mm/(kT)](1/r_0 - 1/r) \}. \quad (11-17)$$

Bul jerde potentsial energiya ushın (11-16) an'latpası esapqa alıng'an, r_0 planetanın' radiusı. (11-17) $r \rightarrow \infty$ te shekke iye:

$$n_0(r \rightarrow \infty) \rightarrow n_0(r_0) \exp \{ - G[Mm/(kT)]1/r_0 \}. \quad (11-18)$$

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.

Aqırğ'ı esapta barlıq sistemalar ten' salmaqlıq halg'a o'tiwge umıladı 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'listiriliwın 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 planetalardıń atmosferaları salıstırmalı uzıq waqıtlar saqlanadı, al jen'il planetalar atmosferasın tez jog'altadı.

Barometrlık formula. Izotremalıq atmosfera jag'dayında h biyikligindegi basım

$$p_i(h) = n_{oi}(h)kT$$

$$p_i(h) = p_i(0) \exp [-m_i gh/(kT)]. \quad (11-19)$$

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

$$p(h) = p_1(h) + p_2(h) = p_1(0) \exp [-m_1 gh/(kT)] + p_2(0) \exp [-m_2 gh/(kT)]. \quad (11-20)$$

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

$m/(kT) = \rho_0/p_0$ ekenligi esapqa alsaq (ρ_0 ha'm r_0 nollik biyikliktegi tıg'ızlıq ha'm basım) barometrlık formulanı bilay jaza alamız:

$$p(h) = p_0 \exp (-\rho_0 gh/r_0). \quad (11-21)$$

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:

$$p(h) = p_0 \exp (-h/7.99). \quad (11-22)$$

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 betindegi ortasha basım r_0 de ha'm temperatura $+15^0$ S da 11 000 m biyiklikke shekem (troposfera) xalıqaralıq barometrlık formula sıpatında mına an'latpa qabıl etilgen:

$$p(h) = 101.3(1 - 6.5h/288)^{5.255}.$$

Bul jerde p kPa lardag'ı basım, h - kilometrlerdegi biyiklik.

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 ıdı berilgen bolsın. Uzunlıg'ı 1 bolg'an

tsilindrdin' qaptal jaqları vertikal bag'ıtlang'an dep esaplaymız. Tsilindrdin' u'stingi ha'm to'mengi ultanlarının' maydanların S ke ten' bolsın. Eger tsilindrdin' to'mengi ultanı janında gazdin' kontsentratsiyası n_0 bolsa, u'stingi ultanı qasında $n_1 = n_0 \exp [-mg l / (kT)] \approx n_0 [1 - mg l / (kT)]$.

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

$$F_{\text{ko'teriw}} = S(p_0 - p_1) = S n_0 m g. \quad (11-23)$$

Bul ku'shtin' shaması gazdin' salmag'ına ten'. Bunday na'tiyje Arximed nızamı menen tolıq sa'ykes keledi.

Salmaq maydanında joqarı qaray qozg'alıwshı molekulalardıń energiyası kemeyedi. Biraq bunday jag'dayda da tezlikler boyınsha Maksvell boyınsha bo'listirilwdegi ortasha energiya o'zgeiske ushıramaydı. Ha'r bir molekulanın' energiyasınan' kemeyiwinde molekulanın' ortasha energiyasınan' o'zgerissiz qalıwı «kem energiyag'a iye» molekulalardıń joqarig'a ko'terilgende ag'ıstan shıg'ıp qalıwı menen baylanıslı. Ag'ıstan shıg'ıp qalg'an molekulalar menen qosılatug'ınlıg'ının' saldarınan to'menge qarap qozg'alıwshı molekulalardıń ortasha energiyası o'zgermeydi.

Sorawlar:

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

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

§ 2-11. 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 baylanıslı bolg'an erkinlik da'rejeleri.

Erkinlik da'rejesi sanı. Sistemanın' halın anıqlaytug'ın g'a'rezsiz o'zgermeli shamalardıń sanı sistemanın' erkinlik da'rejesi dep ataladı. Materiallıq noqattın' qozg'alısınan' bazı bir waqıt momentindegi energiyalıq halın tolıq ta'riplew ushin 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 aling'an materiallıq noqattın' qozg'alsın dinamikalıq jaqtan qarag'anda bul o'zgeriwshi shamalar g'a'rezsiz shamalar bolıp qalmaydı. Qozg'alıs ten'lemesi sheshilgende koordinatalardı waqıttın' funktsiyaları, al tezliklerdi bolsa koordinatalar boyınsha aling'an tuwındılar 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, olardıń 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.*

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 a'hmiyetli orın tutadı. Bul ma'seleni matematikalıq jaqtan tolıq da'llilewdi keyinge qaldıramız.

Joqarıda ideal gazdin' molekulasının' ortasha kinetikalıq energiyasının'

$$\langle \frac{mv^2}{2} \rangle = \frac{3}{2} kT \quad (10-1)$$

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

$$\langle \frac{mv_x^2}{2} \rangle = \langle \frac{mv_y^2}{2} \rangle = \langle \frac{mv_z^2}{2} \rangle = \frac{kT}{2}. \quad (10-2)$$

(10-2) nin' gazdin' qa'legen molekulası ushın durıs ekenligi tu'sinikli. Bunnan ideal gazdin' ha'r bir erkinlik da'rejesine birdey bolğ'an $\frac{kT}{2}$ energiya sa'ykes keledi.

Joqarıda gazdin' quramındag'ı ha'r qanday sorttag'ı molekulalardın' ortasha kinetikalıq energiyalarının' 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 $2 \cdot 3 \cdot \frac{kT}{2}$. 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 orayının' qozg'alısına sa'ykes keledi. Eki da'reje molekulanın' eki o'z-ara ortogonal ko'sherler do'geresinde aylanıwına, al bir erkinlik da'rejesi atomlardın' bir birin tutastırıwshı tuwrı boyınsha terbelisine sa'ykes keledi.

Potentsial energiya menen baylanışlı bolğ'an erkinlik da'rejeleri. Bir birin tutastırıwshı tuwrı bag'ıtında terbeliwshı atomlar sızıqlı ostsillyator bolıp tabıladı. 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 $kT/2$ energiya sa'ykes keledi.

Biraq bunday dep tasıyıqlaw atomlar arasındag'ı o'z-ara ta'sirlesiw potentsial energiyası ma'nisi aralıqtın' kvadratının' funktsiyası bolğ'an jag'dayda durıs boladı. Energiyanıq erkinlik da'rejesi boyınsha ten'dey bolıp bo'listiriliw qag'ıydası o'z-ara ta'sirlesiwidin' basqa nızamları orınlang'anda durıs bolmaydı.

Energiyanın' erkinlik da'rejeleri boyınsha birdey bo'listiliwi bir erkinlik da'rejesine sa'ykes keletug'in energiyani na'zerde tutadi. Ayqin waqit momentinde berilgen erkinlik da'rejesine sa'ykes keletug'in energiya basqa erkinlik da'rejesine sa'ykes keliwshi energiyag'a ten' bolmawı mu'mkin. Tek u'lken waqit aralıg'ında alıng'an ha'r qıylı erkinlik da'rejelerine sa'ykes keliwshi energiyalardıń ortasha ma'nisleri bir birine ten' boladı. Ergodikalıq gipotezag'a muwapıq bul ansambl boyınsha alıng'an sa'ykes erkinlik da'rejelerine sa'ykes keliwshi energiyalardıń birdey ekenligin bildiredi.

§ 2-12. 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'in mayda bo'lekshelerdin' barlıq waqıtta qozg'alısta bolatug'inlıg'ı birinshi ret 1827-jılı R.Broun ta'repinen ashıldı ha'm onın' atı menen Broun qozg'alısı dep ataladı. Bul qubılıstın' molekulyar-kinetikalıq tu'sindiriliwi 1905-jılı A.Eynshteyn ta'repinen berildi.

Bul qubılıstın' ma'nisi to'mendegiden ibarat:

Mayda bo'leksheler molekullar menen birlikte bir tutas statistikalıq sistemanı payda etedi. Erkinlik da'rejesi boyınsha ten'dey bolıp bo'listiriliw teoremasi 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'zgartip baradı.

Aylanıw Broun qozg'alısın suyıqlıqtıg'ı mayda bo'lekshelerde emes, al basqa obektlerde baqlanadı.

Aylanbalı Broun qozg'alısı. Bul qubılıstı suwda aralastırılğ'an mayda bo'lekshelerde ko'riw qıyın. Bul qozg'alısı 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 $kT/2$ energiyası sa'ykes keledi. Sonlıqtan ildirilip qoyılğ'an jiptin' a'tırapında 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'lshelew boladı.

Usı terbelisler amplitudasının' ortasha kvadratin esaplaymız. Jiptin' burılıw moduli D , al buralıw ko'sherine salıstırğ'andag'ı aynanın' inertiya momenti J bolsın. Aynanın' ten' salmaqlıq halınan burılıw mu'yeshin ϕ arqalı belgileyik. Buralıw terbelisleri ten'lemesi mınaday tu'rge iye:

$$J\ddot{\phi} = D\phi. \quad (11-1)$$

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 $\dot{\phi}$ shamasına ko'beytip ha'm integrallap jiptin' terbelisindegi energiyanın' saqlanıw nızamın alamız:

$$\frac{1}{2} J \dot{\varphi}^2 = \frac{1}{2} D \varphi^2. \quad (11-2)$$

Kishi buralıw terbelisleri garmonikalıq terbelis bolıp tabıladı. Sonlıqtan:

$$\frac{1}{2} J \langle \dot{\varphi}^2 \rangle = \frac{1}{2} D \langle \varphi^2 \rangle = \frac{kT}{2}. \quad (11-3)$$

Bul jerde energiyanın' erkinlik da'rejeleri boyınsha ten' bo'listiriliwi teoreması paydalanılğ'an. Sonlıqtan aynanın' Brounıq burılıw terbelisleri ushın alamız:

$$\langle \varphi^2 \rangle = kT/D. \quad (11-4)$$

Bul shamanı o'lshew mu'mkin. Mısalı $T \approx 290 \text{ K}$, $D \approx 10^{-15} \text{ N*m}$ bolğ'an jag'dayda $\langle \varphi^2 \rangle \approx 4 \cdot 10^{-6}$. Bul shamanı o'lshew mu'mkin.

§ 2-13. 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 statistikalariının' dara jag'dayı sıpatında. Bir birinen ayrılatur'ın bo'lekshelerdin' energiya boyınsha tarqalıwı.

Usı waqıtlarg'a shekem ko'p bo'lekshelerden turatur'ın 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 qabıl etildi. Sonlıqtan mikrohallerdin' sanı esaplang'anda eki bo'lekshe orın almasırg'andag'ı mikrohaller birdey emes dep esaplandı. Bir birinen parqı bar bo'lekshelerdin' usınday modeli **Maksvel-Boltsman modeli** dep ataladı. Usınday tiykarda alıng'an statistikalıq teoriya **Maksvel-Boltsman statistikasi** 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 almasırg'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, mikrohaller sanın esaplawdın' Maksvel-Boltsman modelinendegiden o'zgeshe basqa usıllardan paydalanıw kerek.

Boze-Eynshteyn menen Fermi-Dirak modelleri. Bo'lekshelerdin' bir birinen parqı joq dep qaralatur'ın modeller Boze-Eynshteyn menen Fermi-Dirak modelleri bolıp tabıladı.

Sonın' menen birge mikrohallerag'a bo'lekshelerdin' qatnası boyınsha bul modeller bir birinen ayrılardı. Berilgen halda tek g'ana bir bo'lekshe bola aladı dep esaplanatur'ın 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 energiyanın' ma'nisi boyınsha emes, al basqa da parametrlar menen ta'riplenetur'ınlig'ın atap o'temiz. Mısalı birdey energiyalı, biraq bo'lekshenin' impulsinin' bag'ıtı boyınsha ayrılatur'ın hallar ha'r qıylı hallar bolıp tabıladı. Sonlıqtan da'lirek tu'rde bılay tasiyıqlaymız: **Boze-Eynshteyn modelinde ha'r bir kvant halında qa'legen sandag'ı, al Fermi-Dirak modelinde tek g'ana bir**

bo'lekshe tura aladi. Boze-Eynshteyn modeline tiykarlang'an statistikaliq teoriya **Boze-Eynshteyn statistikasi** dep ataladi.

Maksvel-Boltsman statistikasi formulasi Boze-Eynshteyn ha'm Fermi-Dirak statistikalari formulalarinin' shektegi dara jag'dayi bolip tabiladi. Real bo'leksheler bir birinen parqi joq, sonliqtan da olar Maksvell-Boltsman modeline sa'ykes kelmeydi ha'm yaki Boze-Eynshteyn, yaki Fermi-Dirak statistikasina bag'madi. V.Pauli ta'repinen pu'tin spinge iye bo'lekshelerdin' Boze-Eynshteyn, al yarim pu'tin spinge iye bo'lekshelerdin' Fermi-Dirak statistikasina bag'inatug'inlig'i aniqlandi. Maksvell-Boltsman statistikasina bag'inatug'in bo'leksheler joq. Biraq sog'an qaramastan bul statistika ko'pshilik jag'daylarda ko'p bo'lekshelerden turatug'in sistemalardin' qa'siyetlerin duris 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 statistikalarinin' formulaları Maksvell-Boltsman statistikasi 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 jiwi ushırasadı. Tek sheklik jag'daylarda formulalardin' 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'madi.**

Bo'lekshenin' tolıq energiyası onın' tezlikke baylanisli bolg'an kinetikalıq energiyası $E_k = m(v_x^2 + v_u^2 + v_z^2)/2$ menen koordinatalarına g'a'rezli bolg'an potentsial energiya $E_p = E_p(x, u, z)$ nın' qosındısınan turadı.

Bo'lekshenin' E_i energiyasına iye bolıwının' itimallıg'ı

$$\mathcal{J}_i = A \exp(-\beta E_i)$$

formulası menen aniqlanadı. Bul jerde $A = e^{-\alpha}$ normirovkalawshi turaqlı. Bul formula mikrokanonik sistemag'a tiyisli. Usı formuladan $dx du dz dv_x dv_u dv_z$ ko'lem elementindegi (x, u, z, v_x, v_u, v_z) noqanı janında bo'lekshelerdin' sanı

$$dn(x, u, z, v_x, v_u, v_z) = A \exp[-\beta(E_k + E_p)] dx du dz dv_x dv_u dv_z.$$

Bul formula boyınsha bo'lekshenin' ortasha kinetikalıq energiyasın esaplaw arqalı $\beta = 1/(kT)$ ekenligin tabamız (T absolyut termodinamikaliq temperatura). Sonliqtan keyingi formula to'mendegidey tu'rge enedi:

$$dn(x, u, z, v_x, v_y, v_z) = A \exp \{ [mv^2/2 + E_p]/(kT) \} dx du dz dv_x dv_y dv_z \quad (12-1)$$

Bul formula Maksvel-Boltsman bo'listiriwi formulası dep ataladı.

Koordinatalar ha'm tezlikler bir birinen g'a'rezsiz shamalar bolip tabiladi. Sonliqtan (12-1) di tezlikler ha'm koordinatalar boyınsha integrallap to'mendegidey formulalardı alamız:

$$dn(x, u, z) = A_1 \exp [-E_p(x, u, z)/(kT)] dx du dz, \quad (12-2)$$

$$dn(v_x, v_y, v_z) = A_2 \exp [m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)/(2kT)] dv_x dv_y dv_z. \quad (12-3)$$

A_1 ha'm A_2 ler normirovkalawshi turaqlılar. (12-2) menen (12-3) 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'lekshelerdin' bir birinen parqlanatug'ınlg'ı diqqattan tista qaladı.

Fizikalıq jaqtan bul awhaldın' orın alıwı qa'telik bolıp tabıladı. Sebebi ta'biyatta bir birinen parqlanatug'ın bo'leksheler joq ha'm olar ya Boze-Eynshteyn, ya Fermi-Dirak bo'listiriliwi boyınsha ta'riplenedi. Biraq klassikalıq fizikanın' en' ko'p ushırasatug'ın 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'ın jag'dayda qanday da eki bo'lekshe orınların almasırg'anda payda bolatug'ın mikrohollar ha'r qıylı dep esaplanadı. Bir birinen parqı joq bo'leksheler bolg'anda mikrohollar birdey (bo'leksheler orınların 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 ajıralatug'ın 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'ın sistemalar ushın tabıslı tu'rde qollanıladı. Bul qalay tu'sindiriledi?

§ 2-14. Termodinamikanın' birinshi baslaması

Termodinamika ma'seleleri. Jumıs. Jıllılıq. Ishki energiya. Termodinamikanın' birinshi baslaması.

Ko'p bo'lekshelerden turatug'ın sistemalar bazı bir ulıwmalıq nızamlarg'a (misalı energiyanın' saqlanıw nızamı) bag'ınadı. Bul nızamlardı termodinamikanın' baslamaları dep ataydı. Sistemanın' makroskopiyaalıq halı usı sistemag'a tolg'ı menen qatnası bar ha'm anıq ma'niske iye parametrler menen ta'riplenedi. Tutası menen alıng'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 mikroskopiyaalıq mexanizmlerine itibar bermey termodinamika baslamaları dep atalatug'ın ulıwmalıq nızamlar tiykarında makroskopiyaalıq parametrler menen ta'riplenetug'ın materiallıq denelerdin' qa'siyetleri fenomenologiyalıq izertlewden ibarat.

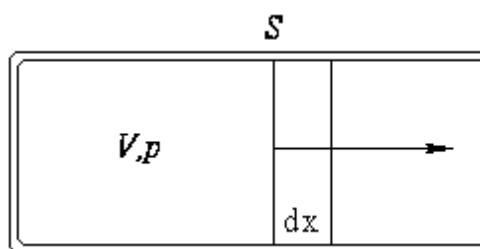
Termodinamika u'sh baslamag'a tiykarlanadı. Birinshi baslama termodinamika ta'repinen u'yrenilip atırg'an qubılıslarg'a energiyanın' saqlanıw nızamın qollanıwdan ibarat. Ekinshi baslama termodinamikada u'yreniletug'ın protsesslerdin' bag'ıtın

aniqlaydı. :shinshi baslama termodinamikalıq temperaturanın' noline jetiwidin' mu'mkin emesligi tiykarında protsesslerge shek qoyadı.

Jumis. Gaz benen toltırılǵan ko'lemdi kishireytiw ushın usı gaz basımın jen'iw ushın jumıs islew kerek. Qozǵalıwının' na'tiyjesinde jumıs islenetug'ın porshenge iye tsilindrlik ıdıstag'ı gazdı ko'z aldımızǵa keltireyik (su'wrette ko'rsetilgen). Basımı p g'a ten' gazdin' maydanı S ke ten' bolg'an porshenge ta'sir etiw ku'shi pS ke ten'. Demek porshen jılısqanda islengen jumıs $pSdV = pdV$ g'a ten' (dV gaz ko'leminin' o'zgerisi). 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

$$\delta A = pdV. \quad (13-1)$$

Bul jerde jumıs ushın δA belgilewinin' (dA emes) qollanılǵanı keyin talqılanadı.



2-11 su'wret. Jumıs ushın an'latpa alıw maqsetinde qollanılatur'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' barlıǵının' da xarakterli o'zgesheligi to'mendegiden ibarat:

Bazı bir makroskopiyaq parametrlerin o'zgertiw arqalı sistemadan energiya alınadı yamasa sistemag'a energiya beriledi. Bul so'zler ayırıqsha a'hmiyetke iye. Sistemanın' makroskopiyaq parametrlerin o'zgeretpey energiya beriw de, energiyanı alıw da mu'mkin emes. Bunday jag'dayda jumıs islendi dep ayıtwg'a bolmaydı.

Sistemag'a jıllılıq beriw arqalı energiya beriwdi mısıl retinde ko'reyik. Bul jag'dayda sistema u'stinen jumıs islendi dep ayıtwg'a bolmaydı ha'm makroskopiyaq parametrler jıllılıq beriwdin' na'tiyjesi sıpatında o'zgeredi.

Ulıwma jag'dayda jumıs ushın an'latpa to'mendegidey tu'rge iye boladı:

Jumisqa baylanıslı o'zgeretug'ın parametrlerdi μ_1, μ_2, \dots dep belgileyik. μ_i parametri sheksiz kishi o'zgerse $\delta A = f_i d\mu_i$ jumısı islenedi. Bul jerde f_i ulıwmalasqan ku'sh. Belgiler (13-1) degidey etip alınadı.

Eger jumıs sistema u'stinen islense δA teris ma'niske iye boladı.

Toliq jumıs:

$$\delta A = f_1 d\mu_1 + f_2 d\mu_2 + \dots \quad (13-2)$$

$f_i d\mu_i$ ag'zaları arasına (13-1) de kirgizilgen dep esaplaymız. Mısalı ulıwmalasqan ku'sh $f_1 = r$, al ulıwmalasqan koordinata $\mu_1 = V$, yag'nıy $d\mu_1 = dV$. Biraq a'dette a'piwayılıq ushın (13-1) tu'rindegi jazıw qollanıladı. (13-2) degi keyingi ag'zalar qaldırılıp ketedi. Usıǵan baylanıslı bazı bir mısallar keltiremiz.

Sterjen ku'shtin' ta'sirinde qisqaradı yamasa soziladı. Onın' uzınlıg'ı d1 shamasına o'zgergende islengen jumıs

$$\delta A = - f d1.$$

f ku'shtin' absolyut ma'nisi. Sterjen sozilg'anda sistema u'stinen jumıs islenedi. Sonlıqtan minus belgisi qoyılğ'an.

dq zaryadın U potentsiallar ayırmasına iye noqatlar arasında ko'shiringende islengen jumıs

$$\delta A = - U dq.$$

Bul misal (13-2) 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'ınlig'ı ma'lim. Jıllıraq denelerden salqın denelerde jıllılıq o'tedi dep aytamız. **Jıllılıq - bul ayırıqsha formadag'ı, molekullıq qozg'alıs formasındag'ı energiya.** Usınday ayırıqsha formadag'ı sheksiz kishi energiyanı δQ arqalı belgileyemiz. Bunday ayırıqsha formadag'ı energiya - jıllılıq sistemag'a beriliwi de, sistemadan alınıwi da mu'mkin. Eger sistemag'a jıllılıq beriletug'ın bolsa δQ dın' belgisi on', al alinatug'ın bolsa teris etip alınadı.

Jumıs tu'sinigi texnikada da'slep XVIII a'sirdin' ortalarında suw ko'teriwshi mashinalardıń jumıs isley alıwshılıq qa'biletliginin' o'lishemi 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.

Ishki energiya. Sistemadag'ı bo'lekshelerdin' mu'mkin bolg'an qozg'alıslarının' barlıq tu'rleri ha'm olardıń bir biri menen ta'sir etisiwine baylanisli 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 energiylarının' jıynag'ı sistemanın' ishki energiysı dep ataladı. Bul anıqlamadan sistemanın' massa orayının' qozg'alısı menen baylanisqan kinetikalıq energiysı, sistemanın' sırtqı potentsial maydanındag'ı potentsial energiysı ishki energiysıg'a kirmeytug'ınlig'ı kelip shıg'adı.

Ishki energiyanın' sheksiz kishi o'simi dU arqalı belgilenedi. Eger sistemanın' ishki energiysı 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 ushin sırtqı jag'daylardı anıqlaytug'ın parametrler ayıladı. Al ishki parametrler dep sırtqı parametrler belgili bir jag'daylar tuwdırğ'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 anıq r 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 parametrgе aylanadı, al ko'lem bolsa ishki parametr bolıp qaladı.

Termodinamikanın' birinshi baslaması. Energiyanın' bir forması sıpatında jıllılıq, ishki energiya ha'm islengen jumıs ushin energiyanın' saqlanıw nızamı bilay jazılıwı mu'mkin:

$$\delta Q = dU + \delta A. \quad (13-3)$$

(13-3) tu'rdegi energiyanın' saqlanıw nızamı termodinamikanın' birinshi baslaması dep ataladı. Bul saqlanıw nızamının' mexanikadag'ı energiyanın' saqlanıw nızamınan ayırmashılıg'ı sheksiz kishi jıllılıq mug'darı δQ dın' barlıg'ında bolıp tabıladı. Energiyanın' usı formasının' qozg'alısın ha'm aylanısın u'yreniw termodinamikanın' tiykarg'ı predmetin quraydı.

Bunnan keyingi talqılawlardıń ko'pshiliginde basım ku'shlerinin' ta'siri menen ko'lemnin' o'zgeriwine baylanıslı bolg'an jumıs qarap shıg'ıladı. Sonlıqtan birinshi baslama (13-3) bılayınsha jazıladı :

$$\delta Q = dU + rdV. \quad (13-4)$$

Mexanikadag'ı sıyaqlı (13-3) protsesstin' rawajlanıw bag'ıtın anıqlay almaydı. Bul an'lapta protsess ju'rgeń jag'dayda usı shamalardıń qalayınsha o'zgeretug'ınlg'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.

Mısalılar keltiremiz:

Basımı $9.8 \cdot 10^4$ Pa, temperaturası $t = 0^\circ\text{S}$ bolg'an 1 l geliydin' ishki energiyasın esaplayıq.

Sheshimi: Ten'day bo'listiriliw nızamı boyınsha geliydin' ha'r bir atomı ushın ortasha $\langle \epsilon \rangle = \frac{3}{2} kT$ energiyası sa'ykes keledi. V ko'lemde $n = V_r/(kT)$ bo'lekshe bar. Demek 1 l geliydin' ishki energiyası

$$U = \frac{3}{2} kT \frac{V_p}{kT} = 3V_r/2 = 147 \text{ Dj}.$$

Termodinmikanın' birinshi baslaması qanday da bir protsesstin' o'tiwin anıqlamaydı. Biraq qanday da bir protsess ju'retug'ın bolsa, bul protsesstin' birinshi baslamasın qanaatlanıdırıwı kerek. Termodinamikanın' birinshi baslamasının' ja'rdeminde anaw yamasa mınaw protsesstin' o'zgeshelikleri izertlenedi.

Termodinamikanın' birinshi baslaması jıllılıq qatnasatug'ın protsessler ushın energiyanın' saqlanıw nızamının' an'latpası bolıp tabıladı. Jumıs makroskopiyaq parametrlerdin' o'zgeriwi menen ju'retug'ın jıllılıqtın' beriliwi menen baylanıslı, al jıllılıqtın' beriliwi molekulaq qozg'alıs energiyasının' beriliwi menen a'melge asadı. Usınday jag'daylardag'ı makroskopiyaq parametrlerdin' o'zgerisi molekulaq qa'ddilerdegi energiyaq sharayatlardıń o'zgerisinin' na'tiyjesi bolıp tabıladı.

R.Feynman boyınsha termodinamika nızamları

Birinshi nızam

Sistemag'a berilgen jillılıq + sistema u'stinen islengen jumıs = Sistemanın' ishki energiyasının' o'simi:

$$dQ + dW = dU.$$

Ekinshi nızam

Birden bir na'tiyjesi rezervuardan jillılıq alıp onı jumısqa aylandıratug'ın protsesstin' bolıwı mu'mkin emes.

T_1 temperaturasında Q_1 jillılıg'ın alıp T_2 temperaturasında Q_2 jillılıg'ın beretug'ın 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 ΔQ jillılıg'ı kelip tu'setug'ın bolsa, onda usı sistemanın' entropiyası $\Delta S = \Delta Q/T$ shamasına artadı.

Eger $T = 0$ bolsa $S = 0$ (u'shinshi nızam).

Qaytımlı protsesslerde sistemanın' barlıq bo'limlerinin' (jillılıq rezervuarların da esapqa alg'anda) entropiyası o'zgermeydi.

Qaytımlı bolmag'an o'zgerislerde sistema entropiyası barqulla o'sedi.

§ 2-15. Differential formalar ha'm tolıq differentials

Differential formalar. Toliq differential.

Differential formanın' tolıq diifferential bolatug'ın sha'rtler talqılanadı. Toliq differential menen hal funktsiyaları arasındag'ı baylanıslar ko'rsetiledi.

Differential formalar. Termodinamikanın' birinshi basamasın eske tu'siremez:

$$\delta Q = dU + \delta A. \quad (13.3)$$

Bul an'latpada sheksiz kishi shamalar bolg'an δQ , dU ha'm δA lar ha'r qıylı belgiler menen belgilengen (Q menen A lardın' aldında δ , al U dın' aldında d). Usınday etip belgilew za'ru'rliligi usı sheksiz kishi shamalardın' qa'siyetlerindegi ayırmag'a baylanıslı. Meyli bazı bir g'a'rezsiz o'zgeriwshi shamalar berilgen bolsın. Da'slep bir g'a'rezsiz o'zgeriwshi x mısılın qaraymız. Bul shamanın' differentialsı 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:

$$f(x)dx = F(x + dx) - F(x) ? \quad (14-1)$$

Basım ko'pshilik jag'daylarda usınday etip qaraw mu'mkin. Matematikalıq tallaw kursında

$$F(x) = \int f(x)dx \quad (14-2)$$

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 differentzial** dep ataladı. F funktsiyanın' sheksiz kishi o'simi sıpatında ol bilay jazıladı:

$$dF(x) = f(x)dx. \quad (14-3)$$

Bul jerde d simbolın funktsiyanın' sheksiz kishi o'simin belgilew ushın kitemiz.

Eki o'zgermeli shama bolg'an jag'daylardıń ko'pshiliginde basqasha jag'dayg'a iye bolamız.

Meyli eki o'zgeriwshi ushın sheksiz kishi shamag'a iye bolayıq:

$$\sigma = R(x,u)dx + Q(x,u)du. \quad (14-4)$$

Bul jerde $R(x,u)$ ha'm $Q(x,u)$ x ha'm u lerdin' funktsiyaları bolsın. Usı sheksiz kishi shamanı $F(x,u)$ funktsiyanın' o'simi $F(x+dx, u+du) - F(x,u) = \sigma$ sıpatında ko'rsetiwge bolama dep soraw qoyıladi. Ulıwma jag'dayda iqtıyarlı R ha'm Q larda mu'mkin emes ekenligi matematikalıq tallaw kursında da'lillenedi.

Tolıq differentzial. Joqarıda qoyılǵ'an sorawg'a R menen Q funktsiyaları arasında tek belgili bir qatnaslar bar bolg'anda boladı dep juwap beriwge boladı. Usı talaptı jazamız:

$$R(x,u)dx + Q(x,u)du = F(x+dx, u+du) - F(x,u). \quad (14-5)$$

$F(x+dx, u+du) - F(x,u)$ tı qatarg'a jayamız ha'm to'mendegidey ag'zalar menen sheklenemiz:

$$F(x + dx, y + dy) - F(x, y) = F(x, y) + \frac{\partial F}{\partial x} dx + \frac{\partial F}{\partial y} dy. \quad (14-6)$$

(14-5) ten'ligi to'mendegige aylanadı:

$$Pdx + Qdy = \frac{\partial F}{\partial x} dx + \frac{\partial F}{\partial y} dy. \quad (14-7)$$

x ha'm u ler g'a'rezsiz shamalar bolg'anlıqtan (14-7) den

$$P = \frac{\partial F}{\partial x}, \quad Q = \frac{\partial F}{\partial y}. \quad (14-8)$$

ekenligi kelip shıǵ'adı. R nı u, Q dı x boyınsha differentziallap

$$\frac{\partial P}{\partial y} = \frac{\partial^2 F}{\partial y \partial x}, \quad \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y}. \quad (14-9)$$

Aralas tuwındı differentziallaw 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 (14-9) dan alamız:

$$\frac{\partial P}{\partial y} = \frac{\partial Q}{\partial x} . \quad (14-10)$$

Demek (14-4) sheksiz kishi shamasın eger R ha'm Q funktsiyaları (14-10) sha'rtin qanaatlandırug'ın bolsa basqa bir F(x,u) funktsiyasının' (14-5) yamasa (14-7) 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 atırg'an jag'dayda (14-4) sheksiz kishi shaması **tolıq differentsial** dep ataladı ha'm (14-7) nin' ja'rdeminde bılay jazıladı

$$\sigma = Pdx + Qdy = \frac{\partial F}{\partial x} dx + \frac{\partial F}{\partial y} dy = dF . \quad (14-11)$$

Bul jerde F funktsiyasının' sheksiz kishi o'simi ushın dF belgilewi qollanılg'an.

Tolıq differentsial bolıp tabılıwshı sheksiz kishi shamanın' tiykarg'ı qa'siyeti (x₁,u₁) ha'm (x₂,u₂) noqatları arasında alıng'an

$$\int_{(x_1, y_1)}^{(x_2, y_2)} (Pdx + Qdy) \quad (14-12)$$

integralının' tek g'ana baslang'ısh ha'm aqırg'ı noqatlarg'a baylanıslı, al sol noqatlar arasındag'ı o'tken jolg'a g'a'rezsizlilinde boladı. (14-12) integralı (14-11) sha'rti orınlang'anda bılayınsha esaplanadı:

$$\int_{(x_1, y_1)}^{(x_2, y_2)} (Pdx + Qdy) = \int_{(x_1, y_1)}^{(x_2, y_2)} dF = F(x_1, y_1) - F(x_2, y_2) . \quad (14-13)$$

Eger o'zgermeli shama x bazı bir sistemanın' halın ta'riplese, (14-4) tu'rindegi sheksiz kishi shama F funktsiyasının' tolıq differentsialı bolsa, onda

F funktsiyası hal funktsiyası bolıp tabıladı. Bul funktsiya sistemanıq berilgen hali ushın anıq ma'niske iye boladı, funktsiyanın' bul ma'nisi sistemanın' usı halg'a qanday jol yamasa usıl menen kelgenligine baylanıslı emes.

Hal funktsiyaları usı haldın' a'hmiyetli ta'riplemeleri bolıp tabıladı.

Sorawlar: Ishki energiya sıyaqlı jılılıq ta molekularlar qa'ddindegi energiyalıq sha'rtlerge baylanıslı. Olardın' ayırması nelerden ibarat?
Qanday sharayatlarda differentsial formalar tolıq differentsial bolıp tabıladı ha'm hal funktsiyası degenimiz ne?
Hal funktsiyasının' qaysı qa'siyetin en' a'hmiyetli qa'siyeti dep ataymız?

§ 2-16. Qayıtlı ha'm qayıtsız protsessler

Protsessler. Ten' salmaqlı emes ha'm ten' salmaqlı protsessler. Qayıtlı ha'm qayıtsız protsessler.

Protsessler. Sistemanın' ten' salmaqlıq halı makroskopiyaqlıq parametrlar bolg'an r , V ha'm T lardin' ma'nislari menen ta'riplenedi. Biraq termodinamikaliq qaraw ramkasında ideal gazdın' ne ekenligi ele anıqlang'an joq.

Ideal 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'ınıy r_1 , V_1 ha'm T_1 parametrlarinin r_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.

r_1 , V_1 , T_1 halın A halı, al r_2 , V_2 ha'm T_2 parametrlari menen belgilengen haldı V ha'ripi menen belgileyik. Bunday jag'dayda A halınan V halına o'tiw protsessin ($A \rightarrow V$ protsessin) a'dette tuwrı, al $V \rightarrow A$ protsessin **keri protsess** dep ataymız.

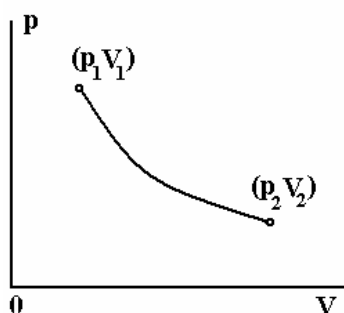
Ten' salmaqlıq emes protsessler. Ma'yli basqa ko'lemge iye halg'a o'tiw kerek bolsın. Eger usı o'tiw a'ste aqırılıq penen ju'rgizilmese ko'lem boyınsha basımın' turaqlılıg'ı, sonın' menen birge temperaturanın' turaqlılıg'ı buzıladı. Ha'r bir noqatta ha'r qanday ma'niske iye bolg'anlıqtan anıq basım ha'm temperatura haqqında da aytiw mu'mkinshiligi bolmaydı. Onnan qala berse ko'lem boyınsha basım menen temperaturanın' 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 baylanisli. Solay etip usınday protsesstegi aralıqtag'ı hallardın' barlıg'ı da ten' salmaqlı emes hallar bolıp tabıladı. *Usınday protsess ten' salmaqlı emes protsess dep ataladı.*

Ten' salmaqlı 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'nislarine 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 ataladı.*** Diagrammada bunday protsessti u'zliksiz iymeklik ja'rdeminde ko'rsetiwge boladı. Ideal gazlardin' hal ten'lemesi bolg'an $rV_m = RT$ ten'lemesinde qa'legen eki parametr protsessti ta'ripleytug'ın g'a'rezsiz parametr bolıp esaplanadı. Mısal retinde su'wrette r_1, V_1 halınan r_2, V_2 halına o'tiw protsessi ko'rsetilgen. Ha'r bir noqattag'ı temperatura hal ten'lemesinen bir ma'nisli anıqlanadı.

Termodinamikanın' teoriyaqlıq usıllarında **kvizistatikalıq** yamasa **kviziten'salmaqlıq** protsessler dep atalatug'ın protsessler ken'nen qollanıladı. 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 arqalı keri o'tiw mu'mkin bolg'an protsesske aytamız.

Qaytımsız protsess dep aqırğ'ı haldan da'slepki halg'a sol aralıqlıq hallar arqalı o'tiw mu'mkin bolmag'an protsesske aytamız.



2-12 su'wret. Ten'salmaqlıq protsessstin' su'wretleniwi.

Qaytımsız protsesske misal retinde bir birine tiydirilip qoyılǵ'an to'men qızdırılǵ'an deneden joqarıraq qızdırılǵ'an deneg'e jıllılıqtın' o'tiwin keltiriwge boladı. Bunday protsessstin' qaytımsız ekenligi lektsiyalarda keyinirek ga'p etiletug'ın Klauzius postulatınan kelip shıǵ'adı (Klauzius 1850-jılı «Jıllılıq to'men qızdırılǵ'an deneden joqarı qızdırılǵ'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 misal menen bir qatarda qaytımsız protsesske su'ykelistin' saldarınan jıllılıqtın' alınıwın da ko'rsetiw mu'mkin. Bunday protsessstin' qaytımsızlıǵ'ı bolsa Tomson-Plank postulatınan kelip shıǵ'adı (Tomson-Plank postuladı boyınsha birden bir na'tiyjesi jıllılıq rezervuarının' salqınlawının' esabınan jumıs isleytug'ın aylanbalı protsessstin' bolıwı mu'mkin emes).

Ten' salmaqlıq emes protsessstin' 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 protsessstin' bolıwı mu'mkin (misalı 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 V halına o'tkereyik. Bunday protsessni tuwrı protsess dep atayıq. Eger bul sistemanı V halınan A halına tuwrı protsesste o'tken joldan o'zgeshe jol menen apara alsaq a'melge asırılǵ'an protsessni **ken' ma'nistegi qaytımlı protsess** dep ataw qabil etilgen. Eger sistema V halınan A halına tek g'ana $A \rightarrow V$ o'tiwindegi ju'rgen jol menen qaytatug'ın bolsa $A \rightarrow V$ 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 (durısıraq'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. Protsessstin' baslanıwı ushın sistemanı sırttan bolatug'ın ta'sirdin' sebebinen ten' salmaqlıq haldan shıǵ'arıw kerek, yag'nıy sırtqı parametrlr menen qorshap turg'an ortalıqtın' temperaturasın o'zgertiw kerek. Kvazistatikalıq protsestin' 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 ileallastırılǵ'an protsess alınadı. Usınday protsessstin' ja'rdeminde da'slepki A halınan pu'tkilley alıs bolǵ'an V halına sistemanı o'tkeriwge, sonın' menen birge sistemanı V halınan A halına qaytadan o'tkeriw mu'mkin. Usınday jollar menen aylanbalı protsess alamız. Al **qa'legen kvazistatikalıq aylanbalı protsess tuwrı bag'ıtta da, keri bag'ıtta 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'salmaqlıq emes hallar arqalı o'tiw menen ju'zege keledi.

§ 2-17. Jıllılıq sıyımlılıg'ı

Jıllılıq sıyımlılıg'ı. Ishki energiya hal funktsiyası sıpatında. Ko'lem turaqlı bolg'andag'ı jıllılıq sıyımlılıg'ı. Basım turaqlı bolg'andag'ı jıllılıq sıyımlılıg'ı. Jıllılıq sıyımlılıqları arasındag'ı baylanıs. Ideal gaz jıllılıq sıyımlılıg'ı teoriyasının' eksperimentke sa'ykes kelmewi.

Anıqlama. Denege δQ jıllılıg'ı berilse onın' temperaturası dT shamasına o'zgeredi.

$$C = \frac{\delta Q}{dT} \quad (17-1)$$

shaması **jıllılıq sıyımlılıg'ı** dep ataladı. Jıllılıq sıyımlılıg'ı denenin' temperaturasın 1 K ge ko'teriw ushın kerek bolatug'ın jıllılıq mug'darı menen o'lishenedi. Jıllılıq sıyımlılıg'ı denenin' massasına baylanıslı. Denenin' massa birligine sa'ykes keletug'ın jıllılıq sıyımlılıg'ı **salıstırmalı jıllılıq sıyımlılıg'ı** dep ataladı. Zattın' molekularının' 1 molın alg'an a'dewir qolaylı boladı. Bunday jıllılıq sıyımlılıg'ı mollık jıllılıq sıyımlılıg'ı dep ataladı.

Jıllılıq sıyımlılıg'ı denege jıllılıq beriw ha'm onın' temperaturasının' o'zgeriw jag'dayların' o'zgesheligine g'a'rezli.

Mısalı, eger gazge δQ 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 gazdin' jıllılıq sıyımlılıg'ı u'lken boladı. Demek jıllılıq sıyımlılıg'ı anıq ma'niske iye bolmay, qa'legen ma'nisti qabıl etiwı mu'mkin. Sonlıqtan (17-1) boyınsha esaplang'an jıllılıq sıyımlılıg'ı, usı jıllılıq sıyımlılıg'ı qanday jag'daylarda aling'anlıg'ın qosa aytıw kerek.

Ishki energiya hal funktsiyası sıpatında. Ishki energiyanın' anıqlamasınan onın' sistemanın' qa'legen halında belgili bir ma'niske iye bolatug'ınlıg'ı ko'rinedi. Bul

ishki energiya U dın' hal funktsiyası, al dU dın' tolıq differentsial ekenligin

ko'rsetedi. Usıg'an baylanıslı biz bunnan bilay

eger sheksiz kishi shama tolıq differentsial bolsa, onda sa'ykes funktsiya hal funktsiyası bolıp tabıladı

degen anıqlamanı bassılıqqa alamız. V , r ha'm T shamaları sistemanın' qa'legen hallarında anıq ma'nislerge iye boladı ha'm bul haldı ta'ripleydi. Sonlıqtan dV , dr ha'm dT lar tolıq differentsiallar bolıp tabıladı.

Turaqlı ko'lemdegi jıllıq sıyımlılıg'ı. Bul jıllılıq sıyımlılıg'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 $\delta Q = dU + r dV$ bılay jazıladı:

$$(\delta Q)_V = dU \quad (17-3)$$

Bul an'latpa $V = \text{const}$ bolg'anda δQ dın' tolıq differentsial bolatug'ınlıg'ınan derek beredi, al

$$C_V = (dU/dT)_V. \quad (17-4)$$

Bunnan C_V nın' hal funktsiyası ekenligi kelip shıg'adı. Bul jag'day jıllılıq sıyımlılıg'ının' a'hmiyetin sa'wlendiredi.

Turaqlı basımdag'ı jıllılıq sıyımlılıg'ı. $r = \text{const}$ bolg'anda termodinamikanın' birinshi baslaması bılay jazıladı:

$$(\delta Q)_r = dU + (r dV)_r = d(U + rV). \quad (17-5)$$

Bul $(\delta Q)_r$ nın' tolıq differentsial ekenligin bildiredi, al

$$C_p = \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_p \quad (17-6)$$

hal funktsiyası bolıp tabıladı. (16-5) ke kiriwshi

$$H = U + pV \quad (17-7)$$

funktsiyası **entalpiya** dep ataladı. Entalpiya da hal funktsiyası bolıp tabıladı. Sonlıqtan (17-6) dag'ı S_r ushın an'latpanı bılay o'zgerge alamız:

$$C_p = \left(\frac{dH}{dT} \right)_p. \quad (17-8)$$

Jıllılıq sıyımlılıqları arasındag'ı baylanıs. Biz qarap atırğ'an termodinamikalıq sistemalar u'sh makroskopiyalıq parametrler r , V ha'm T menen ta'riplenedi. Olar bir birinen g'a'rezsiz ha'm hal **ten'lemeleri ja'rdeminde** baylanısqa. Ideal gaz ushın hal ten'lemesi $rV_m = RT$ ten'ligi menen beriledi. Iqtıyarlı 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:

$$r = r(T, V). \quad (17-9)$$

Sonın' menen birge qaysı o'zgermeli g'a'rezsiz sıpatında qaralıwına baylanıslı $T = T(p, V)$, $V = V(r, T)$ 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 $\delta Q = dU + r dV$ 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) S_V ushın (17-4) ke aylanadı. $r = \text{const}$ jag'dayında turaqlı basımdag'ı jıllılıq sıyımlılıg'ı an'latpasın alamız:

$$C_p = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V + \left[p + \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T \right] \left(\frac{dV}{dT} \right)_p = C_V + \left[p + \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T \right] \left(\frac{dV}{dT} \right)_p. \quad (17-13)$$

Demek $\delta 1$ ushın jazılg'an (17-11) bılay jazılıwı mu'mkin:

$$\delta Q = C_V dT + \left[p + \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T \right] dV. \quad (17-14)$$

Ideal gazdin' jıllılıq sıyımlılıqları 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:

$$V = RT/r. \quad (17-15)$$

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 $c_r = C_r/M$, $c_v = C_v/M$, $R_0 = R/M$ = salıstırmalı gaz turaqlısı.

İdeal gazdin' jıllılıq sıyımlılıg'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 baylanısı (17-4) ha'm (17-17a) formulalarınan

$$C_v = \frac{i}{2} R, \quad C_p = \frac{i+2}{2} R. \quad (16-19)$$

**Tiykarg'ı
juwmaqlar:**

Jıllılıq sıyımlılıg'ı ulıwma jag'daylarda denenin' qa'siyetin ta'riplemeydi. Ol dene menen usı denenin' temperaturasınıń o'zgeretug'ın sharayatlarınan' ta'riplemesi bolıp tabıladı. Sonlıqtan jıllılıq sıyımlılıg'ı anıq ma'niske iye bolmaydı. Eger denenin' temperaturasınıń o'zgeriw sharayatları anıqlanıp alınsa jıllılıq sıyımlılıg'ı denenin' qa'siyetinin' ta'riplemesine aylanadı ha'm anıq sanlıq ma'niske iye boladı. Usınday jıllılıq sıyımlılıqlarının' ma'nisleri kestelerde keltiriledi. Usı jıllılıq sıyımlılıqlarının' en' a'hmiyetlileri turaqlı basım menen turaqlı ko'lemde alıng'an jıllılıq sıyımlılıqları bolıp tabıladı. Jıllılıq sıyımlılıg'ı protsesstin' xarakterine baylanısı ha'm shaması sheksiz u'lken teris ma'nisten sheksiz u'lken on' ma'niske shekem o'zgeriwı mu'mkin.

Turaqlı basımdag'ı ha'm turaqlı ko'lemdegi jıllılıq sıyımlılıg'ı hal funktsiyası bolıp tabıladı.

Gazdin' jıllılıq sıyımlılıg'ının' temperaturadan g'a'rezsizligi ta'jiriybede tastıyqlanbaydı. Bug'an molekullıq vodorod penen o'tkerilgen ta'jiriybeler da'lil bola aladı.

İdeal gaz jıllılıq sıyımlılıg'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 atımlı birqansha gazler ushın (vodorod, azot, kislorod ha'm basqalar) o'jire temperaturalarında jaqsı sa'ykes keledi. Olar ushın jıllılıq sıyımlılıg'ı $C_v = \frac{3}{2} R$ shamasına ju'da' jaqın.

Biraq eki atomlı Cl_2 ushın jıllılıq sıyımlılıg'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 S_v yamasa $\frac{5}{2} R$ ge yaki $\frac{7}{2} R$ ge ten' bolıwı kerek).

U'sh atomlı molekullarda bolsa teoriyag'a sa'ykes kelmewshilik sistemalı tu'rde baqlanadı.

Mısal retinde molekullıq vodorodtı qaraymız. Vodorod molekulası eki atomnan turadı. Jetkilikli da'rejede siyrekletilgen vodorod gazi qa'siyeti boyınsha ideal gazdin' qa'siyetine ju'da' jaqın. Eki

atomli gaz ushin joqarida aytilg'anday $C_v \frac{5}{2} R$ ge yaki $\frac{7}{2} R$ ge ten' ha'm temperaturadan g'a'rezsiz bolıwı kerek. Al

Haqiqatında ta'jiriybe molekullıq vodorodtın' jıllılıq sıyımlılıg'ının' temperaturag'a baylanıslı ekenligin ko'rsetedi: to'mengi temperaturalarda (50 K shamasında) onın' jıllılıq sıyımlılıg'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 qosılq'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 qollanılg'an, sonday-aq shın ma'nisinde erkinlik da'rejesi emes, al sol erkinlik da'rejesine sa'ykes keliwshi qozg'alıs qozadı).

Biraq bir rejimnen ekinshi rejimge o'tiw (demek jan'a erkinlik da'rejelerinin' iske tu'siwi na'zerde tutilmaqta) 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 molekullardın' bir rejimnen ekinshi rejimge o'tiw mu'mkinshiligi payda boladı. Biraq bul rejimge barlıq molekullar birden o'tpeydi. Temperaturanın' joqarılawı menen jan'a rejimge o'tken molekullardın' sanı artadı. Sonlıqtan jıllılıq sıyımlılıg'ı iymekligi u'zliksiz tu'rde o'zgeredi (su'wrette ko'rsetilgen).

Molekulalıq vodorodtın' jıllılıq sıyımlılıg'ının' temperaturag'a g'a'rezlıligin sapalıq jaqtan tu'sindiriw. Iye bolatug'ın energiyalarının' diskretlıligi mikrobo'lekshelerdin' qozg'alısının' tiyqarg'ı o'zgesheligi bolıp tabıladı. Bo'lekshe qozg'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 qozg'alıwshı bo'lekshelerdin' energiya spektrin u'zliksiz dep esaplaw mu'mkin (biraq bunday jag'daylarda da diskretlılıq saqlanadı). Spekr a'meliy jaqtan derlik u'zliksiz bolg'an basqa jag'day - energiyanın' ma'nisi u'lken bolg'anda orın aladı. Bunday jag'dayda energiya qa'ddileri arasındag'ı qashıqlıq energiyanın' o'zinin' ma'nisine qarag'anda esapqa almay kishi boladı. Bo'lekshenin' energiyasının' diskret spektri kvant mexanikasının' qozg'alıs ten'lemelerin sheshiw arqalı alınadı.

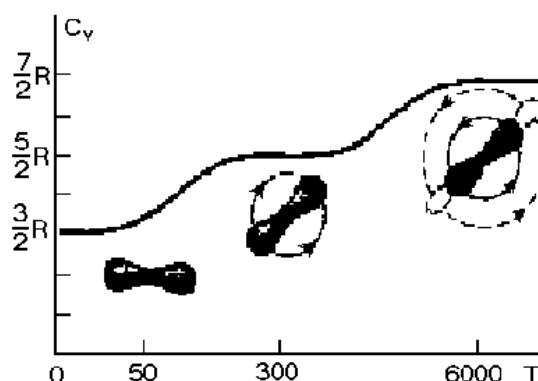
Biz ha'zir vodorodtın' eki atomli molekulası ushin sheshimnin' na'tiyjesin qaraymız.

Molekulanın' ilgerilemeli qozg'alısına sa'ykes keliwshi energiya u'zliksiz o'zgeredi dep esaplaymız. Sebebi siyrekletilgen gazdin' moli ushin qozg'alıs aymag'ı jetkilikli da'rejede u'lken. Aylanbalı ha'm terbelmeli qozg'alıs energiyaları kvantlang'an, yag'nıy bunday qozg'alıslar 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 qozg'alıs nızamı orın aladı. Nolinshi qa'ddinin' u'stinde bir birinen $\partial\omega$ qashıqlıqta turg'an molekulanın' energiya qa'ddileri jaylasadı.



2-13 su'wret. Molekulalıq vodorod ushın C_v nın' T g'a g'a rezliligi (eksperimenttin' na'tiyjesi)

Molekulanın' aylanıwına sa'ykes keliwshi energiyanın' shaması terbeliske sa'ykes keliwshi energiyanın' shamasınan shama menen 100 esedey kishi. Basqa so'z benen aytqanda aylanıw qozg'alısı terbeliske salıstırg'anda a'dewir a'stelik penen ju'redi. Vodorod molekulasının' aylanbalı qozg'alısına sa'ykes keliwshi energiya spektri to'mendegidey tu'rge iye boladı:

$$E_n = q_1 n(n+1).$$

Bul jerde $q_1 = \hbar^2 / (2J_0)$; J_0 aylanıw ko'sherine salıstırg'andag'ı molekulanın' inertsiya momenti (eki atomlı molekula ushın ko'sherlerge salıstırg'andag'ı momentler birdey shama g'a ten' boladı).

Quramındag'ı yadrolardıń (vodorod atomının' yadrosının' bir protonnan turatug'inlig'in eske tu'siremez) menshikli momentlerinin' (spinin') 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 molekulaların' sanı ulıwma molekulalar sanının' $1/4$ in, al ortovodorodtın' molekulaların' 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 molekulaları 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 energiyları 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 energiya (terbelistin' nollik energiya) ha'm en' kishi aylanıs energiya menen qozg'aladı (paravodorod ushın aylanıw minimallıq aylanıw energiya $E_0=0$, 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 sıyımlılıg'ı $(3/2)kT$ ge ten'. Temperatura ko'terilgende ilgerilemeli qozg'alıs energiya aylanıw qa'ddilerin' qozdırıwg'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'in temperatura

$$T_{ayl} = q_1/k = h/(2J_0k).$$

$T_{ayl} < T < T_{ter}$ (terbelis erkinlik da'rejesiiske tu'setug'ın temperaturanın' ma'nisi) temperaturalarında eki atomlı gazdin' jıllılıq sıyımlılıg'ı $\frac{5}{2}R$ ge, al T_{ter} ten joqarı temperaturalarda $\frac{7}{2}R$ ge ten'.

To'mende ayırım eki atomlı gazler ushın T_{ayl} ha'm T_{ter} temperaturaların' ma'nisleri keltirilgen:

temperatura	vodorod	Azot	kislorod
T_{avn}, K	85.5	2.86	2.09
T_{ter}, K	6410	3340	2260

Alıng'an an'latpalardı ayqın mısıl ushın qollanamız. Turaqlı basımdag'ı kislorodtın' jıllılıq sıyımlılıg'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 sıyımlılıg'ı $c_p = \frac{i+2}{2}R$. Kislorodtın' mollik massası $M = 0.032$ kg/mol. Onda salıstırmalı jıllılıq sıyımlılıg'ı

$$c_p = \frac{(i+2)R}{2M} = 798.31/(290.032) \text{ Dj}/(\text{kg} \cdot \text{K}) = 0.909 \text{ kDj}/(\text{kg} \cdot \text{K}).$$

Sorawlar:

Qanday fizikalıq talqılawdan ideal gazdin' turaqlı basımdag'ı jıllılıq sıyımlılıg'ının' turaqlı ko'lemdegi jıllılıq sıyımlılıg'ınan artıq ekenligi kelip shıg'adı?

Ulıwma jag'daylarda jıllılıq sıyımlılıg'ı molekularadın' o'z-ara ta'sir etisiwine baylanıslı bolg'an potentsial energiyag'a g'a'rezli dep ayta alamız ba?

Gazdin' jıllılıq sıyımlılıg'ı usı gaz turg'an salmaq maydanına g'a'rezli me?

§ 2-18. Ideal gazlerdegi protsessler

Ideal gazlerdegi protsessler. Izobaralıq, izoxoralıq ha'm izotermalıq protsessler. Adiabatalıq protsess. Adiabatalıq protsestege jumıs. Politroplıq protsess. Politropa ten'lemesi.

Izobaralıq protsess. Turaqlı basımda ju'retug'ın protsess izobaralıq protsess dep ataladı. (r_1, V_1) ha'm (r_2, V_2) noqatlarındag'ı temperaturalar hal ten'lemesi ja'rdeminde esaplanadı ha'm sa'ykes $T_1 = r_1 V_1/R$, $T_2 = r_2 V_2/R$. 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. r , T koordinatalarında da bul protsess tuwrı sıızıqlar menen ko'rsetiledi. Bul o'zgeriwshilerde jumıstın' an'latpası to'mendegidey bolıp jazıladi:

$$A = \int_{(1)}^{(2)} p_1 dV = \int_{(1)}^{(2)} p_1 \frac{R}{p_1} dT = R(T_2 - T_1). \quad (18-2)$$

Bul eki tu'rli etip ko'rsetiw de bir biri menen ten'dey. Bir birine o'tiw hal ten'lemeleri ja'rdeminde a'melge asırıladi.

Izobarlıq protseste gazdin' berilgen massasının' ko'lemi temperaturanın' o'zgerisine baylanışlı sızıqlı tu'rde o'zgeredi, yag'nıy

$$V_t = V_0(1 + \alpha_v t).$$

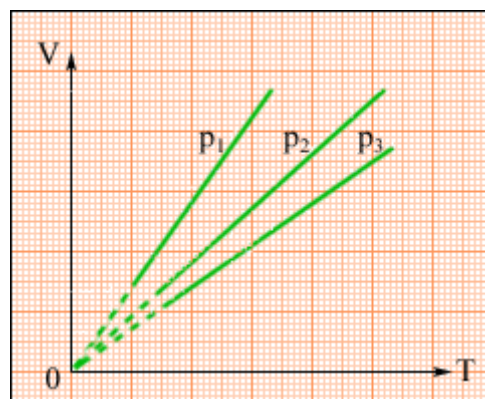
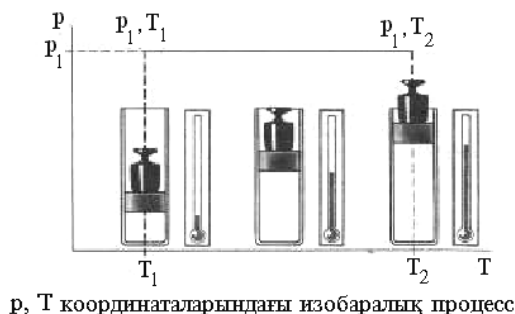
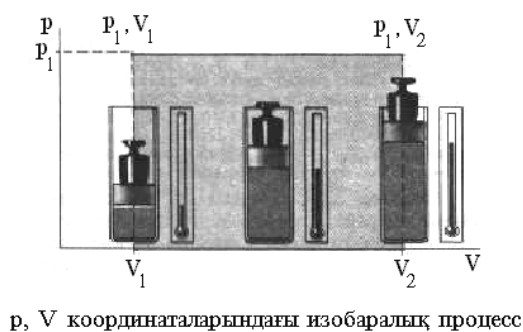
Bul formulada V_t gazdin' t temperaturadag'ı ko'lemi, V_0 gazdin' temperatura 0°S bolg'andag'ı ko'lemnin' ma'nisi, α_v proporsionallıq koeffitsient. Eksperimentler eger suwdın' eriw temperaturasın 0° , al qaynaw temperaturasın 100° dep alsaq $\alpha_v = 1/273.13^\circ = 0.0036613 \text{ grad}^{-1}$ ge ten' bolatug'inlıg'ın ko'rsetedi.

Gey-Lyussak nızamı boyınsha $t = -273.13^\circ\text{S}$ 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'inlıg'ınan derek beredi. Haqıyqatında da $t = -273.13^\circ\text{S}$ temperaturag'a shekem salqınlatılğ'anda barlıq gazler da'slep suyıqlıqqa, al keyin qattı deneg'e aylanıp ketedi ha'm bunday haldag'ı zatlar ushın Gey-Lyussak nızamı orınlanbaydı.

Izoxoralı protsess. Bul turaqlı ko'lemde ju'retug'in protsess bolıp tabıladi. $V = \text{const}$. Izoxoralı protseste islengen jumıs nolge ten', yag'nıy

$$A = \int_{(1)}^{(2)} p dV = 0. \quad (18-3)$$

Ideal gazlerde ko'lem turaqlı bolg'anda basım temperaturag'a tuwrı proporsional (Sharl nızamı). Ideal emes gazler ushın Sharl nızamı da'l orınlanbaydı. Sebebi bul jag'dayda gazge barılgen energiyanın' bir bo'legi molekular arasındağ'ı ta'sirlesiw energiyanın' o'zgeriw ushın jumısaladı.



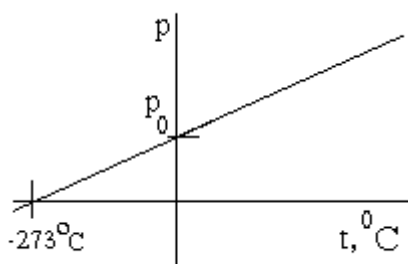
Izobaralardıń (V,T) tegisligindegi qa'siyetleri $(r_3 > r_2 > r_1)$.

2-14 su'wret.

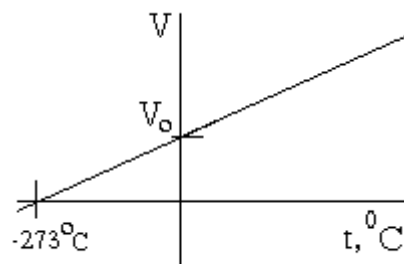
Sharl nızamı bılay jazıladı:

$$p_t = p_0(1 + \alpha_p t).$$

Bul formuladag'ı r_t gazdin' t temperaturadag'ı basımı, r_0 temperatura nolge ten' bolg'andag'ı basımı, α_r turaqlı koeffitsient. Eger suwdın' eriw temperaturasın 0^0 , al qaynaw temperaturasın 100^0 dep alsaq $\alpha_r = 1/273.13^0 = 0.0036613 \text{ grad}^{-1}$ ge ten' boladı.



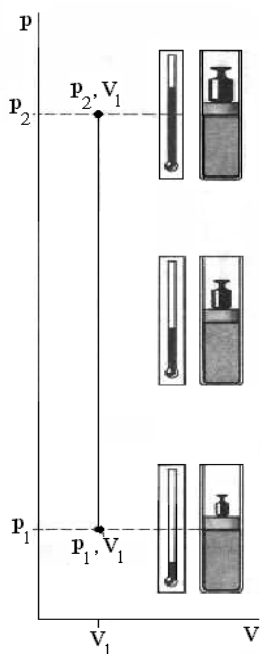
2-15 su'wret. Sharl nızamı grafıgı



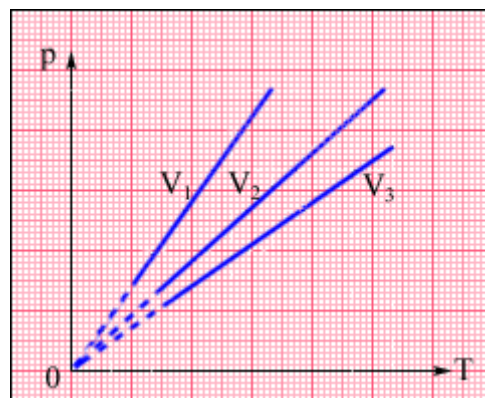
2-16 su'wret. Gey-Lyussak nızamı grafıgı

Sharl nızamı boyınsha $t = -273.13^0\text{S}$ 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 $t = -273.13^0\text{S}$ 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 aling'an temperaturalar shakalasında $\alpha_v = \alpha_r = 1/273.13^0 = 0.0036613 \text{ grad}^{-1}$ ekenligi ko'rinip tur. Al to'mende Tselsiya shkalası menen temperaturalardıq absolyut termodinamikalıq shkalası arasında $0 \text{ K} = 273.13^0\text{S}$ baylanısın' bar ekenligi da'lillenedi.



2-17 su'wret. r, V koordinatalarındag'ı izoxoralıq protsess.



(r, T) tegisligindeki izoxoralardıń qa'siyetleri ($V_3 > V_2 > V_1$).

Izotermalıq protsess. Bul protsess turaqlı temperaturada ju'redi. $T = \text{const}$. Jumıs:

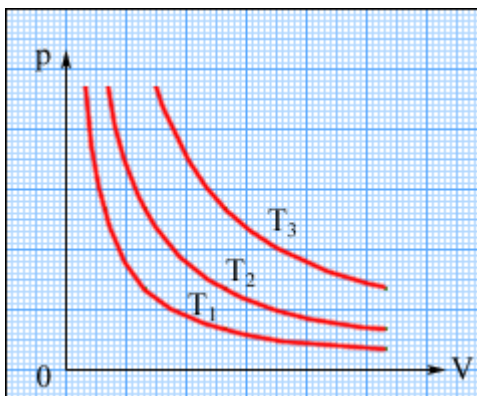
$$A = \int_{(1)}^{(2)} p dV = RT \int_{(1)}^{(2)} \frac{dV}{V} = RT \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right). \quad (18-4)$$

Temperatura o'zgarmegenlikten bul protseste ideal gazdin' ishki energiyası o'zgarmeydi. Sonlıqtan izotermalıq protseste sistemag'a berilgen jıllılıq tolıg'ı menen jumıs islewge jumsaladı.

Temperatura turaqlı bolg'anda gazdin' berilgen massasının' 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'rında ten' qaptallı giperbola menen su'wretlenedi (su'wrette ko'rsetilgen). Bul sıziqtı **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'ınadı. Al basım 1000 at bolg'anda, mısalı, azot ushın bul nızamnan awıttıq 2 esege barabar boladı.



(p,V) tegisligindeki izotremalardıń semeystvosı
($T_3 > T_2 > T_1$)

Adiabatalıq protsess. Bul protseste sırtqı ortalıq penen **jıllılıq 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 qısılğ'anda gaz u'stinen islengen jumıs gazdin' ishki energiyasın arttırıw ushın jumsaladı.

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 $R = C_p - C_v$ paydalanılǵ'an.

(18-5) ti $C_v T$ g'a bo'lip ha'm $\gamma = C_p / C_v$ dep belgilep (γ -adiabata ko'rsetkishi dep ataladı) tabamız:

$$dT/T + (\gamma - 1) * dV/V. \quad (18-7)$$

Bul ten'lemeni integrallap ha'm potentsiallap tabamız:

$$TV^{\gamma-1} = \text{const}. \quad (18-8)$$

r 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:

$$A = \frac{R(T_1 - T_2)}{\gamma - 1}. \quad (18-11)$$

Politropalıq protsess. Joqarıda keltirilgen barlıq protsessler ulıwmalıq ayırmashılıqqa iye - olardıń barlıg'ında da jıllılıq sıyımlılıg'ı turaqlı bolıp qaladı. Izoxoralıq ha'm izobaralıq protsesler jıllılıq sıyımlılıqları sa'ykes C_v ha'm C_p g'a ten'. Izotermalıq protseste ($dT = 0$) jıllılıq sıyımlılıg'ı $\pm\infty$ ge ten'. Al adiabatalıq protseste jıllılıq sıyımlılıg'ı nolge ten'.

Jıllılıq sıyımlılıg'ı turaqlı bolıp qalatug'ın protsess **politrop protsess** dep ataladı. Izobaralıq, izoxoralıq, izotermalıq ha'm adiabatalıq protsessler politropalıq protsesstin' dara ko'rınisleri bolıp tabıladı. Politrop protsesstin' grafikalıq su'wreti bolg'an iymeklik **politropa** dep ataladı.

Jıllılıq sıyımlılıg'ı C nın' turaqlı bolıp qalıwı ushın termodinamikanın' birinshi baslaması to'mendegidey tu'rge iye bolıwı kerek:

$$CdT = C_v dT + p dV. \quad (18-12)$$

(18-7) ni alıw ushın (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) ti 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'zgermelilerindegi *politropa ten'lemesi* dep ataladı. Bul ten'lemeden $T = pV/R$ formulasınan T ni jog'altıp

$$pV^n = \text{const} \quad (18-15)$$

ten'lemesin alamız. Bul jerde $n = \frac{C - C_p}{C - C_v}$ *politropa ko'rsetkishi* dep ataladı.

$C = 0$ ha'm $\gamma = n$ de (18-15) ten adiabatlıq, $C = \infty$, $n = 1$ de izotermalıq, $C = C_p$, $n = 0$ de izobaralıq, $C = C_v$, $n = \pm\infty$ de izoxoralıq protsessler ten'lemeleri alınadı.

$n > 1$ bolg'an jag'daylarda qısılg'anda ideal gaz qızadı, al $n < 1$ de qısılıw protsessinde ideal gaz salqınlaydı. Haqıyqatında da (18-14) den $n > 1$ de ko'lem kishireygende T nın' artatug'ınılg'ı, al $n < 1$ de (da'reje ko'rsetkishi teris ma'niske iye ha'm sonlıqtan on' da'rejege iye V bo'lshektin' bo'limine tu'sedi) V nın' kemeyiwı menen T nın' da kemeyetug'ınılg'ı ko'rinip tur.

Endi misallar keltiremiz.

1. Da'slepki temperaturası $T_0 = 400$ K, ko'lemi $V_0 = 10$ l bolg'an geliy adiabatlıq rejimde keneytileği. Na'tiyjede onın' basımı $r_0 = 5 \cdot 10^6$ Pa dan $r = 2 \cdot 10^5$ Pa g'a shekem kishireyedi. Geliydin' aqırg'ı ko'lemi menen temperaturasın anıqlan'ız.

Adiabatlıq ken'eyiw ushın mınag'an iyemiz:

$$pV^\gamma = p_0 V_0^\gamma.$$

Bul jerde geliy ushın $\gamma = S_r/S_v = 5/3 = 1,66$. Bunnan aqırg'ı ko'lem bılayınsha anıqlanadı:

$$V = \frac{p_0}{p} V_0^\gamma = (25)^{0,6} \cdot 10 \text{ л} = 69 \text{ л}.$$

Baslang'ısh ha'm aqırg'ı hallar ushın ideal gazdin' ten'lemesin jazıp

$$r_0 V_0 = \nu RT, \quad r V = \nu RT$$

ekenligine iye bolamız. Bul ten'lemelerdin' shep ha'm on' ta'replerin 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.

2. Eki atomlı ideal gazdegi ken'eyiw ko'rsetkishi $n = 1.32$ bolg'an politropa boyınsha a'melge asadı. Bunday jag'daydag'ı gaz ta'repinen islengen jumıstın' jutılǵ'an jıllılıqtın' mug'darina qatnasın tabamız.

S nı s_V arqalı an'latıw arqalı $s_r/s_V = \gamma$, $n = (s-s_r)/(s-s_V)$, sonlıqtan $\gamma = 1.4$ ekenligin esapqa alıp

$$s(n)/s_V = (n-\gamma)/(n-1)$$

qatnasın an'sat alıwg'a boladı. $\gamma = 1.4$ bolg'anlıqtan

$$s/s_V = -1/R.$$

$TV^{0.32} = \text{const}$ ten'lemesinen $\Delta T < 0$ ekenligine iye bolamız. Sonlıqtan bul jag'dayda ishki energiya kishireydi ha'm

$$|\Delta U|/4 = R, A = Q - \Delta U = 5Q, \text{ yag'nıy } A/Q = 5$$

ekenligine iye bolamız.

Demek bul jag'dayda gaz jutılǵ'an jıllılıqqa qarag'anda bes ese artıq jumıs isleydi. Jumıstın' bashı bo'legi gazdin' ishki energiyasının' kemeyiwiniń esabınan islenedi.

2. Endi gazlerdegi sestin' tezligin anıqlayıq.

Mexanikada gazlerdegi ss tolqınlarının' tarqalıw tezligi ushın to'mendegidey formula alınadı:

$$c = \sqrt{\frac{dP}{d\rho}}.$$

Bul jerde ρ arqalı gazdin' tıǵ'ızlıǵ'ı belgilengen. Basım R bolsa tıǵ'ızlıq ρ penen temperatura T g'a da baylanıslı bolg'anlıqtan $\frac{dP}{d\rho}$ tuwındısın qanday ma'niste tu'siniwimiz kerek degen soraw kelip

shıǵ'adı. Nyuton basım tıǵ'ızlıq penen Boyle-Mariot nızamı boyınsha $R/\rho = \text{const}$ tu'rinde baylanısqan dep esapladı. Demek ses tolqınındag'ı qısılg'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 μ arqalı gazdin' molekualıq salmag'ı belgilengen. s_N degi N indeksi sestin' tezliginiń Nyuton formulası menen anıqlang'anlıǵ'ın bildiredi. Hawa ushın $\mu = 28.8$, $T = 273 \text{ K}$ bolg'anda $c_N = 280 \text{ m/s}$, al ta'jiriybe bolsa $s = 330 \text{ m/s}$ ekenligin beredi.

Bunday ayırmanın' orın alıwı Laplas (1749-1827) ta'repinen saplastırıldı. Ol gazde ses tolqını tarqalg'anda jıllılıq o'tkizgishliktin' ta'sirinin' bolmaytug'ınlıg'ın, sonlıqtan jıllılıq almasıwının' orın almaytug'ınlıg'ın ko'rsetti. Sonlıqtan gazlerdegi ses tolqınların' taralıwı adiabatalıq protsess bolıp esaplanadı (Nyuton boyınsha izotremalıq protsess ekenligin esletip o'temiz). Bunday jag'daylarda $\gamma R dV + V dR = 0$ adiabata ten'lemesinen paydalanamız. Bul ten'lemege ko'lem V nın' ornına tıg'ızlıq $\rho \sim 1/V$ nı paydalansaq

$$\gamma P d\rho - \rho dP = 0.$$

Bunnan adaabatalıq 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

$$s_1 = 280 \sqrt{1.4} \text{ m/s} = 330 \text{ m/s}$$

ha'm bul shama ta'jiriybede alıng'an shamag'a sa'ykes keledi.

C_1 din' c_N ge qatnasının' $\sqrt{\gamma}$ g'a ten' ekenligi joqarıda ko'rınip tur. Sonlıqtan

$$\gamma = (s/s_N)^2 = (s_1/s_N)^2.$$

Bul formula γ nı eksperimentte anıqlaw ushın tiykar bola aladı.

Gazdegi protsesslerdin' ju'riwi sa'ykes sırtqı sharayatlardıń jaratılıwı menen ta'miyinlenedi. Bunday jag'dayda gazdi ten'salmaqlıq hallar arqalı izbe-iz o'tiwge ma'jbu'rleybiz dep ayta alamız. O'z-o'zine qoyılǵ'an 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.

§ 2-19. Ideal gaz entropiyası

Ideal gaz entropiyası. Entropiyanın' fizikalıq ma'nisi. Ideal gazler protseslerindegi entropiyanın' o'zgerisin esaplaw.

Termodinamikanın' birinshi baslaması an'latpasının' eki ta'repine de T g'a bo'lip alamız:

$$\frac{\delta Q}{T} = S_V \frac{dT}{T} + \frac{p}{T} dT. \quad (19-1)$$

$dT/T = d \ln T$, $dV/V = d \ln V$ ekenligi esapqa alıp ha'm joqarıdag'ı ten'lemege $r/T = R/V$ 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 torliq differentzial. Demek shep ta'repi $\frac{\delta Q}{T}$ de toliq differentzial bolip tabiladi. Differentzial $\frac{\delta Q}{T}$ bolip tabilatug'in hal funktsiyasi entropiya dep ataladi ha'm S belgisi menen belgilenedi. Solay etip

$$dS = \frac{\delta Q}{T}. \quad (19-3)$$

Ten' salmaqli emes, qaytimsiz protsessler ushın dS ti δQ 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'i esaplawg'a boladi. 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 boladi. Ayırım hallardag'ı entropiyanın' ma'nisin sha'rtli tu'rde nolge ten' dep alıw qabıl etilgen. Bunday jag'dayda entropiya an'latpasın integrallawdan kelip shıg'atug'in iqtıyarlı turaqlının' ma'nisin anıqlap alıw mu'mkin.

Absolyut temperatura T g'a bo'lingen sistema ta'repinen aling'an jıllılıq mug'darın a'dette ***keltirilgen jıllılıq mug'darı*** dep ataydı. $\delta Q/T$ sheksiz kishi protsesste aling'an elementar keltirilgen jıllılıq mug'darı, al $\int \frac{\delta Q}{T}$ integralı bolsa shekli protsesste aling'an ***keltirilgen jıllılıq mug'darı*** dep ataladı.

Qa'legen kvazistatikalıq aylanbalı protsesste sistema ta'repinen alinatug'in ***keltirilgen jıllılıq mug'darı*** nolge ten'. Usınday anıqlamag'a ekvivalent bolg'an anıqlama bılayınsha aytiladı:

Sistema ta'repinen kvazistatikalıq jol menen aling'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 tabiladı. Anıqlama boyınsha ten' salmaqli 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

$$S_1 - S_2 = \int_{1 \rightarrow 2} \frac{\delta Q}{T}.$$

Solay etip anıqlama boyınsha

$$S = \int_{KBCT} \frac{\delta Q}{T}.$$

Bul jerde integral sistemani sha'rtli tu'rde da'slepki hal dep atalatug'in haldan biz qarap atirg'an halg'a o'tkeretug'in iqtiyarlı kvazistatikalıq protsess ushın alıadı. S tin' differentsialı ushın

$$dS = \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{KBCT}$$

an'latpasına iye bolamız. δQ dın' qanday da bir funktsiyanın' differentsialı emes ekenligin atap o'tilgen edi. Biraq $dS = \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{KBCT}$ formulası sistema ta'repinen kvazistatikalıq jol menen alıng'an δQ jıllılıg'ı T g'a bo'lingennen keyin hal funktsiyası - entropiyanın' tolıq differentsialına aylanadı.

Mısal retinde ideal gaz molekularının' bir molinin' entropiyanın esaplaymız.

Ideal gaz qatnasatug'in sheksiz kishi kvazistatikalıq protsess ushın

$$\delta Q = S_V dT + R dV = S_V(T) dT + RT \frac{dV}{V}$$

an'latpasın jazamız.

Bunnan

$$dS = \frac{\delta Q}{T} = S_V(T) \frac{dT}{T} + R \frac{dV}{V},$$

$$S = \int S_V(T) \frac{dT}{T} + R \ln V.$$

Eger jıllılıq sıyımlılıg'ı S_V temperaturadan g'a'rezsiz bolsa an'latpa jen'il integrallanadı:

$$S = S_V \ln T + R \ln V + \text{const.}$$

Eger gazdin' v moli bolsa

$$S = v S_V \ln T + v R \ln V + \text{const.}$$

Bul an'latpa alıng'anda gazdegi molekular 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 turaqlını anıqlag'anda entropiya S ti bo'leksheler sanına (yamasa moller sanı v ge) proporsional etip alıw kerek. Bul sha'rtke to'mendegidey an'latpa sa'ykes keledi:

$$S = v[S_V \ln T + R \ln (V/v) + \text{const}]$$

yamasa

$$S = \frac{N}{N_{AB}} [S_V \ln T + R \ln (V/N) + \text{const}].$$

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 tabılatur'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 tabıladi. 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

$$\int_{(1)}^{(2)} dS = R \int_{(1)}^{(2)} d \ln V. \quad (19-5)$$

Integrallawdan keyin

$$S_2 - S_1 = R(\ln V_2 - \ln V_1) = R \ln(V_2/V_1). \quad (19-6)$$

Bul formulanı bunnan bılay tu'rlandiriw ushın ten' salmaqlıq haldag'ı gaz iyelep turg'an ko'lem menen ken'isliktegi mikrohallar sanı arasındag'ı baylanıştı paydalanıw kerek. Bul baylanıs (5-6) formulası $\{\Gamma_0 = N!/(N-n)!\}$ menen beriledi. 1 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:

$$G_{01} = N_1!/(N_1 - N_A)!, \quad G_{02} = N_2!/(N_2 - N_A)!. \quad (19-7)$$

Bul jerde $N_1 = V_1/l^3$, $N_2 = V_2/l^3$, $l = 10^{-10}$ m. Sonlıqtan (5-11) Stirling formulasın paydalanıp

$$G_{02}/G_{01} = \frac{N_2!/(N_1 - N_A)!}{N_1!/(N_2 - N_A)!} * \frac{(N_2/e)^{N_2} [(N_1 - N_A)/e]^{N_1 - N_A}}{(N_1/e)^{N_1} [(N_2 - N_A)/e]^{N_2 - N_A}}. \quad (19-8)$$

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:

$$G_{02}/G_{01} * \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^{N_A} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{N_A}. \quad (19-9)$$

(19-9) dı logarifmlese

$$\ln(V_2/V_1) = (R/N_A) \ln(G_{02}/G_{01}). \quad (19-10)$$

Bul an'latpanı (18-6) g'a qoysaq

$$S_2 - S_1 = (R/N_A) \ln(G_{02}/G_{01}) = k \ln G_{02} - k \ln G_{01}, \quad (19-11)$$

bul jerde $R/N_A = k$ - Boltsman turaqlısı.

(19-11) formulasının' tu'ri minaday pikirdin' tuwılıwına alıp keledi:

Entropiya qarap atırg'an makrohaldı payda etetug'ın mikrohalla sanının' logarifmi menen anıqlanadı:

$$S = k \ln G. \quad (19-12)$$

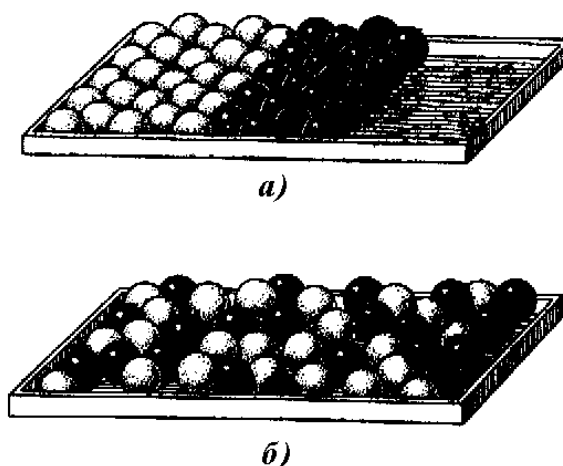
Bul ten'lik Boltsman formulası dep ataladı.

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'rtipke salıng'an bolsa, makrohaldı payda etetug'ın mikrohalla sanı sonshama da'rejede az boladı. Demek entropiya sistemanın' ta'rtipke salınıwının' o'lishemi bolıp tabıladı. Sistema ten' salmaqlıq halg'a kelgende entropiya o'zinin' maksimum ma'nisine jetedi.

Demek o'z-o'zine qoyılğ'an sistema ten' salmaqlıq halına qaray qozg'aladı, yag'nıy o'z-o'zine qoyılğ'an sistemada entropiyanın' ma'nisi kemeymeydi. Bul termodinamikanın' ekinshi baslamasının' anıqlamaların' biri bolıp tabıladı.



2-18 su'wret. Ta'rtip penen ta'rtipsizlik arasındag'ı qaytımsızlıqtı sa'wlelendiretug'ın su'wret.

Entropiya menen sistemadag'ı ta'rtipsizliktin' baylanısı haqqında birqansha mısallar keltiremiz.

Mexanikalıq energiyanı jıllılıq energiyasına aylandırıw ta'rtpılı qozg'alıs energiyasın ta'rtipsiz qozalıs energiyasına aylandırıw bolıp tabıladı. Bir birine qarama-qarsı bolğ'an bul eki protsesstin' ten'dey huqıqqa iye emes ekenligin an'sat tu'siniwge boladı. Ta'rtpılı qozg'alıs energiyasın ta'rtipsiz qozg'alıs energiyasına aylandırıw ta'rtipsiz qozg'alıs energiyasın ta'rtpılı ozg'alıs energiyasına aylandırıwdan salıstırmas da'rejede jen'il.

Kelesi mısıl 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 silkseş sharikler aralasıp ketedi. Qutını a'ıwayı sikiw shariklerdi tolıq ta'rtipsizlikke alıp keldi. Biraq usınday silkiw menen shariklerdin' jayg'asıwlarındag'ı ta'rtpılı qayta tikley almaymız.

Bunday o'zine ta'n qaytimsizliq qa'legen molekulaliq sistemada aniq ko'rinedi.

Ushu qubilis penen jilliliq protsesslardin' qaytimsizlig'i baylanisli: bunday protsessler ta'rtipsizliklardin' artiw bag'itinda ju'redi. Demek jilliliq protsesslerinin' qaytimsizlig'i ta'rtip penen ta'rtipsizliktin' qaytimsizlig'i menen tikkeley baylanisli eken dep juwmaq shig'aramiz.

Ideal gaz protseslerindeki entropiyanin' o'zgeriwin esaplaw. Esaplaw (19-3) ti esapqa aliw menen (19-2) tiykarinda ju'rgiziledi:

$$dS = d(S_V \ln T + R \ln V). \quad (19-13)$$

Izotermalik protseste entropiyanin' o'zgerisi (19-6) formulasi ja'rdeminde a'melge asiriladi. Ko'lem u'lkeygende entropiya o'sedi, kishireygende - kemeyedi. Bul na'tiyjeni an'sat tu'siniwge boladi: ko'lem u'lkeygende bo'leksheler ushin orinlar, demek mikrohallar sanı ko'beyedi.

Izoxoralı protseste ($dV=0$)

$$S_2 - S_1 = S_V \ln(T_2/T_1) \quad (19-14)$$

temperaturanın' o'siwi menen entropiya u'lkeyedi. Bul na'tiyje bilayınsha tu'sindiriledi: temperatura ko'terilgende bo'lekshelerdin' ortasha energiyasi o'sedi, sonliqtan mu'mkin bolg'an energiyaliq hallar sanı artadi.

Adiabatalıq protseste (19-13) ten alamız

$$S_2 - S_1 = S_V \ln(T_2/T_1) + R \ln \frac{V_2}{V_1}. \quad (19-15)$$

Sonın' menen birge

$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1}, \quad \gamma = \frac{C_p}{C_v}.$$

Sonliqtan $\ln(T_2/T_1) = (\gamma-1) \ln \frac{V_1}{V_2} = -(\gamma-1) \ln \frac{V_2}{V_1}$. Onda (19-15) mına tu'rge keledi ($-S_r + S_v + R = 0$ ekenligi esapqa alınadı):

$$S_2 - S_1 = \{-S_v[(\frac{C_p}{C_v} - 1) + R] \ln \frac{V_2}{V_1} = 0. \quad (19-16)$$

Demek adiabatalıq qaytimlı protseste entropiya o'zgermeydi.

Gazdin' adiabatalıq ken'eyiwinde ko'lemnin' u'lkeyiwine baylanisli entropiya o'sedi, biraq ushin' menen qatar baqlanatu'g'ın temperaturanı to'menlewi saldarınan entropiya kemeyedi ha'm usı eki tendentsiya bir birin tolig'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 entropiyaların' qosındısına ten'.

Sistemanın' entropiyası qanday da bir qaytımlı protsesste 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'mkin 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.

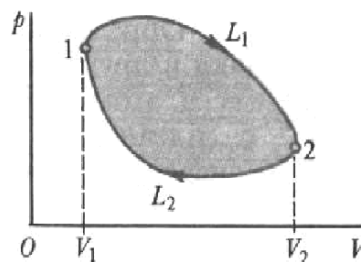
Entropiya berilgen makrohalg'a sa'ykes keliwshi mikrohاللar sanının logarifmi menen anıqlanadı.

Ten'salmaqlıq halda entropiya maksimal ma'nisine jetedi. Sebebi ten'salmaqlıq halda termodinamikalıq itimallıq maksimal ma'niske iye. Bunnan o'z-o'zine qoyıl'g'a izolyatsiyalang'an sistemanın' entropiyası sırtqı sharayatlarg'a sa'ykes keliwshi maksimum ma'nisine jetkenshe o'sedi.

§ 2-20. 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 baslamasınıń usınılıwı. Klauzius ta'repinen termodinamikanın' ekinshi baslamasınıń usınılıwı. Salqınladıw mashinası ha'm qızdırg'ısh. Birdey jıllıq bergish ha'm jıllıq qabıl etiwshilerge iye Karno tsikli boyınsha islewshi mashinalardıń paydalı ta'sir koeffitsienti. Temperaturalıq absolyut termodinamikalıq shkalası.

Anıqlaması: Sistema o'zinin' da'slepki halına qayıp ketug'in protsess tsikllıq protsess dep ataladı. Tsikl protsessler diagrammasında tuyıq iymeklik tu'rinde su'wretlenedi (Su'wrette ko'rsetilgen). Tsikldı saat strelkasının' ju'riw bag'ıtında da, og'an qarama-qarsı bag'ıtta da o'tiw mu'mkin. 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.



2-19 su'wret. Tsikl

Tsikl jumısı. 1-haldan baslap saat strelkası bag'ıtında ju'rip tsikldı a'melge asıramız. Usında islengen jumıs:

$$A = \int_{L_1}^{(2)} p dV + \int_{L_2}^{(1)} p dV. \quad (20-1)$$

Birinshi integral $V_1, V_2, 2, 1_1$ sızığ'ı 1 noqatı ha'm V_1 menen qorshalg'an maydang'a ten'. Al ekinshi integral bolsa $V_1, V_2, 2, 1_2$ sızığ'ı 1 noqatı, V_1 menen qorshalg'an maydang'a ten' ha'm belgisi teris. Sonlıqtan A jumısının' ma'nisi 1_1 ha'm 1_2 cızıqları menen shegaralang'an maydang'a ten'.

Bul paragraftag'ı tsiklg'a berilgen anıqlama, jumıstın' shaması tek g'ana ideal gazge tiyisli bolıp qalmaq, barlıq jag'daylardı da o'z ishine qamtıydı. Eger termodinamikanıq birinshi baslamasının' an'latpasının' eki ta'repin de qarap atırg'an tsikl boyınsha integrallasaq

$$\oint \delta Q = \oint dU + \oint p dV. \quad (20-2)$$

Integral tuyıq kontur boyınsha alınadı. Toliq differentsialdan tuyıq kontur boyınsha alıng'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 alıng'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 1_2 sızığ'ı menen ju'rip, 1_1 sızığ'ı menen qaytıp 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 qaytıp keledi.

Tsikldın' ha'r bir noqatında sistemanın' temperaturası hal ten'lemesi tiykarında anıqlanadı. Ulıwma jag'dayda temperatura noqattan noqatqa o'tkende o'zgeredi, ha'r bir noqatta temperatura sa'ykes termostat ta'repinen ta'miyinlenedi. Sonlıqtan sistema ta'repinen tsikldın' payda etiliwi ushın sistemanı o'zgermeli temperaturag'a iye termostatqa qoyıw yamasa bir termostattan basqa temperaturalı termostatqa o'tiwdi 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'zilislər haqqında aytıwg'a mu'mkinshilik boladı.

Tsikldın' qaysı noqatında sistema jıllılıq alatug'inlıg'ı, qaysısında jıllılıq beretug'inlıg'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 jıllılıq aladı. Yag'nıy $dU + rdV < 0$ bolg'an jag'dayda sistema jıllılıq beredi, $dU + rdV > 0$ bolg'anda jıllılıq aladı.

Tsikldag'ı sistemanın' jıllılıq beretug'in noqatları menen jıllılıq alatug'in noqatların ayırıp turatug'in noqat $dU + rdV = 0$ ten'lemesin sheshiw arqalı anıqlanadı. Bul sheshim tsikldın' 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'ın jıllıqtı jumısqa aylandırıwshı mashina bolıp tabıladı. Termostattan alıng'an jıllılıqtın' jumısqa aylan'ın bo'limi qanshama ko'p bolsa mashina sonshama *effektivli* boladı. Mashinanın' effektivligi bir tsiklda islegen jumıs A nın' termostattan alıng'an jıllılıq mug'darı $Q^{(+)}$ qa qatnası bolg'an paydalı ta'sir koeffitsienti η menen ta'riplenedi:

$$\eta = \frac{A}{Q^{(+)}}. \quad (20-5)$$

$Q^{(+)}$ termostatlardan sistemag'a berilgen jıllılıq. 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 tsikldın' sistemag'a sa'ykes jıllılıq kelip tu'setug'm ha'm jıllılıq alıp ketiletug'm ushastkalar boyınsha alıng'an. $Q^{(-)}$ - mashinadan shıg'ıwshı jıllılıq mug'darı (belgisi teris). (20-6) esapqa alıng'an jag'dayda paydalı ta'sir koeffitsienti bılay jazıladı:

$$\eta = \frac{Q^{(+)} + Q^{(-)}}{Q^{(+)}} = 1 + \frac{Q^{(-)}}{Q^{(+)}}. \quad (20-7)$$

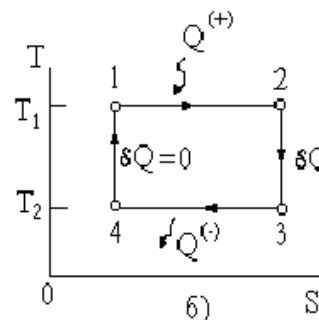
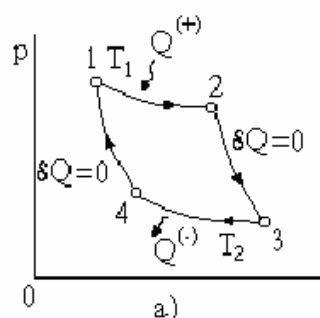
Bul shama barlıq waqıtta da 1 den kishi, sebebi $Q^{(-)}$ teris belgige iye.

Karno tsikli. Karno tsikli T_1 ha'm T_2 temperaturalarındag'ı eki izotermadan ha'm eki adiabatadan turadı. Tsikldın' bag'ıtı strelkalar menen ko'rsetilgen. Karno tsiklın orınlaw ushın eki termostat kerek. Joqarı temperaturalı T_1 termostatı *jıllılıq beriwshi*, al T_2 salıstırmalı to'men temperaturag'a iye termostat *jıllılıq qabıllawshı* dep ataladı. Adiabatalıq ushastkalar arqalı o'tkende sistema sırttan izolyatsiyalang'an bolıwı sha'rt.

Ideal gaz jag'dayında $Q^{(+)}$ ha'm $Q^{(-)}$ lerdi an'sat esaplawg'a boladı. 1-2 ushastkasındag'ı jıllılıq beriwshi du'zilisten alıng'an jıllılıq

$$Q^{(+)} = \int_{(1)}^{(2)} \delta Q = \int_{(1)}^{(2)} dU + \int_{(1)}^{(2)} p dV = R T_1 \ln(V_1/V_2). \quad (20-8)$$

Izotermalıq protsestege ishki energiyanın' o'zgerisinin' nolge ten' ekenligi esapqa alıng'an. 3-4 ushastkada sistema jıllıqtı jıllılıq qabıllag'ısh du'ziliske beredi.



2-20 su'wret. a) Karno tsikli. b) T ha'm S o'zgermelilerindegi Karno tsikli sxeması.

$$Q^{(-)} = \int_{(3)}^{(4)} \delta Q = RT_2 \ln(V_4/V_3). \quad (20-9)$$

$TV^{\gamma-1} = \text{const}$ ten'lemesinen

$$T_1 V_2^{\gamma-1} = T_2 V_3^{\gamma-1}, T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_4^{\gamma-1}. \quad (20-10)$$

Bul eki an'latpanın' shep ta'replerin shep ta'replerine, on' ta'replerin on' ta'replerine ag'zama-ag'za bo'lip, iye bolamız:

$$V_2/V_1 = V_3/V_4. \quad (20-11)$$

Demek

$$\ln(V_2/V_1) = -\ln(V_4/V_3). \quad (20-12)$$

(20-7) formulası (20-8), (20-9) ha'm (20-12) lerdı esapqa alg'anda bılay jazıladı:

$$\eta = 1 + \frac{T_2}{T_1}. \quad (20-13)$$

Bul formula qaytımlı Karno tsikli ushın durıs.

Paydalı ta'sir koeffitsientin entropiya ja'rdeminde esaplaw. Entropiyanın' anıqlaması boyınsha

$$\delta Q = T dS. \quad (20-14)$$

Sonlıqtan

$$Q^{(+)} = \int_{(1)}^{(2)} \delta Q = T_1 \int_{(1)}^{(2)} dS = T_1(S_2 - S_1), Q^{(-)} = \int_{(3)}^{(4)} \delta Q = T_2 \int_{(3)}^{(4)} dS = T_2(S_4 - S_3). \quad (20-15)$$

Adiabatalıq qaytımlı protseste entropiyanın' o'zgermeytug'ınlıg'ının esapqa alıp $S_2 = S_3$, $S_1 = S_4$ ekenligine iye bolamız ha'm sonlıqtan:

$$\eta = 1 + [T_2(S_4 - S_3)]/[T_1(S_2 - S_1)] = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (20-16)$$

Bul formula (19-13) penen sa'ykes keledi.

Sistemag'a berilgen jıllıq 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 jıllıq kelip tu'setug'ın, al jıllıq shıg'ıp ketpeytug'ın tsikldın' bolmaytug'ınlıg'ın bildiredi. Sonlıqtan mashinanın' paydalı ta'sir koeffitsienti barlıq waqıtta birden kishi.

Tsiklda orinlang'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 qızdırılǵ'an deneden joqarı qızdırılǵ'an denegе jıllılıqtın' o'tiwi bolıp tabılátug'ın tsikllıq protsesstin' ju'zege keliwi mu'mkin emes (termodinamikanın' ekinshi baslamasının' Klauzius ta'repinen ayılıwı).

§ 2-21. Temperaturaların' absolyut termodinamikalıq shkalası

Karnonın' birinshi teoremasının' mazmunı to'mendegiden ibarat:

Karno tsiklında islewshi barlıq mashinalar birdey paydalı ta'sir koeffitsientine iye boladı.

Basqasha Karnonın' birinshi teoreması bilayınsha ayıladı:

Karno tsiklinin' paydalı ta'sir koeffitsienti tsikldi ju'zege keltiriwshi du'ziliske ha'm paydalanılátug'ın zattın' ta'biyatına baylanıslı emes.

(20-13) formulasınan joqarıda keltirilgen anıqlamanı bilayınsha toltıramız:

Karno tsiklinin' paydalı ta'sir koeffitsienti tsikldi ju'zege keltiriwshi du'ziliske ha'm paydalanılátug'ın zattın' ta'biyatına baylanıslı emes, al jıllılıq beriwshi menen jıllılıq qabıl etiwshi du'zilislerdin' temperaturaların' qatnasına g'a'rezli. Paydalı ta'sir koeffitsienti barlıq waqıtta da 1 den kishi shama ha'm 1 ge jıllılıq qabıllawshi du'zilistın' temperaturası nolge umtılg'anda jaqınlasadı.

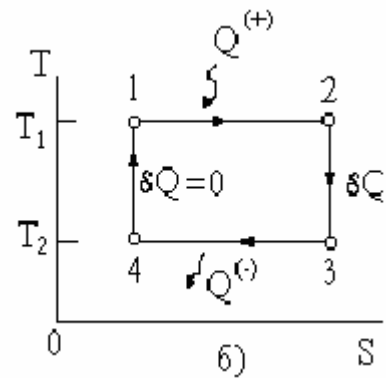
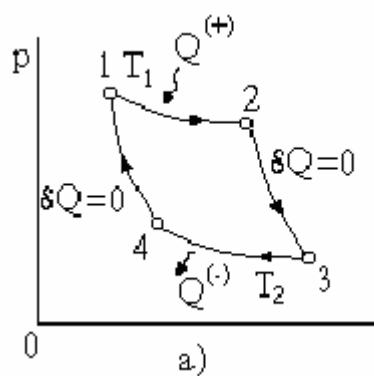
Paydalı ta'sir koeffitsientinin'

$$\eta = [Q^{(+)} + Q^{(-)}] / Q^{(+)} = 1 + \frac{Q^{(-)}}{Q^{(+)}} \quad (22-1)$$

ekenligi ha'm onın' temperaturası T_1 bolg'an jıllılıq beriwshi ha'm temperaturası T_2 bolg'an jıllılıq qabıl etiwshi du'zilislerine iye bolg'an barlın' qaytımlı mashinalar ushın birdey bolatug'ınlıg'ı da'lillengen edi. Sonlıqtan $\frac{Q^{(-)}}{Q^{(+)}}$ qatnası tek g'ana T_1 ha'm T_2 temperaturaların' funktsiyası boladı.

Demek

$$\frac{Q^{(-)}}{Q^{(+)}} = f(T_2, T_1).$$



(22-2)

Bul jerde T emperikalıq shkaladag'ı temperatura.

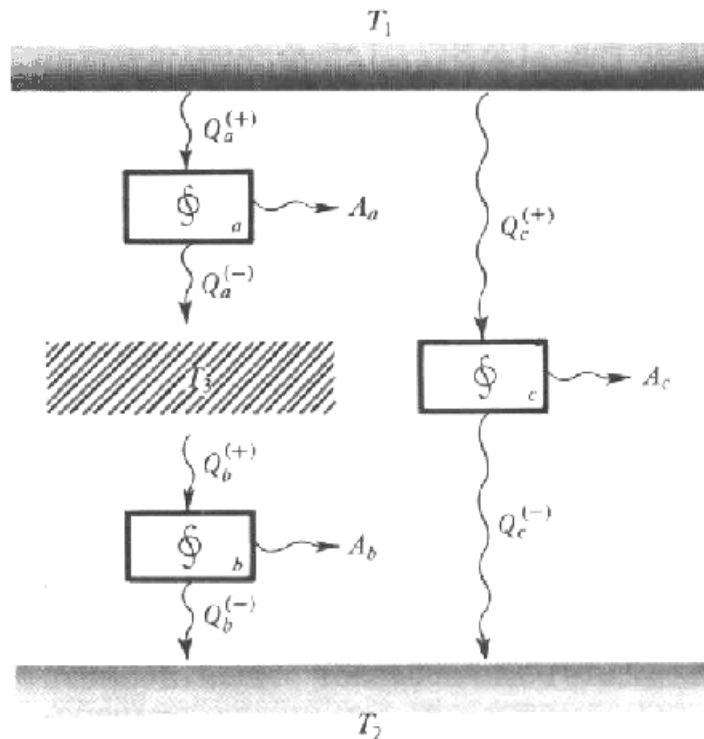
T_1 menen T_2 temperaturaları arasındag'ı intervaldag'ı T_3 temperaturalı bazı bir dene bolsın. Bul dene T_2 temperaturasına salıstır'anda jıllılıq beriwshi, al T_1 temperaturasına salıstır'anda jıllılıq qabıllag'ısh bolıp xızmet etiwi mu'mkin. Bul deneni su'wrette ko'rsetilgendey etip qollanamız. a ha'm b mashinaları qaytımlı mashinalar bolıp tabıladı.

a ha'm b qaytımlı mashinalar paydalı ta'sir koeffitsienti mashinanın' paydalı ta'sir koeffitsientine ten' bir qaytımlı mashinanı payda etedi. Bul

$$Q_a^{(+)} = Q_s^{(+)}, Q_b^{(-)} = Q_s^{(-)}, Q_a^{(-)} = -Q_b^{(+)}, A_a + A_b = A_s. \quad (22-3)$$

(21-2) bul mashinalar ushın mınaday tu'rge iye boladı:

$$Q_s^{(-)}/Q_s^{(+)} = f(T_2, T_1), Q_a^{(-)}/Q_a^{(+)} = f(T_3, T_1), Q_b^{(-)}/Q_b^{(+)} = f(T_2, T_3). \quad (22-4)$$



2-21 su'wret. Temperaturaların' termodinamikalıq shkalasın anıqlaw ushın arnalg'an sızılma.

Bunnan (21-3) ti esapqa alıp

$$f(T_2, T_1) = Q_s^{(-)}/Q_s^{(+)} = Q_b^{(-)}/Q_b^{(+)} = -(Q_b^{(-)}/Q_b^{(+)})/Q_a^{(-)}/Q_a^{(+)} = f(T_2, T_3) f(T_3, T_1). \quad (22-5)$$

Bul ten'liktin' on' ta'repi T_3 ke baylanissız. Sonlıqtan (22-5) tegi T_3 qısqaratug'ınday funktsiya bolıwı kerek. Bul

$$f(T_2, T_1) = -\varphi(T_2)/\varphi(T_1) \quad (22-6)$$

ten'liginin' orınlanıwının' kerek ekenligin ko'rsetedi. φ - jan'a funktsiya. Solay etip Karno tsiklındag'ı jıllılıq mug'darların' qatnası

$$\frac{Q^{(-)}}{Q^{(+)}} = -\varphi(T_2)/\varphi(T_1) \quad (22-7)$$

tu'rinde bolatug'ınlıg'ın ko'rdik.

$\frac{Q^{(-)}}{Q^{(+)}} = -\varphi(T_2)/\varphi(T_1)$ <p>qatnası temperaturaların' empirikalıq shkalasınan g'a'rezsiz anıq ma'niske iye boladı. Sonlıqtan Kelvin bul qatnastı sa'ykes absolyut termodinamikalıq temperaturaların' qatnasında etip alıwdı usındı, yag'nıy</p> $\varphi(T_2)/\varphi(T_1) = \frac{T_2}{T_1}. \quad (22-8)$

(22-8) boyınsha alıng'an temperaturalar shkalası **absolyut termodinamikalıq shkala**, al T **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 mashinanın' paydalı ta'sir koeffitsienti (22-1) bılay jazıladı

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (22-9)$$

(20-13) tegi T temperaturası ideal gaz termometri boyınsha anıqlang'an edi. Sonlıqtan (20-13) ha'm (22-9) lerdin' birdey ekenligi bul formulalardag'ı temperaturaların' birdey ekenligin da'llileydi. Demek usı waqıtqa shekemgi bayanlawda T ha'ripi menen belgilengen temperaturaların' barlıg'ı da termodinamikalıq temperatura bolıp tabıladı.

Teris temperaturalar. Anıqlama boyınsha temperatura bo'lekshenin' ortasha kinetikalıq energiyasına proporsional bolıwı kerek. O'z gezeginde teris ma'nisli kinetikalıq energiyanın' bolmaytug'ınlıg'ına baylanisli 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

$$n = n_0 \exp (-U/kT).$$

Bul formula jillılıq ten'salmaqlıg'ı jag'dayında energiyası U bolg'an bo'lekshelerdin' salıstırmalı sanın (n/n_0) beredi. Bul san tek g'ana temperaturag'a baylanıslı bolıp tur.

Boltsman formulası $n = n_0 \exp(-U/kT)$ temperaturag'a teris ma'niske iye bolıwıg'a Fmu'mkinshilik beredi. Eger $U = kT$ bolsa n n_0 den e ma'rte kishi boladı ($n = n_0 e^{-1}$ ha'm $n_0 = en$).

Joqarıdag'ı formulanı logarifmlep $\ln(n/n_0) = -U/kT$ an'latpası alamız. Sonlıqtan

$$T = - \frac{U}{k * \ln(n/n_0)}.$$

Bul an'latpadan $n < n_0$ bolg'anda $T > 0$ ekenligi ko'rinip tur.

Eger de $n > n_0$ 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 is denesinen (paydalanıp atırg'an zattın' ta'biyatınan) g'a'rezsiz Karno tsikli boyınsha isleytug'ın barlıq qaytımlı mashinalar birdey paydalı ta'sir koeffitsientine iye boladı.

§ 2-22. 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 jillılıq beriwshi ha'm jillılıq 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 tsikilde 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'illileymiz. Bul ushın T ha'm S o'zgeriwshilerindegi tsiklllardın' su'wretinen paydalanamız. Karno tsiklinen basqa tsikl iymekligi $A_1A_2A_3A_4$ tuwrı mu'yeshligi ishine sıızlg'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:

$$A_K = \oint TdS = T_1 \int_{A_1}^{A_2} dS + T_2 \int_{A_3}^{A_4} dS = T_1(S_2 - S_1) + T_2(S_1 - S_2) = (T_1 - T_2)(S_2 - S_1).$$

Jumsalg'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 formulanı burın da alg'an edik.

Karno tsiklin su'wretleytug'ın tuwrı mu'yeshliktin' ishindegi 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 aling'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'rlendiremiz:

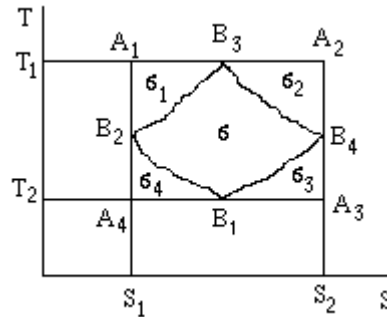
$$\begin{aligned} \eta &= \{\eta_K Q_K^{(+)} - \Delta_{14} - \Delta_{23}\} / \{Q_K^{(+)} - \Delta_{14}\} = \\ &= \{\eta_K (Q_K^{(+)} - \Delta_{14}) + \eta_K \Delta_{14} - \Delta_{14} - \Delta_{23}\} / \{Q_K^{(+)} - \Delta_{14}\} = \\ &= \eta_K - \Delta_{14}(1 - \eta_K) / \{Q_K^{(+)} - \Delta_{14}\} - \Delta_{23} / \{Q_K^{(+)} - \Delta_{14}\}. \end{aligned}$$

$$\Delta_{23} = \sigma_2 - \sigma_3. \text{ Demek } \eta \leq \eta_K.$$

$\eta = \eta_K$ ten'ligi $\Delta_4 = 0$ ha'm $\Delta_{23} = 0$ bolg'anda orinlanadı. Bul jag'dayda tsikli Karno tsikli bolıp tabıladı. Teorema da'llilendi.

Karnonın' ekinshi teoremasının' mazmunın matematikalıq tu'rde jazamız.

Barlıq jag'dayda da paydalı ta'sir koeffitsienti



2-22 su'wret. Qaytımlı Karno tsikli boyınsha islewshi mashinanı paydalı ta'sir koeffitsientinin' maksimalıg'ın tu'sindiriw ushın arnalg'an su'wret.

$$\eta = [Q^{(+)} + Q^{(-)}] / Q^{(+)} = 1 + \frac{Q^{(-)}}{Q^{(+)}} \quad (23-1)$$

tu'rinde jazıladı. Al sonday jıllılıq beriwshi ha'm jıllılıq qabıl etiwshi du'zilisleri bar qaytımlı mashina ushın

$$\eta = 1 - T_2/T_1$$

tu'rinde jazılatug'ın edi. Joqarıda da'llilengen teorema matematikalıq tu'rde bılayınsha jazıladı:

$$1 + \frac{Q^{(-)}}{Q^{(+)}} \leq 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (23-1)$$

Qaytadan o'zgertin'kirep jazsaq

$$\frac{Q^{(-)}}{Q^{(+)}} \leq - \frac{T_2}{T_1}. \quad (23-2)$$

«-» belgisi $Q^{(-)}$ menen $Q^{(+)}$ nin' belgilerinin' ha'r qıylılıg'ına baylanıslı.

$$Q^{(+)} / T_1 + Q^{(-)} / T_2 \leq 0 \quad (23-3)$$

tu'rinde ko'shirip jazılğ'an (23-2) Karno tsikli ushın **Klauzius ten'sizligi** dep ataladı. **Ten'lik belgisi qaytımlı protseske qoyıladi.** Bul ten'sizlikti ıqtıyarlı tsikl ushın ulıwmalastırıwg'a ha'm ten'lik belgisinin' tek g'ana qaytımlı protsessler ushın qoyıwg'a bolatug'ınlg'ın da'llilew mu'mkin.

Bazı bir jıllılıq qabıl etkish ha'm jıllılıq bergishke iye Karno tsikli boyınsha islewshi qaytımsız mashinanın' paydalı ta'sir koeffitsienti sonday jıllılıq qabıl etkish ha'm jıllılıq bergishke iye Karno tsikli boyınsha islewshi

qaytımlı mashinanın' paydalı ta'sir koeffitsientinen barlıq waqıtta da kishi boladı.

Izolyatsiyalang'an sistemalardaǵı protsesslerde entropiya kishireymeydi. Izolyatsiya etilmegen sistemalarda protsesslerdin' xarakterine baylanısh entropiyanın' u'lkeyiwi da, kishireyiwi de, o'zgermey qalıwı da mu'mkin.

Karno tsikli boyınsha islewshi qaytımlı mashinanın' paydalı ta'sir koeffitsientinin' maksimal ekenligi tek g'ana mashinanın' qaytımlı ekenligine baylanısh emes, al sistemag'a jıllıq tek bir maksimalıq temperaturada berilip, tek bir minimalıq temperaturada sistemadan alınatug'ınlg'ına da baylanısh.

Izolyatsiyalang'an sistemadag'ı entropiyanın' kemeymewi aqırg'ı esapta sistemanı en' itimal halg'a alıp keletug'ın onın' mikrohollarının' ten'dey itimalıqqa iye ekenliginde.

Joqarıda keltirilip shıǵ'arılǵ'an ten'sizlikti iqtıyarlı tsiklge ulıwmalastıramız ha'm ten'lik belgisinin' tek qaytımlı tsikl ushın qoyılatus'ınlg'ın da'lilleybiz.

Klauzius ten'sizligi. Sxeması su'wrette ko'rsetilgendey jumıs isleytug'ın qurılıstı qaraymız. T_1 rezervuarı turaqlı temperaturag'a iye boladı. Bul rezervuardan alınatug'ın $\delta Q^{(+)}$ jıllılıǵ'ı 1 arqalı belgilengen qaytımlı mashinasına da'wirli tu'rde beriledi. O'z tsiklında bul mashina δA_1 jumısın isleydi ha'm T temperaturada δQ jıllılıǵ'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 baylanısh. 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

$$\delta A_1 = \delta Q^{(+)} \left(1 + \frac{T}{T_1}\right) = \delta Q^{(+)} \frac{T}{T_1} \left(\frac{T_1}{T} - 1\right) = \delta Q^{(+)} \left(\frac{T_1}{T} - 1\right) = \delta Q \left(\frac{T_1}{T} - 1\right). \quad (23-4)$$

Bul jerde (23-2) formulası esapqa alıng'an. Bul formulada 1 qaytımlı mashina ushın ten'lik belgisi alıng'an. Eger 2 mashinag'a kelip tu'setug'ın bolsa δQ jıllılıǵ'ının' belgisi on' ma'niske iye boladı.

2 mashinanın' bir tsiklde islegen jumısı A_2 ulıwmalıq bolg'an (23-3) formula tiykarında bılayınsha beriledi:

$$A_2 = \oint \delta Q. \quad (23-5)$$

2 mashinanın' tolıq bir tsiklinde islengen jumıs

$$A = \oint \delta Q_1 + A_2 = \oint (\delta A_1 + \delta Q) = T_1 \oint \frac{\delta Q}{T}. \quad (23-6)$$

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 tutılǵ'an. Al $\oint (\delta A_1 + \delta Q)$ integralında 2 mashinanın' bir tsikli boyınsha integrallaw na'zerde tutılǵ'an.

Kelvin printsipi boyınsha eki mashinadan turatug'ın sistema tsikldin' birden bir na'tiyjesi bolǵ'an jumıs isley almaydı. Bul tsiklda sistemadan jıllılıqtın' shıǵ'ıwı joq (shtrixlang'an sızıq penen usı eki mashına da, usı eki mashinanın' jumıs islewi menen baylanıslı bolǵ'an barlıq du'zilisler qorshalg'an, demek anqlama boyınsha shtrixlang'an sızıqtan jıllılıqtın' shıǵ'ıwı orın almaydı). Demek

bunday sistemanın' jumıs islewinin' birden bir mu'mkinshiligi sistemag'a jıllılıqtın' kelip tu'siwi bolıp tabıladı yamasa en' aqırǵ'ı esapta sistema ta'repinen islengen jumıstın' nolge ten' bolıwı orın aladı: $A \leq 0$.

(23-6) tiykarında ha'm $T_1 = \text{const} > 0$ bolǵ'anlıqtan bul ten'sizlik

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0 \quad (23-7)$$

tu'rine iye boladı. Bul 2 mashına ta'repinen orınlang'an ıqtıyarlı tsiklge tiyisli bolıp **Klauzius ten'sizligi** dep ataladı ha'm qa'legen tsikl ushın orınlanadı.

Qaytımlı mashınalar ushın (23-7) de ten'lik belgisin alıw kerekligin, al qaytımsız mashınalar ushın eki belginin' de orın alatug'ınlg'ın da'lillewge boladı. Solay etip

Qaytımlı protsessler ushın (23-7) Klauzius ten'sizligindegi ten'lik belgisi, al qaytımsız protsessler ushın eki belgi de orın aladı.

(23-7) an'latpası qaytımlı protsessler ushın 1854-jılı R.Yu.Klauzius ha'm V.Tomson ta'repinen alındı. Al qaytımsız protsessler ushın bul an'latpanı 1862-1865 jılları Klauzius tiykarladı. Olar ta'repinen

ilimge jıllılıqtın' energıyanın' basqa formalarına o'tiw qa'bilettiligi sıpatında «entropiya» termini endirildi.

Qaytımlı protsessler ushın (23-7) mınaday tu'rge iye:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0. \quad (23-8)$$

Demek bul jerde integral astında $\oint \frac{\delta Q}{T}$ tolıq differentzialı tur:

$$\frac{\delta Q}{T} = dS. \quad (23-9)$$

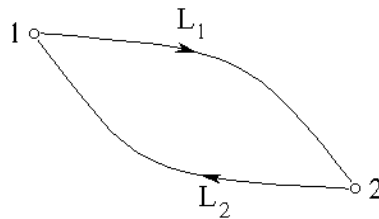
Bul jerde S arqalı entropiya belgilengen.

Demek joqarıda keltirilip shıǵ'arılǵ'an ideal gaz ushın entropiya tu'sinigi ıqtıyarlı jag'daylar ushın da durıs boladı eken. Entropiya ushın § 2-19 da ideal gaz ushın ayılǵ'anlardın' barlıǵ'ı da durıs boladı.

Termodinamikanın' ekinshi baslaması. Meyli tuyıq sistema (bsqa sistemalardan izolyatsiyalang'an sistema) bazı bir protsesste su'wrette ko'rsetilgen 1 halınan 2 halına o'tetug'in bolsın. Qaytımlı protsess ja'rdeminde sistemanı 2 halınan 1 halına qaytaramız. Bul ushın sistemanın' izolyatsiyalang'anlıǵ'ın joq qılıwımız kerek. 1 halına qayıtıp keliw na'tiyjesinde Klauzius ten'sizligin qollanıw mu'mkin bolǵ'an tsikl payda boldı:

1 den 2 ge o'tiwde 1_1 jolında sistema izolyatsiyalang'an edi. Sonlıqtan bul jol ju'rilgende alıng'an jıllılıq $\delta 1$ nolge ten' ha'm sa'ykes integral da nolge ten'. Ekinshi ta'repten 2 den 1 ge qayıtıwda (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:

$$\int_{L_2}^{(1)} \frac{\delta Q}{T} = \int_{L_2}^{(1)} dS = S_1 - S_2 \leq 0$$



2-23 su'wret. Tuyıq sistemalardag'ı entropiyanın' kemeyeytug'inlıǵ'ın da'lillew ushın arnalǵ'an su'wret

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \int_{L_1}^{(2)} \frac{\delta Q}{T} + \int_{L_2}^{(1)} \frac{\delta Q}{T} \leq 0. \quad (29-10)$$

yamasa

$$S_2 \leq S_1.$$

Demek

Tuyıqlang'an sistema entropiyası S_1 ge ten' bolǵ'an 1 halınan entropiyası S_2 bolǵ'an 2 halına o'tkende entropiya o'sedi yamasa o'zgermey qaladı. Bul jag'day $\frac{\delta Q}{T} = dS$ formulası menen an'latılutug'ın entropiyanı bar boladı dep tastıyıqlaw menen birdey bolǵ'an termodinamikanın' ekinshi baslamasının' mazmunın quraydı.

Qısqaq tu'rde termodinamikanın' ekinshi baslaması bılayınsha ayıladı:

Tuyıqlang'an sistemalardag'ı protsesslerde entropiya kemeymeydi. Bul tastıyıqlaw tek g'ana izolyatsiyalang'an sistemalar ushın durıs. Protsesstin' xarakterine baylanışlı izolyatsiyalanbag'an sistemalarda entropiyanın' o'siwi de, o'zgermey qalıwı da, kemeyiwi de mu'mkin.

Izolyatsiyalang'an sistemalarda entropiya tek qaytimli protsesslerde o'zgermey qaladi. Qaytimsiz protsesslerde entropiya kemeymeydi. O'z o'zine qoyilg'an izolyatsiyalang'an sistemalarda protsessler qaytimsiz ju'rtug'inlig'i

izolyatsiyalang'an sistema entropiyasining barliq vaqitta o'setug'inlig'in, al entropiyaning o'siwi sistemaning termodinamikaliq teng salmaqliqqa yaqinlag'anlig'in bildiradi. Sistemaning teng salmaqliq halga yaqinlawining en'itimal halga yaqinlaw ekenligin eske tushiramiz.

§ 2-23. Termodinamikaning ekinshi baslamasiga berilgen aniqlamalar

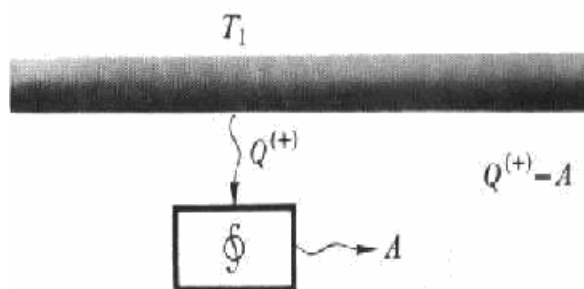
Biz da'slep termodinamikaning birinshi ha'm ekinshi baslamalari haqqida uliwma tushirish beremiz.

Termodinamikaning birinshi baslamasi tabiiyatta protsesslarning bag'it haqqida heshqanday mag'liwmat bermeydi. Izolyatsiyalang'an sistema ushin birinshi baslama barliq protsesslerde usi sistemaning energiyasining turaqli bolip qaliw talap etedi. Eger sistemaning eki halin 1- ha'm 2-hallar dep belgilesek birinshi baslama sistemaning 1-haldan 2-ge yamasa 2-haldin 1-halg'a o'tiwi haqqida ayta almaydi. Uliwma alg'anda birinshi baslamaning ja'rdeminde izolyatsiyalang'an sistemada qanday da bir protsessning bolatug'inlig'i yamasa bolmaytug'inlig'i haqqida hesh na'rse aytish mumkin emes.

Meyli adiabatliq izolyatsiyalang'an sistema bir biri menen ta'sirlesetug'in, biraq basqa deneler menen ta'sir etise almaytug'in eki deneden turatug'in bolsin. Bunday jag'dayda usi eki dene arasindagi jilliliq almasiw $Q_1 = - Q_2$ shartine bag'inadi. Bir dene ta'repinen aling'an Q_1 jillilig'i ekinshi dene ta'repinen berilgen $-Q_2$ jillilig'iga teng. Jilliliqtin qay bag'itta o'tetug'inlig'in termodinamikaning birinshi baslamasi ayta almaydi. Jilliliqtin to'men qizdirilg'an deneden joqari qizdirilg'an deneg'e o'tiwi birinshi baslamaga qayshi kelmes edi. Temperaturaning sanliq ta'repi termodinamikaning birinshi baslamasi ushin jat ma'sele bolip tabiladi. Sonliqtan birinshi baslama temperaturaning ratsional bolg'an shkalalarining birewine de alip kelmedi.

Termodinamikaning birinshi baslamasi bolsa protsesslarning bag'iti turali aytishga mumkinshilik beredi. Biraq ekinshi baslamaning a'hmiyeti tek usining menen juwmaqlanbaydi. Ekinshi baslama temperaturaning sanliq o'lishi haqqindagi ma'selening sheshiliwine ha'm termometrik dene menen termometrning qurilisidan g'a'rebsiz bolg'an ratsional temperaturaliq shkalani payda etiwge alip keledi. Ekinshi baslama birinshi baslama menen birgelikte denelarning ko'plegen makroskopiyaliq parametrleri arasindagi da'l sanliq qatnaslar ornatadi. Usinday da'l qatnaslarning barlig'i **termodinamikaliq qatnaslar** dep ataladi.

Termodinamikaning ekinshi baslamasining tiykarin saliwshi frantsuz injeneri menen fizigi Sodi Karno bolip tabiladi. Ol jilliliqtin jumisqa aylanish shartlerin izertledi. Biraq ol teplota ko'z-qarasida turg'anliqtan termodinamikaning ekinshi baslamasiga da'l aniqlama bere alg'an joq. Aniqlama berish XIX a'sirdin ortalarida nemis fizigi Rudolf Klauzius ha'm shotlandiya fizigi Vilyam Tomson (lord Kelvin) ta'repinen bir birining g'a'rebsiz tushirish berildi. Olar termodinamikaning ekinshi baslamasini aniqlaytug'in tiykarig'i postulatti qaliplestirdi ha'm bul postulattan bosh na'tijelardi shig'ardi.



2-24 su'wret. Kelvin formulirovkasındag'ı termodinamikanın' ekinshi baslamasının' sxema tu'rindagi sa'wleniwi.
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:

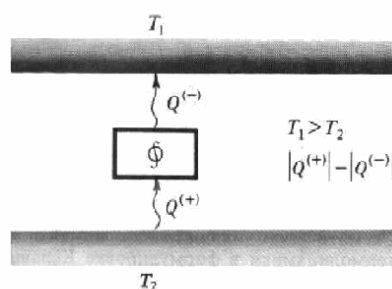
Bir jıllılıq rezervuarı menen jıllılıq almasıw arqalı jumıs atqaratug'ın tsikllıq protsess mu'mkin emes. Bazı bir mug'dardag'ı jıllılıqtın' jumısqa aylanıwı belgili bir mug'dardag'ı jıllılıqtın' qızdırg'ıstıan salqınlatqıshqa beriliwi menen a'melge asadı.

Ja'ne bir anıqlama Klauzius ta'repinen 1850-jılı berilip, to'mendegiden turadı:

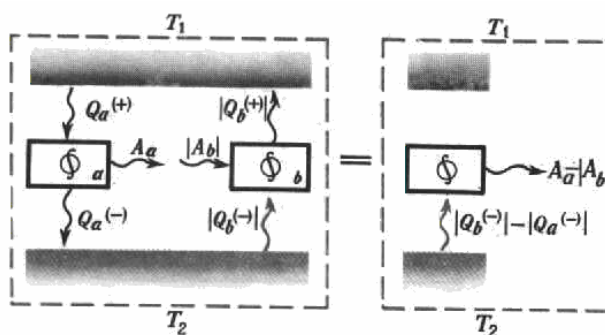
Birden bir na'tiyjesi to'men qızdırılğ'an deneden joqarı qızdırılğ'an deneg'e jıllılıq beriw bolıp tabılatur'ın tsikllıq protsesstin' ju'zege keliwi mu'mkin emes.

Bul anıqlamada termodinamikanın' ekinshi baslamasının' durıslıg'ı anıq ko'rinedi. Salqın deneden o'zinen o'zi jıllılıq bo'linip shıg'ıp usı jıllılıqtın' temperaturası joqarı bolğ'an deneg'e beriliwi mu'mkin emes.

Eki anıqlama da ekvivalent bolıp tabıladı. Ha'tte Kelvinnin' o'z formulirovkasın Klauzius formulirovkasınan tek forması jag'ınan parqlanatıg'ının atap o'tti.



2-25 su'wret. Termodinamikanın' ekinshi baslamasının' Klauzius boyınsha sa'wleniwi. Bul su'wrette sa'wlelengen protsesstin' a'melge asıwı mu'mkin emes.



2-26 su'wret. Termodinamikanin' birinshi baslamasi Kelvin ha'm Klauzius ta'repinen berilgen aniqlamalardin' ekvivaletliligin da'llillewge qollanilatug'in su'wret.

§ 2-24. Termodinamikaliq potentsiallar ha'm termodinamikaliq ornıqlılıq sha'rtleri

Matematikanın' bazı bir formalari. Meyli

$$z = z(x, y)$$

formulası menen baylanisqan 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 bildiridi. $z = z(x, y)$ tu'rindegi 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, u ke ha'm z ke qarata da shashiw mu'mkin. Bunday jag'daydi to'mendegidey jazıwlarg'a iye bolamız

$$x = x(y, z); y = y(z, x)$$

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 baylanisli boladı.

z , x ha'm u lerdin' tolıq differentsialları to'mendegidey tu'rge iye:

$$dz = \frac{\partial z}{\partial x} dx + \frac{\partial z}{\partial y} dy,$$

$$dy = \frac{\partial y}{\partial x} dx + \frac{\partial y}{\partial z} dz, \quad (A1)$$

$$dx = \frac{\partial x}{\partial y} dy + \frac{\partial x}{\partial z} dz.$$

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 , u yamasa x, z shamalarına g'a'rezli bolg'an bazı bir « funktsiyasına iye bolayıq. Bunday jag'daylarda bul funktsiyalardin' 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 aling'an. Termodinamikada qa'telik jiberiwdi boldıraw ushın 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

$$\left(\frac{\partial F}{\partial x} \right)_y \neq \left(\frac{\partial F}{\partial x} \right)_z$$

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 differentzial ekenligi ha'm

$$dF = Rdx + Qdy$$

tu'rinde jazılatug'ınlıg'ı, sonday-aq R menen 1 lardın' x penen u tin' belgili funktsiyaları bolsa anıqlama boyınsha ha'm tolıq differentsiallardın' qa'siyetlerinen

$$R = \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)_y, \quad Q = \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)_x, \quad \left(\frac{\partial P}{\partial y} \right)_x = \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right)_y.$$

Termodinamikalıq funktsiyanın' anıqlaması. Hal funktsiyaları **termodinamikalıq funktsiyalar** dep ataladı. Termodinamikalıq funktsiyalardıń sanı og'ada ko'p. Egerde termodinamikalıq funktsiyalardıń birewi belgili bolsa, onda usı funktsiyanın' qanday da bir funktsiyanı da termodinamikalıq hal funktsiyanı bolıp tabıladı. Haldı ta'ripleytug'ın r, V, T dan basqa ishki energiya U, entalpiya N ha'm entropiya S dep atalıwshı hal funktsiyaları belgili.

Termodynamikalik birdeylik. Termodinamikanın birinshi baslamasi $\delta Q = TdS$ ekenligin esapqa alg'anda bilay jaziladi

$$TdS = dU + pdV. \quad (24-1)$$

Barliq qaytimli protseslerde orinlanatug'in bolg'anliqtan bul ten'lik termodinamikaliq birdeylik (ten'lik, barabarliq, tojdestvo) bolip tabiladi. Termodinamikaliq potentsiallardi tiykarinan usi ten'lik tiykarinda alamiz.

Erkin energiya yamasa Gelmgolts funktsiyasi. Hal funktsiyalarinin' sani og'ada ko'p bolsa da, joqarida aytilip o'tilgen funktsiyalardan basqa hal funktsiyalarinin' birazi ma'seleler sheshkende a'hmiyetke iye emes bolip shig'adi. Biraq termodinamikaliq hal funktsiyalari arasında ayriqsha a'hmiyetke 1882-jili Gelmgolts ta'repinen keltirilip shig'arilg'an erkin energiya « iye boladi. (24-1) di bilay ko'shirip jazamiz

$$\delta A = pdV = -dU + TdS.$$

Izotermalik protsesste ($T = \text{const}$) sistema ta'repinen islengen jumis bilayinsha jazilwı mu'mkin:

$$\delta A = -d(U - Ts) = -dF. \quad (24-2)$$

Demek izotremalik protsestege islengen sheksiz kishi jumis toliq differentsial, al shaması keri belgi menen aling'an erkin energiyanın' o'zgerisine ten' eken:

$$F = U - Ts. \quad (24-3)$$

(24-3) ke sa'ykes erkin energiya hal funktsiyalarinin' funktsiyasi bolg'anliqtan bul erkin energiyanın' o'zi de hal funktsiyasi bolip tabiladi.

Izotremalik protseste erkin energiya potentsial energiyanın' ornın iyeleydi. Teris belgi menen aling'an onın' o'zgerisi islengen jumisqa ten'. Bul tek izotermalik protseste orin aladi. Iqtiyarli protseste jumis erkin energiyanın' o'zgerisine ten' emes.

Gibbsin' termodinamikaliq funktsiyasi. Bul funktsiya

$$G = F + pV = N - Ts \quad (24-4)$$

ten'ligi tu'rinde aniqlanadi. Bul jerde

$$N = U + pV \quad (16-7)$$

entalpiya dep atalatug'in hal funktsiyasi edi.

U, N, F, G termodinamikaliq funktsiyalarinin' barlig'in da r, V, T, S o'zgeriwshilerinin' ekewinin' funktsiyasi sipatında ko'rsetiw mu'mkin. Basqa so'z benen aytqanda r, 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 esaplaymiz. dU toliq differentsialı

$$dU = TdS - pdV. \quad (24-5)$$

Qalg'anları an'sat esaplanadi:

$$dN = dU + pdV + Vdp = TdS + Vdp. \quad (24-6)$$

$$dF = -SdT - pdV. \quad (24-7)$$

$$dG = -SdT + Vdp. \quad (24-8)$$

Keyingi to'rt ten'likten

$T = \left(\frac{\partial U}{\partial S} \right)_V, \quad -r = \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_S, \quad \left(\frac{\partial T}{\partial V} \right)_S = - \left(\frac{\partial p}{\partial S} \right)_V,$ $T = \left(\frac{\partial H}{\partial S} \right)_p, \quad V = \left(\frac{\partial H}{\partial p} \right)_S, \quad \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_S = - \left(\frac{\partial V}{\partial S} \right)_p,$ $-S = \left(\frac{\partial F}{\partial T} \right)_V, \quad -r = \left(\frac{\partial F}{\partial V} \right)_T, \quad \left(\frac{\partial S}{\partial V} \right)_T = - \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_V,$ $-S = \left(\frac{\partial G}{\partial T} \right)_p, \quad V = \left(\frac{\partial G}{\partial p} \right)_T, \quad \left(\frac{\partial S}{\partial p} \right)_T = - \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p.$	$(24-9)$
---	----------

Bul ten'likler **Maksvell qatnaslari** dep ataladi.

Termodinamikaliq potentsiallar. (23-5) formuladan eger U ishki energiya S ha'm V uliwmalasqan koordinatalar [yag'nuy $U = U(S, V)$ tu'rinde] arqali an'latilg'an potentsial energiya sypatında qaralatug'in bolsa T menen r nın' uliwmalastirilg'an ku'shlerdin' ornın iyeleytug'inlig'i ko'rinip tur. Bul $U(S, V)$ ni **termodinamikaliq potentsial** dep qarawg'a mu'mkinshilik beredi. Biraq bul jag'daydin' (ishki energiya U ushin) tek g'ana g'a'rezsiz o'zgeriwshiler sypatında entropiya S penen ko'lem V aling'anda duris bolatug'inlig'in esletip o'temiz. Fa'rezsiz o'zgeriwshiler basqasha saylap aling'anda basqa funktsiyalar termodinamikaliq funktsiyalarg'a aylanadi. Joqarida keltirilgen formulalarda (S, r) o'zgeriwshilerine qarata entalpiya N , (T, V) o'zgeriwshilerine qarata erkin energiya F , al (T, r) o'zgeriwshilerine qarata Gibbstin' termodinamikaliq potentsiali G termodinamikaliq potentsial bolip tabiladi.

Ishki energiyanın', entalpiyanın' ha'm entropiyanın' differentsiallarının' basqa tu'ri. Ha'r qiyli o'zgeriwshilerde dU , dN ha'm dS differentsialların joqarida keltirilgen tu'rlerden basqa tu'rlerde ko'retiwdge mu'mkinshilik tuwadi. Mısali zattın' ishki energiyası tek temperatura ha'm ko'lemnin' funktsiyası, yag'nuy $U = U(T, V)$ dep qabil etiledi. Sonliqtan

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V dT + \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T dV = S_V dT + \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T dV.$$

Bul jerde aniqlama boyınsha $S_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V$.

Usı aling'an an'latpa ha'm $TdS = dU + pdV$ formulasinan

$$dS = \frac{dU}{T} + \frac{p}{T} dV = S_V \frac{dT}{T} + \left[\frac{1}{T} \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T + \frac{p}{T} \right] dV.$$

Ekinshi ta'repten entropiyanı (T, V) nın' funktsiyası dep qarap, yag'nuy $S = S(T, V)$ 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 qatnaslaridan $\left(\frac{\partial S}{\partial V} \right)_T = \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_V$ qatnasin paydalansaq to'mendegi formulag'a alip keledi:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T = T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_V - p.$$

Bul an'latpa joqaridag'ı dU ushin jazılg'an an'latpanı bılayınsha ko'rsetiwge mu'mkinshilik beredi:

$$dU = S_V dT + [T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_V - p] dV.$$

Tap usınday esaplawlar entropiya menen entalpiyanın' differentsialları ushin to'mendegidey formulalardıń orın alatug'ınlg'ın ko'rsetedi:

$$dS = S_V \frac{dT}{T} + \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_V dV,$$

$$dN = S_p dT + [V - T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p] dp.$$

Keyingi ten'likte anıqlama boyınsha $S_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p$.

Eger g'a'rezsiz o'zgeriwshiler sıpatında T menen p alınsa entropiya differentsialı mınag'an ten':

$$dS = S_p \frac{dT}{T} - \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p dp.$$

Jılılıq sıyımlılıqları ushin formulalar.

$$dS = S_V \frac{dT}{T} + \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_V dV,$$

ha'm

$$dS = S_p \frac{dT}{T} - \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p dp.$$

An'latpaların bir biri menen salıstırıw arqalı alamız:

$$S_v \frac{dT}{T} + \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v dV = S_p \frac{dT}{T} - \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p dp,$$

bunnan

$$S_p - S_v = T \left[\left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v + \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \frac{\partial p}{\partial T} \right].$$

Bul jerde $S_p - S_v$ ayırması $p = \text{const}$ bolg'anda ko'lem o'zgergende de, $V = \text{const}$ bolg'andı basım o'zgergende de birdey bolıp o'zgeredi. Bul jag'day en' keyingi an'latpadan

$$(S_p - S_v)_v = T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v,$$

$$(S_p - S_v)_r = T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p$$

ekenliginen ko'rinip tur. $S_v dT + p dV = 0$ 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 $S_r - S_v$ ushin jazılǵ'an en' keyingi an'latpa keyingi eki an'latpa tiykarında bılay jazıladı:

$$S_p - S_v = - T \frac{\left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p^2}{\left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T}. \quad (\text{j.s.})$$

Zatlardı tolıq termodinamikalıq ta'riplew ushın za'ru'rli bolg'an eksperimentalııq mag'lıwmatlar. Keyingi formula burınıraq dU , dN ha'm dS ushın alıng'an an'latpalar menen birgelikte eger p , U , T lardıń ha'mmesi ha'm S_v menen S_p lardıń birewi belgili bolsa U , N , S lerdi printsipinde anıqlawǵ'a mu'mkinshilik beredi. Ekinshi ta'repten U , N , S ler arqalı an'latılutug'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 suyıqlıq tu'rinde)

bunday zat ushin 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 sıyımlılıqları ushın mag'lıwmatlar alıw kerek. Bul mag'lıwmatlar (j.s.) formulası menen birlikte zattın' barlıq termodinamikalıq

qa'siyetlerin toliq ta'riplew mu'mkinshiligin beredi.

Tap usınday jollar menen real zatlardın' 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'tiwidin' 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 tiyım 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 energiyagın' 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. (23-7) Klauzius ten'sizligi $\oint \frac{\delta Q}{T}$ (23-10) 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:

$$dU + pdV - TdS < 0$$

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 $dU + pdV - TdS < 0$ ten'sizligi ornına $d(U + pV) < 0$ 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. $dV = 0$, $T = 0$ bolg'anda $dU + pdV - TdS < 0$ ten'sizligi $d(U - Ts) < 0$ tu'rine iye boladı. Demek sistemada tek erkin energiya $F = U - Ts$ 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 jazılğ'an (23-2) an'latpası ja'rdeminde $dU + pdV - TdS < 0$ ten'sizligi to'mendegidey tu'rge endiriledi:

$$dG - SdT + Vdp < 0.$$

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 shıg'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 shıg'arg'anda ju'zege keletug'ın protsesslerdin' bag'ıtın anıqlawǵ'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 shıg'arılatus'ın **ornıqlı ten'salmaqlıq haldın' bolıwı** sha'rt. Onı sistemalarǵı 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 shıg'arılǵ'an.

Sistemanı ten' salmaqlıq haldan shıg'arsaq bul sistemada sistemanı ten' salmaqlıq halǵ'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 shıg'adı. Le-Shatale-Braun printsiptin' mazmunı to'mendegiden ibarat:

Eger ornıqlı termodinamikalıq ten' salmaqlıqta turg'an sistemag'a usı haldan shıg'arıwǵ'a bag'ıtlang'an sırtqı faktorlar ta'sir etse, sistemada sırtqı ta'sirdin' sebebinen payda bolǵ'an o'zgerislerdi joq qılıwǵ'a bag'darlang'an protsessler payda boladı (ju'zege keledi).

Adiabatalıq izolyatsiyalang'an sistemanın' halı entropiyanın' ma'nisi maksimal bolǵ'anda ornıqlı.

Ko'lemi ha'm entropiyası turaqlı bolǵ'an sistemanın' halı ishki energiyanın' ma'nisi minimum bolǵ'anda ornıqlı.

Turaqlı basımg'a ha'm entropiyag'a iye sistemanın' halı entalpiyanın' minimumında ornıqlı.

Turaqlı ko'lemge ha'm temperaturag'a iye sistemanın' halı erkin energiyanın' ma'nisi minimum bolǵ'anda ornıqlı.

Turaqlı temperatura ha'm basımg'a iye sistemanın' halı Gibbstin' termodinamikalıq potentsialı minimum bolǵ'anda ornıqlı.

§ 2-25. Molekulalardag'ı baylanıs ku'shleri

Molekulalardag'ı baylanıs ku'shleri. Ionlıq baylanıs. Kovalentlik baylanıs. 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 baylanıslı. 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.

Ionlıq baylanıs. 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 elektronın 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'miynleydi.

Usınday molekulalar sıpatında NaCl molekulasın ko'rsetiw mu'mkin. Bul molekulanı ionlar tu'rinde bılay jazıw mu'mkin Na^+Cl^- . Na^+ menen Cl^- ionları arasındag'ı tartısıw potentsial energiyası (SI sistemasında)

$$E_p(r) = - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon r_0}. \quad (24-1)$$

r_0 ionlar arasındag'ı ten' salmaqlıq aralıq. SGS sistemasında bul formula a'piwayı tu'rge iye boladı:

$$E_p(r) = - \frac{e^2}{r_0}. \quad (24-1')$$

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'lemde iyelewine baylanıslı, ion menen iyelengen ko'lemge basqa ionlar kire almaydı). Usı iyterisiw na'tiyjesinde ionlar bir birine kishi aralıqlarg'a jaqınlasa almaydı. Iyterisiw ku'shleri kishi qashıqlıqlarda u'lken ma'niske iye bolıp, qashıqlıq u'lkeygende tez kishireydi. NaCl molekulasının' dissotsiatsiyası ushın (24-1) formulasınan mınaday an'latpa alamız:

$$\Delta E = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_0}. \quad (24-2)$$

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. Ionlıq baylanıs ko'p sandag'ı molekulardın' qalay payda bolatug'inlig'ı tu'sindire almaydı. Onday molekular sıpatında, misalı, O_2 , N_2 , N_2 molekuların ko'rsetiwge boladı. Bul molekulardın' quramındag'ı atomlardın' ekewi de ten' huqıqlı. Sonlıqtan olardıń birewi on', ekinshisi teris zaryadlanadı dep ayta almaymız. Usınday molekulardag'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 zaryaqa iye bo'leksheler bir biri menen iyterisedi.	
Eger on' zaryadlı bo'leksheler ortasına absolyut shaması on' zaryadtay bolg'an teris zaryadlı bo'lekshe ornalasırılssa 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 jaqınlatıwga umtıdıratug'ın (tartılıs) ku'shi payda boladı.	

Qattı denelerdegi molekular aralıq ku'shler. Qattı haldag'ı molekular arasındag'ı baylanıs energiyası olardıń jıllılıq qozg'alısınan kinetikalıq energiyasınan artıq bolg'an jag'dayda qa'liplesedi. Na'tiyjede erkin energiyanın' minimumına sa'ykes keliwshi kristallıq qurılıs payda boladı.

Ionlıq ha'm kovalentlik baylanıslar atomlardı tek molekularda uslap turıwda g'ana emes, al molekular 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 kremniye 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'arılğ'an 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. Ionlıq kristallarda elektronlıq bult ionlardın' a'tırıpında jıylang'an, al ionlar arasında bunday ionlar derlik bolmaydı.

Suyıqlıqlar qurılısı. Gazler menen suyıqlıqlarda molekulalar bir biri menen statsionar, ornıqlı baylanıs penen baylanıspag'an. Molekulalar o'zlerinin' salıstırmalı orınların o'zgerte aladı. Gazlerdegi molekulalar arasındag'ı qashıqlıqlardıń ortasha ma'nisi u'lken ha'm bir birine salıstırg'anda olar o'zlerinin' orınların tez o'zgerte aladı.

Suyıqlıqlarda molekulalar arasındag'ı qashıqlıq az, molekulalar suyıqlıq iyelegen ko'lemde tıg'ız etip toltırıp turadı ha'm bir birine salıstırg'andag'ı orınların a'ste-aqırınlıq penen o'zgerterdi. Salıstırmalı uzaq waqıtlar ishinde molekulalar birigip molekulalar assotsiatsiyaların payda ete aladı. Bul molekulalar o'zinin' qa'siyetleri boyınsha qattı denelerdi eske saladı.

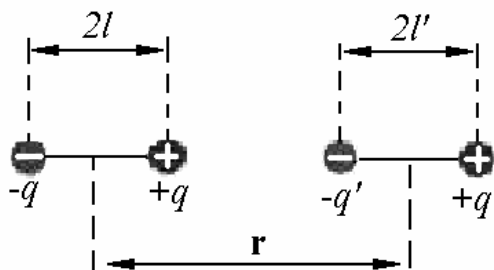
Solay etip suyıqlıqlar o'zinin' qurılısı ha'm molekulaları arasındag'ı baylanısları boyınsha gazlerdin' qa'siyetlerine de, qattı denelerdin' qa'siyetlerine de iye boladı. Sonlıqtan suyıqlıqlar teoriyası salıstırma tu'rde quramalı ha'm to'men izertlengen.

Van-der-Vaals ku'shleri. Salıstırmalı u'lken qashıqlıqlarda molekulalar 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' ($r = e \cdot d$). Dipol o'zinin' a'tirapında elektr maydanın payda etedi ha'm sol maydan arqalı basqa dipollar menen ta'sir etisedi.

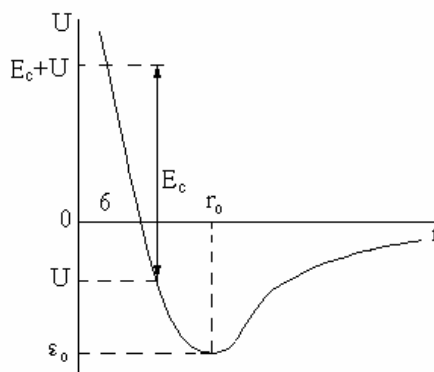
Turaqlı dipol momentine iye molekulalar boladı. Bunday molekulalardı polyar molekulalar dep ataymız. Olar jaqınlasqanda ha'r qıylı zaryadları menen qarap turatug'ınday bolıp bir birine salıstırg'anda burıladı. A'dette polyar molekulalar o'z-ara tartısağı. Bunday ku'shlerdi **dipollıq-orientatsiyalıq** 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 qashıqlıqlarda molekulalar arasında iytterisiw ku'shleri orn aladı. Iytterisiw molekulalardıń belgili bir ko'lem iyeleytug'ınlıg'ının', bul ko'lemge basqa molekulalardıń kiriwine jol qoyılmaytug'ınlıg'ının' na'tijjesi bolıp tabıladı. Bul iytterisiw ku'shleri molekulalardıń o'lsheplerindey aralıqlarda orn aladı.

Potentsial energiyanın' r qashıqlıqqa baylanıslı o'zgerisi su'wrette ko'rsetilgen. $r > r_0$ qashıqlıqlarında molekulalar arasında tartısiw ku'shleri ta'sir etedi, al $r < r_0$ qashıqlıqlarda iytterisiw ku'shi orn 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:



2-28 su'wret. Molekulalıq o'z-ara ta'sirlesiw potentsiali.

$$E_n(r) = a_1/r^n - a_2/r^m. \quad (24-3)$$

Bul formuladag'ı a_1 , a_2 , n ha'm m real potentsial ushın saylap alınadı. Izertlewler ko'pshilik jag'daylarda $n = 12$, $m = 6$, ayqın atomlar ushın aling'an a_1 menen a_2 lerde qanaatlandırarlıq na'tiyje alinatug'ınlıg'ın ko'rsetedi, yag'nıy

$$E_n(r) = 4\varepsilon_0 [(\sigma/r)^{12} - (\sigma/r)^6]. \quad (24-5)$$

Suyıqlıqlar ha'm gazler teoriyasında ken'nen qollanilatug'ın bul potentsial **Lennard-Djons potentsiali** dep ataladı.

Van-der-Vaals ku'shi to'mendegi formula menen beriledi:

$$F(r) \sim 1/r^7, \quad (24-6)$$

yag'nıy bul ku'sh qashıqlıqqa baylanışlı ju'da' tez kemeyedi. Sa'ykes potentsial

$$E_n(r) \sim 1/r^6.$$

Demek

Van-der-Vaals ku'shleri zaryad almasıw pu'tkilley bolmaytug'ın jag'daylarda payda boladı.

Molekulalar sistemaları. Suyıq ha'm gaz ta'rizli hallar. Molekulalar arasındag'ı o'z-ara tartısıw potentsial energiyası teris ma'niske iye.

Eger sistema molekulaların' kinetikalıq ha'm potentsial energiyaların' qosındısı on' shama bolg'an jag'dayda o'z erkine qoyılg'an molekulalar bir birinen sheksiz u'lken aralıqlarg'a qashıqlasıwg'a umtıladı. Bul gazdin' ken'eyiwge umtılıwına sa'ykes keledi.

Gaz qısılg'anda tıg'ızlıg'ı artadı ha'm molekulalar arasındag'ı ortasha qashıqlıq kishireyedi. Usının' menen birge (24-5) ke sa'ykes potentsial energiya da kemeyedi.

Eger ortasha kinetikalıq energiya ju'da' u'lken bolmag'an jag'dayda sistemadag'ı molekulalardın' kinetikalıq energiya menen potentsial energiyalardın' qosındısı teris bolatug'ın jag'day payda boladı. Molekulalardın' bunday sisteması o'zinshe u'lken ko'lemde tarqala almaydı.

Bul jag'dayda baylanisqan hal ju'zege keledi. Molekulalar u'lken aralıqlarg'a kete almaydı, al kerisinshe shekli ko'lemde bir birinin' a'tirapında toplanadı. Molekulalar sistemasının' bunday halı suyuq yamasa qattı hal bolıwı mu'mkin. Ko'binese (barqulla emes, al kritikalıq temperaturalarından to'men temperaturalarda) gaz qısılg'anda suyuq hal payda boladı.

Qısqa jag'dayda gaz halınan suyuq haldın' payda bolıwı molekulaların' kinetikalıq energiyası ju'da' u'lken bolmag'an jag'dayda a'melge asadı. Belgisi teris bolg'an molekulalar arasındag'ı ta'sirlesiw energiyası shekli ma'niske iye boladı. Sonlıqtan jetkilikli da'rejedegi joqarı temperaturalarda kinetikalıq energiya menen potentsial energiyaların' qosındısı hesh waqıtta da teris ma'niske iye bolmaydı. Sonlıqtan belgili bir temperaturadan joqarı temperaturalarda tek qısıw jolı menen gazdı suyuqlıqqa aylandıruw mu'mkin emes. Temperaturanın' usı belgili ma'nisin **kritikalıq temperatura** dep ataymız.

Basım azayg'anda protsess keri bag'ıtta rawajlanadı - molekulalar sisteması suyuq haldan gaz ta'rizli halg'a o'tedi.

Sorawlar:

Molekulalar arasındag'ı ta'sir etisiwdi ta'ripleytug'ın universal nızam joq. Bunday ta'sirlesiw molekulaların' qa'siyetine, ta'sir etisiw sharayatlarına ha'm basqa da ayqın faktorlarga baylanış. Sonlıqtan molekulalar arasındag'ı ta'sirlesiw juwıq formulalar ja'rdeminde ta'riplenedi. Bul formulalar qollanıw sheklerine iye boladı.

Ionlıq baylanıs zaryadlar menen tolıq almasıw bolg'anda, al kovalentlik baylanıs zaryadlar menen tolıq emes almasıw bolg'an jag'daylarda ju'zege keledi. Van-der-Vaals baylanısı zaryad almasıwsız payda boladı. Metallik baylanıs o'zinin' fizikalıq ta'biyatı boyınsha kovalentlik bolıp tabıladı, biraq ko'p elektronların' ulıwmalıq elektronlarga aylanıwı menen a'melge asadı.

Eger molekulanın' ortasha kinetikalıq energiyası ortasha potentsial energiyasının' modulinen kishi bolsa (yag'nıy molekulanın' tolıq energiyası teris shama bolg'anda, tolıq energiya = potentsial energiya + kinetikalıq energiya) molekulaların' baylanısqa halı payda boladı. Na'tiyjede suyuqlıq yamasa qattı dene qa'liplesedi.

Qanday fizikalıq faktorların' esabınan Van-der-Vaals ku'shinin' shaması aralıqtın' jetinshi da'rejesine kerip proporsional bolıp kemeyedi? Ha'r qıyılı 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 baylanışlı molekullıq kristallar arasında baylanıs energiyası ju'da' kishi bolg'an kristallar bar?

§ 2-26. Fazalar ha'm fazalıq o'tiwler

Fazalar ha'm fazalıq o'tiwler. Fazalıq ten' salmaqlıq. Polimorfizm. Birinshi ha'm ekinshi a'wlad fazalıq o'tiwler.

Faza dep zattın' basqa bo'limlerinen anıq shegara menen bo'lingen makroskopiyalıq jaqtan bir tekli bo'limine aytamız. Sonlıqtan faza sistemadan mexanikalıq jollar menen bo'lip alınıwı mu'mkin.

Mısal retinde jabıq ıdıstag'ı suw menen onın' u'stindegı hawa menen suw puwlarınin' aralaspasın ko'rsetiw mu'mkin. Bul sistema **eki fazalı sistema** dep ataladı. Bul zat eki fazadan turadı: **suyuq** (suw) ha'm **gaz ta'rizli** (hawa menen suw puwlarınin' aralaspası). Eger hawa bolmag'anda da

sistemada eki faza bolg'an bolar edi: suyuq (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 qattı (muz), suyuq (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 fizikalıq jaqtan bir tekli suyuqlıq alınadı. Al suwg'a sinap qosılısı sinap suw menen aralaspaydı. Bunday jag'dayda **eki suyuq fazadan** turatug'in sistema alınadı. Gaz ta'rizli faza buring'ısınsha hawa, suw puwları ha'm sinap puwlarının' aralaspasınan turatug'in bir fazadan turadı. *Solay etip sistemada bir waqıtta bir neshe qattı ha'm suyuq 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 mexanikalıq ha'm jıllılıq ten' salmaqlıg'in na'zerde tutamız. Jıllılıq ten' salmaqlıg'inın' ornawı ushin 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 mexanikalıq ten' salmaqlıqtın' za'ru'rli sha'rti bolıp tabıladı. Bul sha'rt shegara tek tegis bolg'an jag'dayda tolıq orınlanadı. Iymek shegaralar jag'dayında bet kerimin esapqa alıwg'a tuwra keledi. Mısalı suyuqlıq penen onın' puwıarasındag'ı ayırıp turatug'in iymek bette $R_2 - R_1 = \sigma K$ ($K = 1/R_1 + 1/R_2$) basımlar ayırması orın aladı.

Basımlar menen temperaturaldardın' ten'ligi sistemanın' ten' salmaqlıqta turg'anlıg'in bildirmeydi. Sebebi o'z ara tiyisip turg'an fazalar arasında bir birine o'tiwlerdin' bolıwı mu'mkin. Bunday o'tiwlerdi **fazalıq o'tiwler (fazalıq aylanıslar)** dep ataymız. Fazalıq o'tiwlerdin' na'tiyjesinde bir faza u'lkeydi, ekinshisi kishireyedi, ha'tte ayırım fazalardın' tolıq jog'alıp ketiwi mu'mkin. Ten' salmaqlıq hal barlıq fazalardın' massaların' 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 fazalıq o'tiwler menen fazalar arasındag'ı ten' salmaqlıq haqqındag'ı ta'limattın' tiykarın quraydı.

1- ha'm 2-fazalardan turatug'in ximiyalıq bir tekli zattan turatug'in sistemanı qaraymız. m_1 birinshi, al m_2 ekinshi fazalar massaları bolsın. φ_1 ha'm φ_1 arqalı usı fazalardın' salıstırmalı termodinamikalıq potentsialların belgileyik. Barlıq sistemanın' termodinamikalıq potentsialı $F = m_1\varphi_1 + m_2\varphi_2$ ge ten' boladı. Sistemanın' temperaturası menen basımı o'zgerissiz qalsın. Tek g'ana basım menen temperaturag'a g'a'rezli bolg'anlıqtan φ_1 menen φ_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 fazalıq o'tiwde o'zgeriske ushıraydı. Bul o'zgerisler barısında termodinamikalıq potentsial F mu'mkin bolg'an kishi ma'niske iye bolıwa qarata umtiladı. Eger $\varphi_1 > \varphi_2$ bolsa 1-fazanın' 2-fazag'a aylanısı F tin' kishireyiwi menen ju'redi. Bul aylanıs 1-faza ornıqlı bolg'an 2-fazag'a tolıq o'tkenshe ju'redi. Bunday jag'dayda en' aqırında sistema bir fazalı sistemag'a aylanadı, al onın' termodinamikalıq potentsialı 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

$$\varphi_1(R, T) = \varphi_2(R, T) \quad (26-1)$$

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 potentsialların' ten'liginen ibarat boladı.

Fazalıq o'tiwlerge zatlardın' agregat halının' o'zgeriwi misal bola aladı. Agregat hal dep zatlardın' gaz ta'rizli, suyuq ha'm qattı halların tu'sinemiz. Qattı ha'm suyuq hallar **kondensatsiyalang'an hallar** bolıp tabıladı. Puwlanın' menen puwdın' payda bolıwın zatlardın' 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 suyuq halg'a o'tiwdi **eriw**, al keri o'tiwdi **qatıw** dep ataymız.

Zatlardın' qattı halı ha'r qıylı **kristallıq modifikatsiyalarda** qa'liplesiwi mu'mkin. Bul qubılıstı **polimorfizm** dep ataymız. Mısalı 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 (α -, δ -, γ - ha'm δ -temir).

Ha'r bir fazalıq o'tiw zattın' qa'siyetin ta'ripleytug'ın qanday da bir fizikalıq shamanın' sekiriw menen o'zgeriwi arqalı a'melge asadı. Qa'legen fazalıq o'tiwde salıstırmalı termodinamikalıq potentsial $\varphi(T,R)$ dın' u'zliksiz bolıp o'zgeretug'ınılg'ı joqarıda ko'rsetilgen edi. Biraq onın' tuwındıları u'ziliske ushırawı mu'mkin.

Termodinamikalıq potentsial $\varphi(T,R)$ nın' birinshi ta'rtpi tuwındıları sekiriw menen o'zgeretug'ın fazalıq o'tiwler birinshi a'wlad fazalıq o'tiwler dep ataladı. Usı funktsiyanın' birinshi ta'rtpi tuwındıları u'zliksiz, al ekinshi ta'rtpi tuwındıları sekirip o'zgeretug'ın fazalıq o'tiwler ekinshi a'wlad fazalıq 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'ınılg'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 1 bilay esaplanadı:

$$l = T(s_2 - s_1). \quad (26-3)$$

Usı waqıtqa shekem qarap o'tilgen fazalıq o'tiwler (eriw, puwlanıw, qaynaw, vozgonka, kristallanıw) jıllılıqtın' jutılıwı yamasa shıg'arıwı 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'ınılg'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:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial T^2} = - \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_P = - s_R/T,$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial T \partial P} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial P \partial T} = \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P,$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial P^2} = \left(\frac{\partial v}{\partial P} \right)_T.$$

Bul shamalar tek fazalıq o'tiwlerde u'zilike ushıraydı. Bul formulalardan ekinshi a'wlad fazalıq o'tiwleri to'mendegidey shamalardıń birewinin' yamasa ekewinin' sekirmeli o'zgerisi menen ju'redi:

1) salıstırmalı jıllılıq sıyımlılıg'ı s_R ;

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', kobaltın' 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 ıdista 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 diywalının' jıllılıq sıyımlılıg'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 tolıg'ı menen sistemanın' ishki energiyasını arttırıwıw'a jumısaladı 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 $l_1 = 18 \cdot 100 = 1800$ kal/mol jıllılıg'ın beriwimiz kerek.

2. $t = 100^\circ\text{S}$ turaqlı temperaturasında suwdı puwlandıramız. Bul ushın $l_2 = U_p - U_j$ 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

$$l_2 = U_p - U_j = q - A = 8970 \text{ kal/mol.}$$

$$l = l_1 + l_2 = 1800 + 8970 = 10\,770 \text{ kal/mol.}$$

Endi fazalıq o'tiwlerdin' en' a'piwayılarının' biri puwlanıw menen kondensatsiyanı qaraymız.

§ 2-27. Gaz halnan suyıq halg'a o'tiw

Gaz halnan 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

fazali sistemanin' qa'siyeti.

Eksperimentte aniqlang'an izotermalar. Qisw protsessinde eksperimentte aniqlang'an real gazdin' izotermalari to'mendegi su'wrette keltirilgen. Usi diagram-

ma boyinsha T temperaturasi dag'i gazdi qisw protsesin qaraymiz. Gazdi V_1 ko'lemine shekem qisqanda onin' basimi r g'a shekem artadi. Ko'lemnin' bunnan bilay kemeyiwinde gazdin' bir bo'limi suyuqliqqa aylanadi, al basim r turaqli bolip qaladi. Demek diagrammadag'i V dan S g'a shekemgi araliqta idista bir waqitta gaz de, suyuqliq ta boladi. Gaz benen suyuqliqtı ayirip turatug'in bet suyuqliq beti bolip tabiladi. Fizikalıq jaqтан sistema bo'lingen bir tekli bo'limler fazalar dep ataladi. Demek SV ushastkasında sistema suyuq ha'm gaz fazalardan turadi. V noqatında barlıq ko'lem gaz faza menen toltirilg'an. V dan S g'a ju'rgende ko'lemnin' gaz faza menen tolg'an bo'legi kemeyedi, al suyuq faza menen tolg'an bo'limi u'lkeyedi. S noqatında barlıq ko'lem V_2 suyuqliq penen toladi. Gazdin' suyuqliqqa aylanıwı tolig'ı menen pitedi. Ko'lemnin' bunnan bilay kishireyiwi suyuqliqtı qisw menen a'melge asadi. O'z gezeginde suyuqliq qiswıg'a u'lken tosqnılıq jasadı. Na'tiyjede basim 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 aylanadi.

Usı noqatta gaz benen suyuqliq arasındag'i ayırma jog'aladı. Basqa so'z benen aytqında kritikalıq qnoqatta gaz benen suyuqliq birdey fizikalıq qa'siyetke iye boladı.

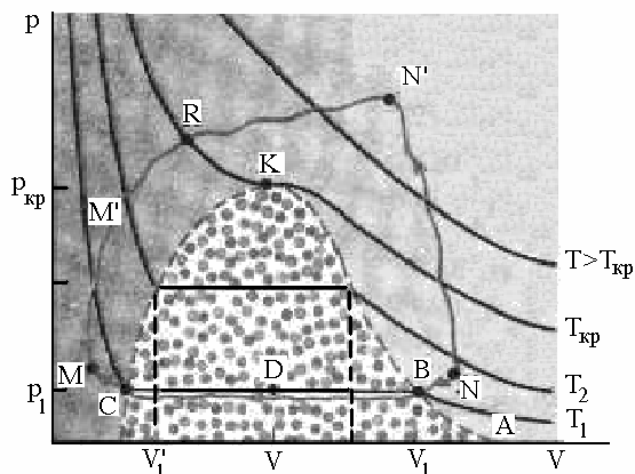
Bunday haldı **kritikalıq hal** dep ataymız. T_{kr} , V_{kr} ha'm r_{kr} shamaların sa'ykes kritikalıq temperatura, ko'lem, basim dep ataymız. Kritikalıq temperaturadan joqarı temperaturalarda gaz basımdı u'lkeytiwdin' saldarınan suyuqliqqa aylanbaydı.

Eki fazalı hal oblasti. Su'wrette eki fazalı oblast S , K , V , A noqatlari arqalı o'tiwshi shtrixlang'an sızıq penen ayırıp ko'rsetilgen. Gaz ta'rizli haldan suyuq halg'a o'tiw eki jol menen asırladı: NVSM boyinsha eki fazalı oblast yamasa NN'RM'M arqalı. Ekinshi jag'dayda 4 noqatında eki fazalı oblastsız suyuq halg'a o'tiw a'melge asadi. Bul noqatta suyuq ha'm gaz ta'rizli hallar arasındag'i ayırma jog'aladı. Biraq usı noqatqa qon'ısı bolg'an noqatlarda suyuqliq penen gazdin' qa'siyetleri ha'r qiyli boladı.

Toying'an puw. Eki fazalı sistemada suyuqliq penen puw dinamikalıq ten' salmaqlıqta turadi ha'm bul halg'a anıq basim menen tıg'ızlıq sa'ykes keledi. r basımı T temperaturadag'i toying'an pardın' basımı dep ataladı. Su'wrette temperaturanın' o'siwi menen toying'an puw basımının' da ko'teriletug'inlig'ı ko'rinip tur. Berilgen temperaturada «tig'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

$$\rho_{kr} = M/V_{kr}.$$



2-29 su'wret. Real gaz benen suıqlıqtın' izotermaları

Zatlardıń kritikalıq haldag'ı qa'siyetleri. Kritikalıq noqatta izoterma gorizont boyınsha bag'ıtlang'an. Sonlıqtan $(\partial r / \partial T)_T = 0$, yag'niy 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 qubılısının' payda bolıwına alıp keledi (tıg'ızlıq fluktuatsiyasının' o'siwinin' na'tiyjesinde kritikalıq halda turg'an zattın' jaqtılıq nurların ku'shli shashıratıwı).

Suıqlıq halınan gaz halına o'tkende turaqlı temperaturada sistemag'a belgili bir mug'darda jıllılıq beriliwi kerek. Bul jıllılıq zattın' fazalıq halın o'zgeriw ushın jumsaladı ha'm **fazalıq aylanıs jıllılıg'ı** yamasa **o'tiwdin' jasırın jıllılıg'ı** dep ataladı.

Jasırın jıllılıg'ı bo'leksheler arasındag'ı tartısıw ku'shlerin jen'iw ushın jumsaladı. Temperatura joqarılag'an sayın jasırın jıllılıg'ının' ma'nisi kemeyedi. Kritikalıq temperaturada jasırın jıllılıq nolge ten'.

§ 2-28. 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.

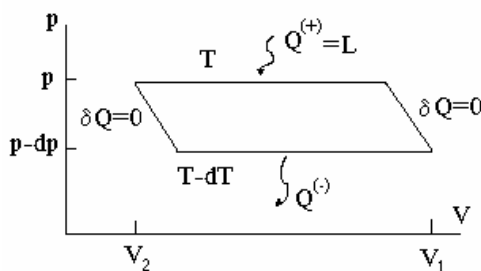
Sheksiz kishi Karno tsiklin qaraymız. Bul tsikldin' izotremaları T ha'm dT temperaturalarındag'ı eki fazalı oblast bolsın. Bul tsikldegi jumıs

$$A = (V_1 - V_2)dp. \quad (28-1)$$

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



2-30 su'wret. Klapeyron-Klauzius ten'lemesin keltirip shıg'arıwg'a arnalg'an su'wret

$$\eta = 1 - T_2/T_1 = 1 - (T - dT)/T = dT/T. \quad (28-3)$$

(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 baylanıstı beredi. Eger jasırın jıllılıg'ı 1, V_2 ha'm V_1 ko'lemleri belgili bolsa (28-4) ten'lemesi basımdı temperaturanın' funksiya sıpatında tabıwg'a boladı.

Molekulalıq ko'z-qarastan suyıqlıqtın' puwlınwı ushın jıllılıqtın' ne sebepten kerek ekenligin an'sat tu'siniwge boladı. Suyıqlıq molekularının' tezlikleri Maksvell nızamı boyınsha tarqalg'an. Suyıqlıqtan qorshag'an ortalıqqa tek g'ana ayırım tez qozg'alatug'ın molekular ushıp 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'ın molekular ketip qalg'anlıqtan suyıqlıq salqınlaydı. Sonlıqtan suyıqlıqtın' temperaturasını turaqlı etip uslap turıw ushın sırttan jıllılıq beriw kerek.

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'arılıwı menen ju'retug'ın basqa da fazalıq o'tiwler ushın durıs boladı. Mısalı eriw ushın bılay jaza alamız:

$$dp/dT = Q_{23}/[T(v_2 - v_3)] \quad (28-5)$$

Bul an'latpadag'ı Q_{23} eriwdin' salıstırmalı jıllılıg'ı, v_2 ha'm v_3 ler suyıq ha'm qattı fazalardıń 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 basımın' o'siwi menen eriw noqatın' joqarılaytug'ınlıg'ın 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. O^0S 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'ınlıg'ı ko'rinip tur. Al Dyuar bolsa ta'jiriybede 0.0072 grad*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'tiwlerindegi u'zliksizliginin' saldarı bolıp tabıladı. Qanday da bir fazanın' salıstırmalı entropiyasın temperatura menen basımın' funktsiyası dep qarasaq, onın' differentsialı ushın to'mendegini jazamız:

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_p dT + \left(\frac{\partial s}{\partial P} \right)_T dp,$$

yamasa

$$\left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_p = s_R/T, \quad \left(\frac{\partial s}{\partial P} \right)_T = - \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p,$$

$$ds = (s_R/T) dT - \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p dp.$$

Bul qatnastı eki fazanın' ha'r biri ushın jazamız:

$$ds_1 = (s_{1R}/T) dT - \left(\frac{\partial v_1}{\partial T} \right)_p dp,$$

$$ds_2 = (s_{2R}/T) dT - \left(\frac{\partial v_2}{\partial T} \right)_p dp,$$

Ten' salmaqlıq iymekliginde (T,R) ha'm (T+dT, R+dp) noqatların alayıq. Bunday jag'dayda dp/dT usı iymektiktin' qıyalıg'ın anıqlıydı. Sonın' menen birge fazalıq o'tiwde ds₁ = ds₂ ekenligin esapqa alsaq to'mendegige iye bolamız:

$$(s_{2R} - s_{1R}) (dT/T) = \left[\left(\frac{\partial v_2}{\partial T} \right)_p - \left(\frac{\partial v_1}{\partial T} \right)_p \right] dp,$$

yamasa qısqasha tu'rde

$$\Delta s_R = T \Delta \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p (dp/dT). \quad (28-6)$$

Bul an'latpalardag'ı Δs_R menen Δ $\left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$ 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 usunday jollar menen Erenfesttin' ekinshi qatnası alıladı. Bul jerde salıstırmalı entropiya s ti temperatura menen salıstırmalı ko'lemnin' funktsiyası dep qaraw kerek. Bul qatnas to'mendegidey tu'rge iye boladı:

$$\Delta s_v = T \Delta \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v (dv/dT). \quad (28-7)$$

U'shinshi qatnastı alıwda salıstırmalı entropiya s ti v ha'm R shamaların' funktsiyası dep qaraw kerek. Sonda:

$$\Delta \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = \Delta \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v (dv/dp) \quad (28-8)$$

Erenfesttin' keyingi to'rtinshi qatnası salıstırmalı ko'lem v nin' uzliksizliginen ha'm onı R menen T nin' funktsiyası dep qarawdın' na'tiyjesinde alıladı:

$$\Delta \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = - \Delta \left(\frac{\partial v}{\partial P} \right)_T (dpv/dT) \quad (28-9)$$

(28-7), (28-8) ha'm (28-9) qatnaslarında dv/dT, dv/dp ha'm dp/dT tuwındıları ten'salmaqlıqtın' sa'ykes iymeklikleri boyınsha alıladı.

§ 2-29. Van-der-Vaals ten'lemesi

Gazlerdin' qa'sietlerinin' 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 iytterisiw ku'shleri ta'sir etedi.*

Qısılg'ıshlıq. Turaqlı temperaturadag'ı ko'lemnin' salıstırmalı o'zgeriwi $\Delta V/V$ menen basımnın' o'zgerisi Δr arasındag'ı χ koeffitsienti *izotermalıq qısılwshılıq koeffitsienti* dep ataladı.

$$\Delta V/V = - \chi \Delta r. \quad (29-1)$$

Bunnan

$$\chi = - \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T. \quad (29-2)$$

Ideal gaz ushin $\left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_T = -V/p$ ha'm $\chi = 1/p$. Eksperimentler kishi basımlarda real gazlerdin' qısılwshılıg'ın ideal gazdin' qısılwshılıg'ınan kem ekenligin, al u'lken basımlarda real gazlerdin' qısılwshılıg'ın ideal gazlerdin' qısılwshılıg'ınan artıq ekenligin ko'rsetedi.

Suyıqlılarda qısılwshılıq az. Sebebi bul jag'dayda molekular bir birine tug'ız etip jaylasadı. Sonın' ushin suyıqlıqtın' ko'lemin o'zgertiw ushin u'lken ku'sh talap etiledi. Mısalı:

Suyıqlıq	Qısılwshılıq, 10^{-9} Pa^{-1}
Suw	0.47
Benzin	0.82
Glitserin	0.22
Atseton	1.27

Bul keste suyıqlılardın' qısılg'ıshılıg'ı gazlerdin' qısılg'ıshılıg'ınan mın'lag'an ese kishi ekenligin ko'rsetedi.

Virial hal ten'lemesi. Hal ten'lemesi molekular 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 ushin universal hal ten'lemesi joq.

Printsipinde da'l hal ten'lemesi virial hal ten'lemesi tu'rinde ko'rsetiliwi mu'mkin:

$$pV_m = RT + A_1(T)/V_m + A_2(T)/V_m^2 + \dots \quad (29-3)$$

$A_i(T)$ virial koeffitsientler dep ataladı. Bul ten'leme sheksiz ko'p ag'zadan turatug'ın ten'leme bolıp tabıladı. Bul ten'lemeni sheshiw ushin 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.

Juwiq hal ten'lemeleri arasında Van-der-Vaals ten'lemesi ken' tu'rde belgili.

Van-der-Vaals ten'lemesi. Ideal gaz ten'lemesi bolg'an $pV = (m/M)RT$ ten'lemesinde molekular arasındag'ı tartısıw ha'm iyerisiw ku'shleri esapqa alınbag'an. Tartısıw ku'shleri molekular bir birinen uzaqlasqanda ta'sir etedi. Al iyerisiw ku'shleri bir molekula iyelegen ko'lemge ekinshi molekulanın' kiriwine qarsılıq jasaydı. Sonlıqtan **molekular arasındag'ı iyerisiw ku'shleri molekulanın' effektiv ko'lemi menen ta'riplenedi.** Gazdin' massasına tuwra proporsional bolg'an molekulalardın' effektiv ko'lemin mb' arqalı belgileyemiz. Bul ko'lem esapqa alıng'anda hal ten'lemesindegi o'zgeriske ushiraytug'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 keri proporsional. Qosımsha basım sırtqı basımnın' kishireyiwin a'melge asıradı.

Usı jag'daylardı esapqa alıp **Van-der-Vaals ten'lemesin** jazamız:

$$\left(p + \frac{m^2 a'}{V^2}\right)(V - mb') = \frac{m}{M} RT. \quad (29-4a)$$

a' ha'm b' ha'r qıylı gazler ushin 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'rın alamız:

$$(p + \frac{a}{V_m^2})(V_m - b) = RT. \quad (29-4g)$$

Virial tu'rde Van-der-Vaals ten'lemesin bılay jazamız:

$$pV_m = RT + \frac{RTb - a}{V_m} + RT \sum_{n=2}^{\infty} \frac{b^n}{V_m^n}. \quad (29-5)$$

Izotermalardı tallaw ushin (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:

$$V_m^3 - (b - \frac{RT}{p})V_m^2 + \frac{aV_m}{p} - \frac{ab}{p} = 0. \quad (29-6)$$

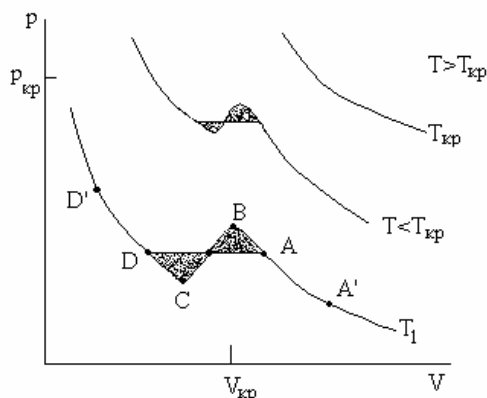
Van-der-Vaals ten'lemesinin' izotremaları. Eger (29-6) nı $T = \text{const}$ sha'rti orınlang'anda sheshetug'ın bolsaq, onda r nın' ha'r qıylı ma'nislerinde V u'sh yamasa bir ma'niske iye bolatug'ınlig'ın ko'remiz.

Bul ten'lemeni sheshkende alınatug'ın r, V tegisligindegi izotermanın' $r = \text{const}$ tuwrısın bir yamasa u'sh noqatta kesip o'tetug'ınlig'ın bildiredi.

Sonlıqtan Van-der-Vaals ten'lemesi izotermaları su'wrette ko'rsetilgende y tu'rge iye boladı. T_{kr} $r = \text{const}$ tuwrısın u'sh noqattı kesiwshi monotonlı emes izotermanı bir noqatta kesetug'ın monotonlı izotermalardan ayırıp turadı. T_{kr} izoterması eksperimentte alıng'an kritikalıq temperaturadag'ı izotermag'a sa'ykes keledi. $T < T_{kr}$ temperaturalardag'ı izotermalar eksperimentte alıng'an izotermalardan basqasha tu'rge iye. Izotermadag'ı A'A ha'm DD' bo'limler gaz ta'rizli ha'm suyıq hallarg'a sa'ykes keledi. AV ha'm SD izotermalarının' qanday halg'a sa'ykes keletug'ınlig'ın anıqlaw kerek boladı. Sebebi usı eki ushastkada da $\partial r / \partial V < 0$ ha'm usı bo'limlerdin' payda bolıwı qadag'an etilmeydi. Eksperimentte bolsa izoterma eki fazalı oblast bolg'an $T_1 A' A F D D'$ sıyıqları boyınsha ju'redi (2-31 su'wret).

AV 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 salqınlatılǵ'an puw ha'm asa qızdırılǵ'an suyıqlıq halları absolyut ornıqlı hallar bolıp tabılmaıdı. Ha'lsız sırtqı ta'sirdin' na'tiyjesinde sistema jaqın turg'an turaqlı halǵ'a o'tedi. Bunday hal metastabil hal dep ataladı.

Kritikalıq parametrler. $T > T_{kr}$ temperaturalarında (29-6) tek bir haqıyqıy tu'birge, al $T < T_{kr}$ bolǵ'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:

$$V_{kr} = b + RT_{kr}/r_{kr}, \quad 3V_{kr}^2 = a/r_{kr}, \quad 3V_{kr}^3 = ab/r_{kr}. \quad (29-8)$$

(28-8) u'sh belgisizli (V_{kr} , r_{kr} , T_{kr}) u'sh ten'lemeler sisteması bolıp tabıladı. Sistemanın' sheshimi:

$$V_{kp} = 3b; \quad p_{kp} = \frac{a}{27b^2}; \quad T_{kp} = \frac{8a}{27rb}. \quad (29-9a)$$

$RT_{kr}/(R_{kr}V_{kr}) = 8/3$ shaması kritikalıq koeffitsient dep ataladı. Haqıyqatında ha'r qıyılı gazler ushın kristikalıq koeffitsientler $8/3$ ten o'zgeshe ma'niske iye boladı ha'm olardıń barlıǵ'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 anıqlanadı eken.

Solay etip Van-der-Vaalstin' eki turaqlısı ushın u'sh ten'leme orın aladı eken. Bul ten'lemeler eger r (29-9a) ja'rdeminde anıqlanatug'm 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 ushın 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 kritikahq halg'a jaqınlag'anda ha'r bir zat ushın 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 kritikahq hal a'tirapında molekulalardıń komplekslerge birigiwine sa'ykes keledi. Kritikahq 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 ushın o'zine ta'n hal ten'lemesi bar boladı. Real gazler ushın 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 basımg'a du'zetiwi engiziw molekulalar arasındag'ı o'z-ara ta'sirlesiw sol molekulalardıń o'lsheplerinen a'dewir u'iken bolg'an aralıqlarg'a tarqalatug'ınıg'ına sa'ykes keledi. Biraq eksperimentler molekulanın' diametrinen bes ese ko'p qashıqlıqlarda tartılıs ku'shlerinin' derlik sezilmeytug'ınıg'ın ko'rsetedi. Sonlıqtan Van-der-Vaals ten'lemesi real gazdın' qa'siyetlerin tek sapalıq jaqtan ta'ripley aladı.

§ 2-30. Djoul-Tomson effekti

Differentsial Djoul-Tomson effektin esaplaw. Integrallıq 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 tıg'ızlıqqa baylanıslı. Tıg'ızlıq qanshama ko'p bolsa ortasha qashıqlıq sonshama az boladı. Ortasha qashıqlıq temperaturag'a da baylanıslı: temperatura qanshama joqarı bolsa ortasha qashıqlıq sonshama kemeydi. Temperatura joqarılag'anda molekulalardıń kinetikalıq energiyası o'sedi. Sonlıqtan soqlıg'ısıw protsessinde olar bir birine jaqınraq keledi ha'm biraz waqıtta bir birine jaqın aralıqlarda jaylasadı. Usınday jag'daylar orın alg'anda

jıllılıq almasıwsız real gaz ken'eygende onın' temperaturasının' o'zgeretug'ınıg'ı tu'sinikli boladı.

Eger gazdin' tıg'ızlıg'ı ha'm temperaturası jetkilikli da'rejede u'lken bolsa molekular arasındag'ı ortasha aralıq r_0 24-paragrafta keltirilgen su'wrettegi 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 qashıqlıq 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'zgeriwindegi temperaturanın' o'zgeriwi **Djoul-Tomsonnıń differentsial effekti** dep ataladı. Basımın' u'lken ma'nislerge o'zgergeninde temperaturanın' kishi o'zgerislerin qosıp shıg'ıw kerek. Bul qosındı effekt **Djoul-Tomsonnıń integrallıq effekti** dep ataladı.

Djoul-Tomsonnıń differentsial effektin esaplaw. V_1 ha'm V_2 ko'lemlerindegi gazlerde usı ko'lemlerdi ayırıp turatug'ın diywal arqalı tuwrıdan-tuwrı jıllılıq almasıw bolmasın. Barlıq sistema jıllılıq o'tkermeytug'ınday etip izolyatsiya etilgen bolsın. Sonlıqtan energiyanın' saqlanıw nızamı tiykarında alamız:

$$\Delta U_1 + r_1 \Delta V_1 = \Delta U_2 + r_2 \Delta V_2. \quad (30-1)$$

(30-1) din' eki ta'repinde turg'an ag'za da qarap atırg'an mug'dardag'ı gazdin' entalpiyası bolıp tabıladı. Sonlıqtan (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:

$$N = U + pV = \text{const.} \quad (30-2)$$

Fa'rezsiz o'zgeriwshiler sıpatında T menen r nı qabıl etip (30-2) den alamız:

$$dN = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_r dT + \left(\frac{\partial H}{\partial p} \right)_T dp = 0. \quad (28-3)$$

Entalpiyanın' differentsialı to'mendegi tu'rge iye boladı:

$$dN = S_p dT + [V + \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p] dp. \quad (30-4)$$

Bul an'latpanı esapqa alsaq

$$\left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p = S_p, \quad \left(\frac{\partial H}{\partial p} \right)_T = V - T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \quad (30-5)$$

ekenligi alamız ha'm sog'an sa'ykes (28-3) ten alamız

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_N = \frac{1}{C_p} [T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p - V]. \quad (30-6)$$

Bul formula Djoul-Tomsonnıń differentsial effektin ta'ripleydi.

Ideal gaz ushin $\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p = \frac{R}{p} = \frac{V}{T}$ ha'm, sog'an sa'ykes, $\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_H = 0$, yag'ny Djoul-Tomson effekti bolmaydı.

Integrallıq effekt. Djoul-Tomson protsessi kvazistatikalıq Djoul-Tomson efektleri izbe-izligi tu'rinde beriliwi mu'mkin. Ha'r bir kvazistatikalıq effektte basım dp shamasına o'zgeredi. Usınday protsessler izbe-izligi ushin

$$T_2 - T_1 = \int_{p_1}^{p_2} \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_N dp = \int_{p_1}^{p_2} [T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p - V] dp. \quad (30-7)$$

(30-7) integral Djoul-Tomson effektinin' formulası bolıp tabıladı.

Van-der-Vaals gazindegi Djoul-Tomson effekti. Van-der-Vaals ten'lemesi u'shinshi da'rejeli ten'leme bolg'anlıqtan ulıwma jag'dayda $\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_r$ tuwındısın esaplaw quramalı matematikalıq protsedura bolıp tabıladı. Sonlıqtan (30-6) dag'ı a ha'm b larg'a qarata sıızılıq bolg'an ag'zaldı esapqa alalatug'ın jetkilikli da'rejede siyreketilgen gazdı qaraw menen sheklenemiz.

Van-der-Vaals ten'lemesinin' viriallıq tu'rin jazamız:

$$\begin{aligned} V &= \frac{RT}{p} + \frac{1}{pV} (RTb - a) = \frac{RT}{p} + \frac{1}{RT} (RTb - a) = \\ &= \frac{RT}{p} + b - \frac{a}{RT}. \end{aligned} \quad (30-8)$$

Bul ten'lemeden

$$\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_r = \frac{R}{p} + \frac{a}{RT^2} \quad (30-9)$$

ekenligi kelip shıg'adı. Demek differentsial effekt ushin 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 $\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_N > 0$, yag'ny gaz ken'eygende salqınlaydı. Al jetkilikli joqarı temperaturada $\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_N < 0$, yag'ny gaz ken'eygende qızadı. Gazdin' usınday qa'siyeti Djoul-Tomson effektinin' fizikalıq ma'nisine tolıq sa'ykes keledi. $\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_N = 0$ 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 ushin entalpiyanın' turaqlılıq sha'rti bolg'an $N = U + pV = \text{const}$ an'latpasınan paydalanamız. Meyli ıdıtın' o'tkelinen 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

$$S_V T - a/T + pV = S_V T' + p'V' = S_V T' + RT'. \quad (30-12)$$

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:

$$T' - T = \Delta T = \frac{1}{C_p} [(RTb/(V-b) - 2a/V)]. \quad (30-14)$$

$C_p = C_V + R$. Bul formula Djoul-Tomsonnin' integrallıq effektinin' formulası bolıp tabıladı. Effekttin' belgisi $\Delta T = 0$ noqatında o'zgeredi, yag'nıy

$$(RTb/(V-b) - 2a/V) = 0,$$

$$T = \frac{2a}{Rb} (1 - b/V). \quad (30-15)$$

Gazlerdi suylıtw. Eger gaz kritikalıq temperaturadan to'men temperaturalarda tursa onı qısıw arqalı suyıq halg'a o'tkeriw mu'mkin. Biraq ko'pshilik gazler ushin kritikalıq temperatura ju'da to'men. Mısallar keltiremiz:

geliy 5.3 K;
vodorod 33 K;
azot 126.1 K
kislorod 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 suylıtw ushin ko'pshilik jag'daylarda 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 adiabatılıq jol menen yamasa Djoul-Tomson protsessinde gaz ken'eytileti. Eki jag'dayda da gaz salqınlaydı. Bunnan keyin bul salqınlatılğ'an gaz joqarı basımg'a shekem qısılg'an gazdin' ekinshi portsiyasın salqınlatıw ushin qollanıladı. 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 salqınlatıladı.

Haqiqiy ha'reket etiwshi mashinalarda salqinlatilg'an gazdin' portsiyasinin' bir bo'limi qisiliw stadiyasina qaytariladi. Bunnan keyin Djoul-Tomson protsessinde yamasa adiabatliq ken'eyiw joli menen salqinlatiladi. Usi protsessler ju'retug'in du'zilis **julliliq almasturwshu** dep ataladi. Adiabatliq ken'eyiw saldarinan gaz salqinlaytug'in du'zilisti **detander** dep ataydi.

Zatlardin' 0 K qasindag'i qa'siyetleri. Jilliliq siyimliligi' S_V on' ma'niske iye funktsiya bolg'anliqtan ishki energiya U temperaturanın' monotonli funktsiyasi bolip tabiladi. Temperaturanın' to'menlewi menen ishki energiya kemeyedi ha'm 0 K de o'zinin' en' minimalliq ma'nisine jetedi. Sonliqtan **0 K de sistemanin' barliq bo'limlerinin' ishki energiyasi o'zinin' minimum ma'nisine jetedi, yag'niy sistemanin' qa'legen bo'limi minimal energiyag'a iye tiykarg'i halinda turadi.**

$\delta Q = TdS$ an'latpasinan temperatura to'menlegende entropiyanin' kemeyetug'inlig'i kelip shig'adi. O'zinin' kemeyiw barisinda entropiya belgili bir ma'niske umtilama degen soraw tuwladı. Bul sorawg'a **Nerns printsipi** juwap beredi. Bul printsip termodinamikanin' birinshi ha'm ekinshi baslamalarinan keltirilip shig'ariliwi mu'mkin bolmag'anliqtan **termodinamikanin' u'shinshi baslamasi** dep te ataladi. Entropiya 0 K temperaturag'a jaqinlasqanda entropiya aniq bir shekke umtilatug'in bolg'anliqtan bul printsip 0 K de sistemanin' bir ten' salmaqliq haldan ekinshi o'tiwi entropiyanin' o'zgerisiz a'melge asadi dep tastiyiqlaydi. Bul tastiyiqlawdan

Entropiya 0 K temperaturada sistemanı ta'ripleytug'in parametrlerdin' ma'nislerine g'a'rezli emes.

dep juwmaq shig'aramız.

Entropiyanin' 0 K temperaturadag'i ma'nisi anıqlanbag'an. Sonliqtan bul ma'nisti 0 ge ten' dep qabil etiw qolaylı boladı.

Usınday etip anıqlang'an entropiya **absolyut entropiya** dep ataladı. Onın' sistemanın' qa'legen halındag'i ma'nisi

$$S = \int_{T=0}^T \frac{\delta Q}{T}$$

integralın esaplaw arqalı anıqlanadı.

Nernst printsipinen bir qatar a'hmiyetli juwmaqlar shig'ariliwi mu'mkin. En' da'slep bul printsipten

0 K temperaturag'a shekli sandag'i operatsiyalar ja'rdeminde jetiw mu'mkin emes

ekenligi kelip shig'adi.

Real (haqiqiy) gazde tartilis ku'shleri menen iyterilis ku'shleri arasında turaqli qarsi turıw orın aladı. Eger basım bazı bir shamag'a o'zgergende molekularlar arasındag'i o'z-ara ta'sirlesiw energiyasi kemeyetug'in bolsa gaz qızadı, al sol energiya u'lkeygen jag'dayda gaz salqinlaydı. Bul Djoul-Tomson effektinin' belgisin anıqlaydı. Effekt basımınn' ha'r qiyli ma'nislerinde ha'r qiyli belgilerge iye bolıwı mu'mkin.

0 K ge jaqinlag'anda sistemanın' barliq bo'limlerinin' ishki energiyasi

o'zinin' en' kishi ma'nisine, entropiya - aniq ma'niske iye bolg'an shekke umtiladi. Sistemani bir ten'salmaqlıq haldan ekinshi ten'salmaqlıq halg'a o'tkizetug'in 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-Tomsonnın' differentsial effektinin' belgisi ha'r qıylı basımlarda ha'm temperaturalarda ha'r qıylı boladı. Djoul-Tomsonnın' integrallıq effektinin' belgisi de arametrlerdin' o'zgeriw aymag'ında ha'r qıylı bolıwı mu'mkin.

§ 2-31. Bet kerimi

Erkin betlik energiya. Bet kerimi. Bet keriminin' payda bolıw mexanizmleri. Bet keriminin' a'piwayı ko'rinisleri. Eki suyıqlıq arasındag'ı ayırılıp turıw shegarasındag'ı ten' salmaqlıq sha'rti. Suyıqlıq-qattı dene shegarasındag'ı ten' salmaqlıq sha'rti. Iymeygen bet astındag'ı basım. Kapillyar qubılıslar.

Erkin betlik energiya. Suyıq hal molekular 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. Suyıqlıqtıq'ı molekular 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 ushın jumalg'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 jumıstın' ma'nisi belgilengen.

Bettin' bir tekiliginen erkin betlik energiyanın' bettin' maydanına proporsional ekenligi kelip shıg'adı:

$$F = \sigma S. \quad (31-2)$$

Bul formuladag'ı σ betlik erkin energiyanın' salıstırmalı tıg'ızlıg'ı.

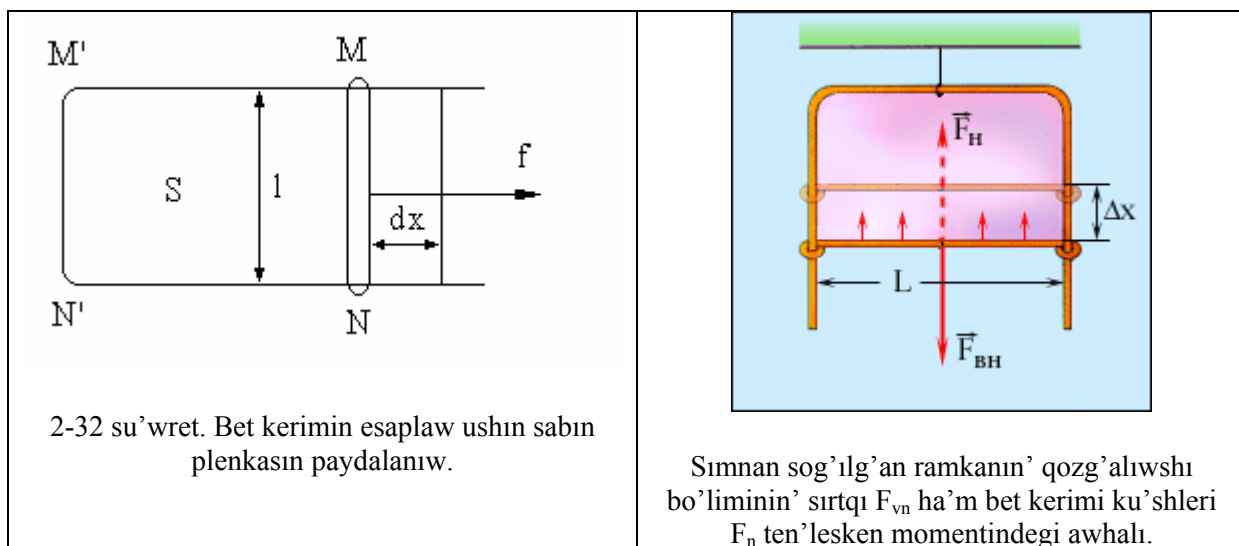
Bet kerimi. Mexanikadag'ı jag'daydag'ıday sistema en' kem potentsial energiyag'a jetiwge umtiladı. Usınday hal en' ornıqlı hal bolıp tabıladı. Termodinamikada sistema izotermalıq sharayatlarda en' az erkin energiyası bar halg'a jetiwge umtiladı. Sonlıqtan

suyıqlıqtın' beti qısqrıwıg'a umtiladı. Usıg'an baylanıslı suyıqlıqlın' beti boyınsha

bet kerimi dep atalatug'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 sımđı MM' ha'm NN' bag'ıtında tartadı ha'm plenka maydanı kemeyedi. Plenkanın' maydanın u'lkeytiw ushın sımđ'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'lshe birligi $1 \text{ Dj/m}^2 = 1 \text{ N/m}$. Sonlıqtan σ **betlik kerim** dep ataladı. Ha'r qanday suyıqlıqlar ushın 10^{-2} den 10^{-1} N/M ge shekemgi ha'r qanday ma'nislerge iye boladı. Misalı

efırde $1.71 \cdot 10^{-2}$;
 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'lshe birlik N/m lerde berilgen.

Bet keriminin' payda bolıw mexanizmleri. σ 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 plenkaday 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 σ nı erkin energiya tıg'ızlıg'ı dep interpretatsıyalawda 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'zgetedi. Bul bet kerimi σ nın' o'zgeretug'ınlıg'ın an'latadı. Sonlıqtan bet kerimi haqqında ga'p etilgende tek suyıqlıqtın' o'zi emes,

al usı suıqlıq tiyisip turg'an zat ta esapqa alınıwı kerek. Yag'nıy σ bir birine tiyisip turg'an eki ortalıqqa tiyisli eki indeks penen ta'miyinlengen bolıwı kerek, misalı σ_{12} , σ_{23} h.t.b. Eki suıqlıqtı bo'lip turg'an bettegi bet kerimi erkin bet kerimine salıstırg'anda kem bolıwı kerekligi tu'sinikli. Misalı suw menen efirdi bo'lip turg'an bettin' kerimi 0.0122 N/m, al suw-benzol jag'dayında 0.0336 N/m.

Qattı dene menen suıqlıqtı ayırıp turatug'ın bette de bet kerimi kemeyedi. Misalı 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.

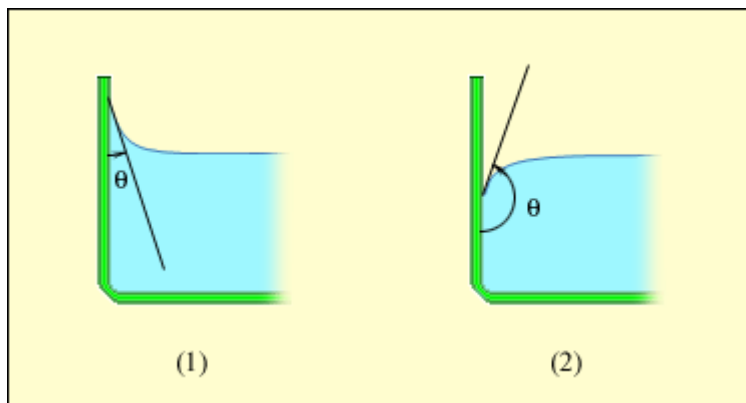
Suyıqlıq-qattı dene shegarasındag'ı ten' salmaqlıq sha'rti. Eger suıqlıq ıdısqı quylg'an bolsa, onda suıqlıqtın' ıdıstın' vertikal diywalı menen tiyisiwı eki tu'rli boladı. Eger suıqlıq diywalg'a jug'atug'ın bolsa a) su'wrettegi awhal ju'zege keledi. Juqpaytug'ın jag'dayda b) awhal orın aladı. Tap sol sıyaqlı suıqlıqtı ju'zetug'ın deneler jag'dayında da eki awhal baqlanadı. Eger suıqlıq denegı jug'atug'ın bolsa v) su'wrette ko'rsetilgen awhal baqlanıp suıqlıqtın' ko'teriw ku'shi kemeyedi. Al juqpaytug'ın suıqlıq jag'dayında (g-su'wret) ko'teriw ku'shi artadı. Usınday qubılıstın' saldarınan, misalı, geypara nasekomalar suwdın' bet keriminen suw betinde juwırıp ju're aladı.

Mayısqa bet astındag'ı basım. Bunday basımdı esaplaw ushın sabın qo'bigın qaraymız. Atmosferalıq basımdı ko'bik ishindegi r' basımı ha'm suıqlıqtın' 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 jumıs ko'bik betinin' 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

$$4\pi r^2 r' dr = 2\sigma 98\pi r dr. \quad (31-3)$$

Bunnan

$$p' = 292\sigma/r. \quad (31-4)$$



2-33 su'wret. Jug'atug'ın (a) ha'm juqpaytug'ın (b) suıqlıqlar jag'dayındag'ı suıqlıq penen ıdısqı diywalı arasındag'ı ko'rinishler.

Bul basım sabın ko'biginin' iymeygen eki beti ta'repinen payda etiledi. Bir bet eki ese kem basım payda etedi:

$$p = p'/2 = 2\sigma/r. \quad (31-5)$$

Ulıwma jag'dayda iymeklik eki iymeklik radiusı ja'rdeminde anıqlanadı. Sonlıqtan

$$p = \sigma(1/r_1 + 1/r_2). \quad (31-6)$$

Bul formula **Laplas formulasi** dep ataladı. $r_1 = r_2$ bolg'anda bul formula (31-5) ke o'tedi.

Kapillyar qubılıslar. Idıstın' diywalı menen ta'sir etiskende bet kerimi suyıqlıqtın' qa'ddin ko'teriwge (a su'wret) yamasa to'menleetiwge umtıladı (b su'wret).

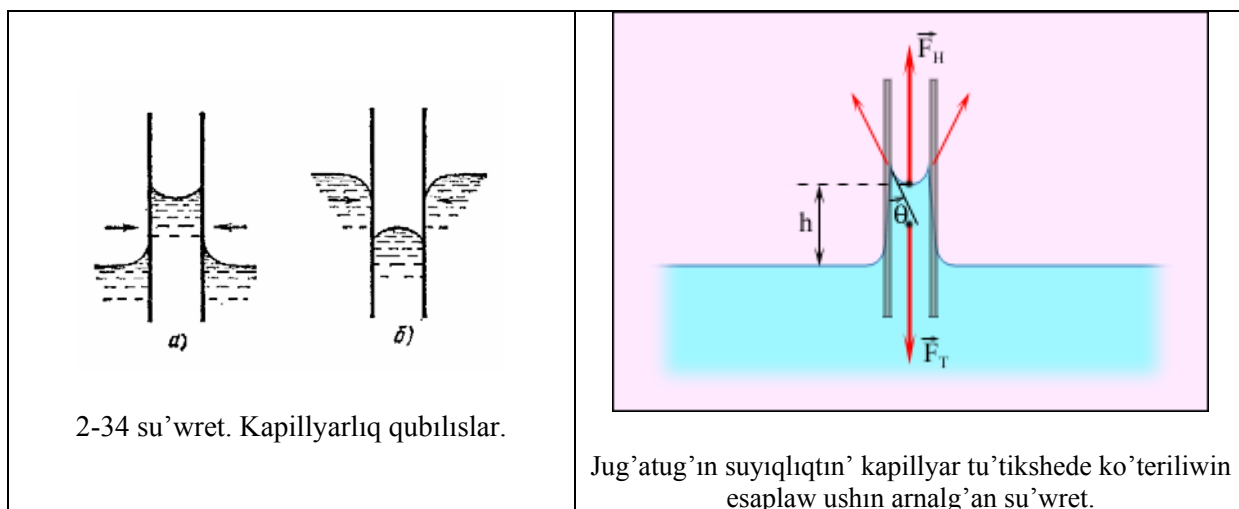
Eger ıdıstın' diywalına suyıqlıq jug'atug'ın bolsa suyıqlıq ko'teriledi. Juqpaytug'ın jag'dayda suyıqlıqtın' qa'ddi to'men tu'sedi. (31-5) formulag'a sa'ykes

$$\rho gh = 2\sigma/R = 2\sigma \cos\theta/r. \quad (31-7)$$

Bul formulada ρ - suyıqlıqtın' tıg'ızlıg'ı, R - suyıqlıq 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 suyıqlıqtın' qa'ddi to'tmenlegen jag'daydag'ı teren'lik te esaplanadı. (31-8)-formuladan biyikliktin' naydın' radiusına kerı proportional ekenligi ko'rinip tur. Kapillyar nay dep atalatug'ın jin'ishke naylarda jug'atug'ın jag'dayda suyıqlıq u'lken biyikliklerge ko'teriledi. Sonlıqtan da qarap atırg'an jag'daydag'ı bet kerimi kapillyar bet kerimi dep ataladı.



§ 2-32. Suyıqlıqlardıń puwlanıwı ha'm qaynawı

Dinamikalıq ten' salmaqlıq. Puw-suyıqlıq sisteması. Suyıqlıqtın' iymeygen beti qasındag'ı toying'an puw basımı. Qaynaw. Asa qızdırılǵ'an suyıqlıq. Ko'bik kameralar. Asa suwıtılǵ'an puw. Vilson kamerası.

Puwlanıw. Joqarıda aytlǵ'anınday molekullardıń bir biri menen ta'sirlesiwinin' sebebinen suyıqlıqtın' betinde bettin' payda bolatug'ınlig'ı talqılandı. Bul bet molekullardıń suyıqlıqtı taslap ketiwine jol qoymaydı. Biraq jıllılıq qozǵ'alıslarının' saldarınan molekullardıń ayırım bo'legi suyıqlıqtı taslap ketkendey jetkilikli tezlikke iye boladı. Bul qubılıs **puwlanıw** dep ataladı. Puwlanıw qa'legen temperaturada baqlanadı, biraq onın' intensivligi temperaturanın' ko'teriliwi menen joqarılaydı.

Dinamikalıq ten' salmaqlıq. Puw-suyıqlıq sisteması. Eger suyıqlıqtı taslap ketken molekullar suyıqlıqtan u'lken aralıqlarg'a qashıqlassa, aqır-ayag'ında barlıq suyıqlıq puwlanıp ketedi. Eger sol molekullar u'lken qashıqlıqlarg'a ketpese. Al bir ıdıstın' ishinde saqlanatug'ın bolsa, protsess basqasha rawajlanadı. Suyıqlıqtı taslap ketken molekullar puwdı payda etedi. Puw molekulları suyıqlıqqa jaqınlag'anda tartısıw ku'shleri ta'sirinde suyıqlıqqa qosılıp puwlanıw kemeyedi.

Puwdın' tıg'ızlıg'ı artqanda belgili bir waqıt ishinde suyıqlıqtı taslap ketken molekulalar sanı sonday waqıt ishinde suyıqlıqqa qayıp 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 basımdıg'ı zattın' agregat halı. Puw zattın' agregat halı bolıp tabılamaydı. Sebebi berilgen temperatura menen basımdı agregat hal suyıqlıq bolıp tabıladı. Usıg'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. Toyınıwg'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 toynbag'an puwg'a qollanıwg'a boladı.

Qaynaw. Suyıqlıqtı qızdırg'anda toying'an puwdın' basımı sırtqı basımg'a ten' bolg'anda suyıqlıq penen toying'an puw arasında ten' salmaqlıq ornaydı. 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 kemeysse qaynaw temperaturası to'menleydi.

Asa qızdırılq'an suyıqlıq. Endi asa qızdırılq'an suyıqlıqtın' payda bolıwın tu'sindiriwge boladı. Eger suyıqlıqtın' quramında basqa qosımtalar ha'm ko'biksheler bolmasa, qaynaw temperaturasına jetkende suyıqlıqta ko'biksheler payda bolıwg'a utılıw 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 qızdırılq'an suyıqlıq arqalı zaryadlang'an bo'lekshe ushıp o'tetug'in bolsa, bul bo'lekshe o'z jolında suyıqlıq molekulaların yamasa atomların ionlastıradı. Na'tiyjede ushıwshı bo'lekshe molekula yamasa atomg'a o'z energiyasınin' bir bo'legin beredi ha'm aqıbetinde suyıqlıqtın' qaynawın, yag'niy ko'bikshelerdin' payda bolıwın boldıradı. Basqa so'z benen aytqanda asa qızdırılq'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 suwtılıtg'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 suwtılıtg'an puw dep atalıwshı metastabil hal ju'zege keledi.

Toying'an puw salqınlatılq'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 toynbag'an puw bolıp tabıladı. Sonlıqtan tamshılar suyıqlıqları tez arada puwlanadı ha'm tamshılar jog'aladı.

Vilson kamerası. Asa salqınlatılğ'an puwda ushıp baratırğ'an zaryadlang'an bo'lekshe o'zinin' jolında puw molekulaların 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'lken orın iyeledi.

Nelikten ionlar kondensatsiya zarodışları bolıp tabıladı? Bul kondensatsiya energiyası, bet energiyası ha'm kulon energiyası balansının' saldarı bolıp tabıladı.

§ 2-33. Osmoslıq basım

Osmoslıq basımın' (diffuziyalıq basımın') payda bolıwı. Osmoslıq basım nızamları.

Osmoslıq basım eritpelerde orın aladı. Sontıqtan bul paragrafta ga'p etiletug'ın ma'seleler eritpeler fizikasına tiyisli ma'seleler bolıp tabıladı.

Eritpe dep eki yamasa birneshe zatlardın' fizikalıq jaqtan bir tekli (yag'nıy gomogen) aralaspasına aytadı.

Fizikalıq bir tekliklik (gomogenlik) molekulalardıń ten'dey aralasıwı menen a'melge asırıladı. Usınday qa'sietleri boyınsha eritpeler mexanikalıq aralaspalardan ayrıladı. Mexanikalıq aralaspada zattın' makroskopiyalıq bo'leksheleri (molekulaları 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 (N_2SO_4 , suyıq)	+ 74.5 kDj/mol.

Ulıwma jag'dayda qattı zatlar suyıqlıqlarda erip bir tekli ortalıq payda etetug'ınlıg'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.I.Mendelev eritpenin' ko'lemine eritkish penen erigen zattın' ko'lemine ten' bolmaytug'ınlıg'ın baqladı. Eriw protsessi jıllılıqtın' jutılıwı yamasa temperaturanın' joqarılawı menen a'melge asadı. Mendelev eritkish penen erigen zattın' belgili bir salmaq qatnaslarına sa'ykes keletug'ın ayırıqsha noqatlardıń bar bolatug'ınlıg'ın anıqladı. Usılardıń barlıg'ı da eritkish penen erigen zat molekulaların' arasında o'z-ara ta'sirlesiwdin' bar ekenligin, bul ta'sirlesiwge belgili bir energiyanın' sa'ykes keletug'ınlıg'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 molekulalarına sa'ykes keletug'ın asa ha'lsiz eritpelerdi qarastıramız. 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.

Osmoshq basımın' payda bolıw mexanizmi. Meyli bazı bir zattın' eritpesi ha'm taza eritkish yarım o'tkiziwshe 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 plenkal arqarına $[Su_2Fe(SN)_6]$ birikpesi kiredi ha'm olar suw molekulaların o'tkeredi, al ko'plegen eritilgen zatları (mısalı qanttı) o'tkermeydi.

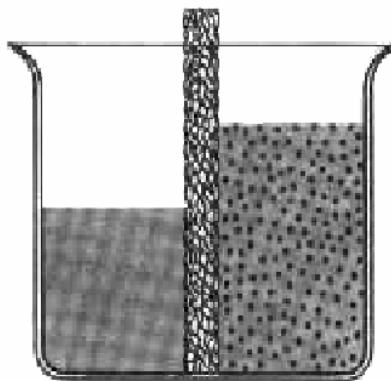
Eritpe taza eritkishten joqarıda ayılğ'anday yarım o'tkizgish diywal arqalı ajratılğ'an bolsa, bul diywal arqalı eritkish molekulaları eritpe turg'an ta'repke o'te baslaydı. **Bul qubılıstı osmos dep ataymız.** Jetkilikli waqıt o'tkennen keyin ten' salmaqlıq hal ornaydı ha'm eritkish molekulaları o'z-ara 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 basımğ'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.

Osmoshq basım nızamları. Suyıq eritpelerdegi erigen zattın' molekulaların siyrekletilgen gaz molekulaları sıpatında qarawğ'a boladı. Olardıñ kinetikalıq energiyası tek temperaturag'a g'a'rezli boladı. Osmoshq basım r siyrekletilgen gazdın' basımına ten' ha'm ideal gazler ushın to'mendegidey formula ja'rdeminde esaplanadı:

$$r = nkT/V = vRT/V. \quad (33-1)$$

V ko'lemindegi erigen zat molekulaların' sanı n arqalı belgilengen. v - molekulaların' moller sanı. (33-1) Vant-Goff nızamın an'g'artadı.



2-35 su'wret.

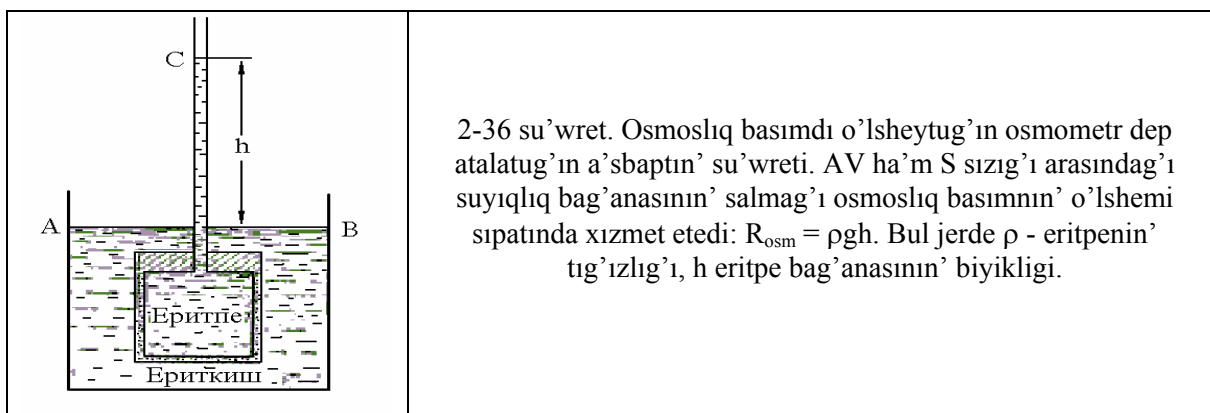
Ha'lsiz eritpenin' osmoslıq basımı eritkish penen erigen zattın' ta'biyatına g'a'rezli emes, al tek g'ana erigen zattın' mollik kontsentratsiyasına baylanıslı.

Vant-Goff formulasınan to'mendegidey juwmaqlar kelip shıg'adı:

1. Turaqlı temperaturada erigen ha'r bir zattın' osmoslıq basımı r sol zattın' kontsentratsiyası S g'a tuwrı proporsional;

2. Konsentrasiya turaqlı bolg'anda erigen ha'r bir zattın' osmoslıq basımı r eritpenin' absolyut temperaturası T g'a tuwrı proporsional;

3. Birdey konsentrasiyalarda ha'm birdey temperaturalarda erigen ha'r tu'rli zatlardıń osmoslıq basımları r olardıń molekulaıq samaqlarına kerı proporsional.



Van-Goff nızamı ten'lemesinin' ideal gaz halı ten'lemesine uqsaslıg'ı eritilgen zattın' molekularının' sol molekularardıń konsentrasiyası joqarı bolmag'anda ideal gaz molekularınday qa'siyetke iye bolatug'ınlıg'ın ko'rsetedi. Sonlıqtan Vag-Goff nızamın bilayınsha aytamız:

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.

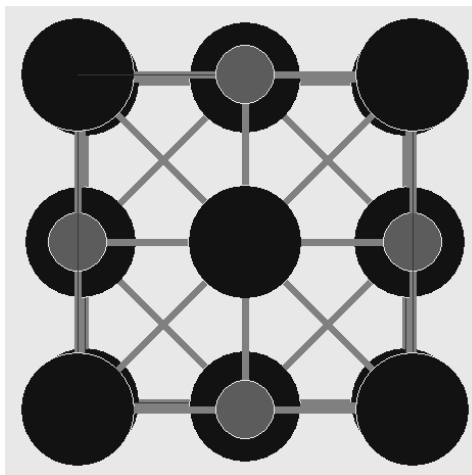
Ha'lsiz eritpelerdin' ko'pshiliginde (33-1)-formula da'l na'tiyjeler beredi. Biraq bir qatar etitpelerde (mısalı organikalıq emes duzlardıń eritpelerinde) basım (33-1) degiden a'dewir artıq bolıp shıg'adı. Sebebi bunday duzlar erigende molekuları bir neshe bo'lekshelerge (ionlarg'a) ıdıraydı. Bunday qubılıs dissotsiatsiyanıw dep ataladı. Na'tiyjede eritpenin' ko'lem birligindegi molekularardıń konsentrasiyası n artadı ha'm sog'an sa'ykes osmoslıq basım artadı.

(33-1)-formulag'a bag'ınatug'ın eritpeler elektr tog'ın o'tkizbeydi, al osmoslıq basımı bul formuladag'ıg'a qarag'anda u'lken bolatug'ın eritpeler elektr tog'ın jaqsı o'tkizedi. Bunday eritpeler a'dette elektrolitler dep ataladı.

§ 2-34. 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 koordinatalar sisteması.

Bul paragrafta biz tiykarınan kristallıq qattı denelerdi qaraymız. Kristallarda atomlar yamasa molekular bir birine salıstırg'anda belgili bir ta'rtipte jaylasadı. Mısal retinde NaCl kristalındag'ı Na^+ yamasa Cl^- ionlarının' jaylasıwları su'wrette ko'rsetilgen (su'wrettin' a'piwayılıg'ı ushın bir sorttag'ı ionlardın' su'wretleri salıng'an). Atomlar yamasa molekular kristalda tıg'ız bolıp jaylasıwg'a umtıladı. Eger kristaldag'ı birdey awhallarda turg'an atomlardı (biz qarap atırg'an jag'daydarda ionlardı) yamasa molekularadı bir biri menen tutastırıp shıqsaq kristallıq pa'njere su'wretin alamız. Bunday jag'dayda atom yamasa molekula pa'njerenin' tu'yini menen almasırladı. Sonlıqtan da kristallıq pa'njere dep kristall ushın keyinirek ga'p etiletug'ın belgili qag'ıydalar tiykarında du'zilgen matematikalıq obraz bolıp tabıladı.



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 qutıshası, 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 molekularlar 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 s qabırg'aları ha'm olar arasındag'ı α , β ha'm γ mu'yeshleri). Bul jag'day to'mendegi su'wrette sa'wlelengen. **a**, **b** ha'm **s** 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. Mısalı tuwrı do'n'gelek tsilindr ko'sheri do'gereginde qansha mu'yeshke burılsa da o'zinin' da'slepki halınday halg'a o'tedi. Bunday tsilindr ko'sherge perpendikulyar bolğ'an qa'legen ko'sherdin' do'gereginde 180° qa burılğ'anda da o'zinin' da'slepki halınday hal menen u'ylesedi. Shar ta'rizli dene alıng'an jag'dayda ol orayı arqalı o'tiwshi qa'legen ko'sher do'gereginde burılğ'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 halınday halg'a tek g'ana ken'isliktegi ko'shiriwler yamasa burıwlar ja'rdeminde o'tpeydi. Mısalı 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 S ha'ripi menen belgileydi.

2). Simmetriya ko'sherleri. Joqarida shar menen tsilindrdegi buriw ko'sherleri haqqında ga'p etilgen edi. Ma'selen tsilindrdin' ko'sherine perpendikulyar bolg'an ko'sherdin' do'geresinde 180° qa burg'anda o'zinin' da'slepki halında halg'a keletug'inlig'ı ayıldı. Bul jag'dayda $360/180 = n = 2$ -ta'rtpili simmetriya ko'sherine iye bolamız. Kristallıq denelerdegi atomlar menen molekullardın' jaylasıwında 1-, 2-, 3-, 4- ha'm 6-ta'rtpili simmetriya ko'sherleri boladı. Mısalı 6-ta'rtpili simmetriya ko'sherinin' do'geresinde figuranı 360° qa burg'anda 6 ret o'zinin' birdey halları arqalı o'tedi.

Kristallıq denelerde 5-, 7- ha'm joqarı ta'rtpili simmetriya ko'sherleri bolmaydı. Biraq son'g'ı waqıtları uglerodtın' quramalı bolg'an modifikatsiyalarında (mısalı S_{60} modifikatsiyası) 5-ta'rtpili simmetriya ko'sherinin' orın alatug'inlig'ı da'llilendi).

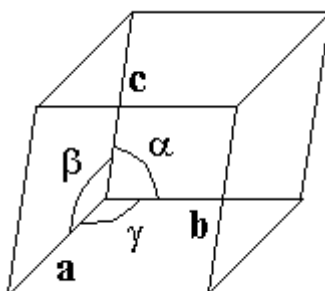
Simmetriya ko'sherlerin 1, 2, 3, 4 ha'm 6 dep belgilew qabıl etilgen. Bunday jag'dayda bul sanlar atlıq bolıp tabıladı. Al simmetriya ko'sherlerinin' ta'rtibi haqqında ayıl'g'anda sannın' keynine - (inshi) belgisi qoyılardı. Demek 1 figuranı o'z do'geresinde 360° qa buriwshı ko'sher bolıp tabılardı.

3). Simmetriya tegislikleri. Eger dene o'z-o'zi menen aynalıq shag'ılıstırıwdın' ja'rdeminde u'ylestiriletug'in bolsa, onda bul aynalıq betti simmetriya tegisligi dep ataydı. Mısalı adam figurasının' shep ta'repi menen on' ta'repi adamnın' ortası arqalı o'tetug'in tegislikte qarata simmetriyalı. Kvadrat bolsa ta'repilerine parallel, kvadrattın' orayı arqalı o'tiwshi eki tegislikke ha'm kvadrattın' diagonalları arqalı o'tetug'in eki tegislikke qarata simmetriyalı. Demek kvadrat 4 dana simmetriya tegisligine iye boladı. Kristallografiyada simmetriya tegisligin m arqalı belgileydi.

Joqarida keltirilgen simmetriya elementleri jabıq simmetriya elementleri dep ataladı. Sebebi bul elementlerdin' ja'rdeminde islengen simmetriyalıq operatsiyalar (shag'ılıstırıwlar ha'm buriwlar) na'tiyjesinde 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 asırıl'g'anda) figura o'z ornında qalmaydı. Bunday simmetriya elementi qatarına birinshi gezekte kristallardag'ı joqarida ayıl'g'an translyatsiyalar kiredi.

Eger kristaldı qurawshı atomlar yamasa molekullardın' bir tuwrı boyınsha dizbegin alıp qarasaq, onda 1 sm uzınlıqta shama menen 10^8 atomnın' jaylasatug'inlig'in ko'remiz. Bunday jag'dayda usı tuwrı boyınsha kristaldı a, b yamasa s aralıg'ına jılistırıp qoyg'anımız benen biz qurılısta bazı bir o'zgeristin' bolg'anlıg'in sezbeymiz. Usınday ko'z-qarastan translyatsiyalardı simmetriya elementleri dep ataymız.



2-38 su'wret. Elementar qutisha. **a, b, s, α, β** ha'm γ lar elementar qutishanın' (kristaldın') turaqlıları bolıp tabılardı.

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 tabılardı.

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'ıtlang'an ha'm S arqalı o'tiwshi 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 qurılǵ'an toparlar simmetriyanın' noqatlıq toparları dep ataladı. Bunday toparlardın' sanı 32. Simmetriyası berilgen toparg'a kiriwshi 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 qurılǵ'an toparlar simmetriyanın' ken'isliktegi toparları dep ataladı. Bunday toparlardın' sanı 230. 1890-jılı birinshi ret bul toparlardı keltirip shıǵ'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. Topardın' eki elementinin' ko'beymesi yamasa qa'legen elementinin' kvadratı usı toparg'a tiyisli element bolıp tabıladı.
2. Topardın' qa'legen u'sh elementi ushın assotsiativlik nızam orınlanadı, yag'nıy $a(vs)=(av)s$.
3. Toparda birlik (neytral) element (e yamasa 1) bolıp, ol $ae=ea=a$ sha'rtin qanaatlandıradı.
4. Toparda qa'legen a elementke keri bolg'an a^{-1} elementi bolıp $aa^{-1}=a^{-1}a=e$ sha'rti orınlanadı.

Kristallografiyalıq koordinatalar sisteması. Kristallardın' qurılısın izertlegende kristallografiyalıq koordinatalar sistemasın qollanıw qabıl etilgen. Bul jag'dayda a'dette X ko'sheri **a**, U ko'sheri **b**, Z ko'sheri **s** translyatsiyasının' bag'ıtında alınadı. Koordinata bası retinde kristallıq pa'njerenin' qa'legen tu'yini alınıwı mu'mkin. Ha'r bir ko'sher boyınsha uzınlıq birliǵi retinde Bragg parallelopipedinin' sa'ykes qabırǵasının' 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 paragraftag'ı birinshi kestede 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'njeredeги tu'yinler kristaldı qurawshı atomlardın', ionlardın' yamasa molekullardıń ten' salmaqlıq haldag'ı orınları bolıp tabıladı. Joqarıda keltirilgen su'wrettegi elementar qutıshanı ken'islikte **a**, **b** yamasa **s** bag'ıtlarında sa'ykes a, b ha'm s 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 iqtıyarlı 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), $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$ vektorları bazislik vektorlar, al usı u'sh vektordın' jıynag'ı pa'njere bazisi dep ataladı. Demek $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$ 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' barlıg'ın qabil etetug'ın bolsa (34-1) menen anıqlang'an radius-vektordın' ushı barlıq tu'yinlerde bolıp shıg'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'njereler Brave pa'njereleri dep atalıp, olar bir birinen elementar qutışhaların' formaları ha'm oraylasıwı boyınsha ayırıladı. Pa'njere tu'yini elementar qutışhaların' to'beleri menen qatar qaptal betlerinde, orayında da bolıwı mu'mkin. Usıg'an baylanışlı qutışhaların' (pa'njerenin') oraylasıwına qaray pa'njereler bılayınsha tto'rtke bo'linedi:

a. Tu'yin tek g'ana elementar bo'lekshenin' to'belerinde jaylasadı. Bunday jag'dayda pa'njereni a'piwiyi pa'njere dep ataymız ha'm R ha'ripi menen belgileyemiz.

b. Tu'yin elementar qutışhanın' to'belerinde 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 ku'sherine perpendikulyar bet oraylassa V pa'njere ha'm Z ko'sherine perpendikulyar bet oraylasqan jag'dayda C pa'njerege iye bolamız.

s. Tu'yin elementar qutışhanın' to'belerinde 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 qutışhaların' 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' qabırg'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 qabırg'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 qurıladı.

Da'slep 8 tu'rli singoniyadag'ı elementar qutışhaların' parametrleri menen tanısamız:

Singoniya	Translyatsiyalar	Mu'yeshler	Pa'njere tipi
Kublıq	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	P, I, F
Tetragonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	P, I
Geksagonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	P
Trigonal (romboedrlık)	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	P
Rombalıq	$a \neq b \neq c, a \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	P, C, I, F
Monoklinlik	$a \neq b \neq c, a \neq c$	$\alpha \neq \gamma \neq 90^\circ, \beta = 90^\circ.$ $\alpha \neq 90^\circ.$	P, V
Trigonallıq	$a \neq b \neq c, a \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$ $\alpha \neq 90^\circ, \beta \neq 90^\circ.$	P

Atomlıq tegisliklerdi belgilew. Kristalda ha'r qaysısının' betinde sheksiz ko'p atomlar joylasqan sheksiz ko'p tegisliklerdi ju'rgiziw mu'mkin. O'z ara parallel bolg'an tegisliklerdi ta'riplew ushin olardin' birewin saylap aliw jetkilikli.

Tuwrı sıızıqlı (tuwrı mu'yeshli bolıwı sha'rt emes) koorrdinalardag'ı qa'legen tegisliktin' ten'lemesi

$$x/|OA| + u/|OV| + z/|OS| = 1$$

tu'rine iye boladı (sızılmada keltirilgen). Joqarıdag'ı formuladag'ı $|OA|$, $|OV|$, $|OS|$ shamaları pu'tin sanlar etip alınıwı kerek. Sonlıqtan

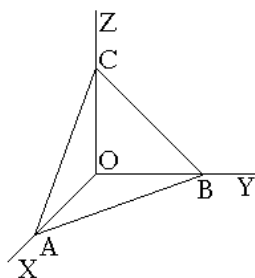
$$x/|OA| + u/|OV| + z/|OS| = 1$$

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 jazıladı.

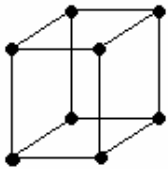
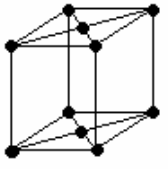
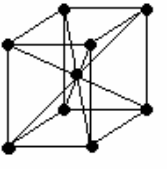
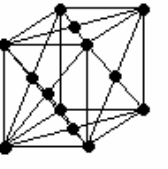
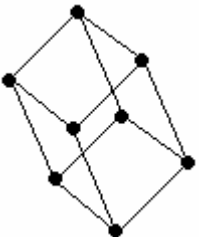
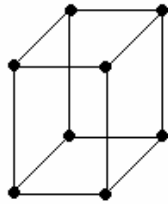
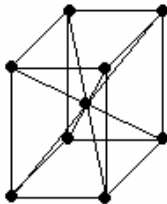
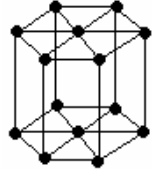
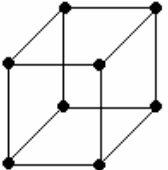
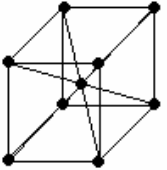
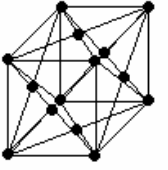
Bag'ıtlardı belgilew. $(hk1)$ kristallografiyalıq tegisliklerine perpendikulyar bolg'an kristallografiyalıq bag'ıt sol ha'ripler menen belgilenedi ha'm kvadrat qawsırmag'a alınadı: $[hk1]$.



2-39 su'wret. Tegisliklerdin' Miller indekslerin tabıwg'a mu'mkinshilik beretug'ın su'wret.

14 tiptegi Brave pa'njereleri haqqında mag'lıwmat

Singoniya	Pa'njere tipii			
	A'piwayı	Bazada oraylasqan	Ko'lemde oraylasqan	Qaptalda oraylasqan
Triklinlik				
Monoklinlik				

Rombaliq				
Trigonallıq (romboedrlik)				
Tetragonallıq				
Geksagonallıq				
Kubliq				

§ 2-35. Qattı denelerdin' jıllılıq sıyımlılıg'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 big'ıtlarg'a qarata sızıqlıq ostsillyator bolıp tabıladi. 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 sıyımlılıg'ı

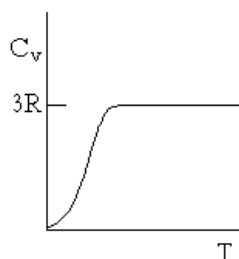
$$S_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V = 3nk. \quad (35-2)$$

Demek qattı denenin' jıllılıq sıyımlılıg'ı turaqlı shama boladı. Eger zattın' molekularının' moli alinatug'ın bolsa, onda $n = N_A$, $nk = R$ - mollik gaz turaqlısı. Ondaı bolsa (35-2) den mollik jıllılıq sıyımlılıg'ının' $3R$ ge ten' ekenligi ha'm temperaturadan g'a'rezsliligi kelip shıg'adı. Bul **Dyulong-Pti nızamı** bolıp tabıladı.

Eksperimentler to'mengi temperaturalarda qattı denenin' jıllılıq sıyımlılıg'ının' $S_V \sim T^3$ nızamı boyınsha nolge umtilatug'inlig'in ko'rsetedi.

Qattı denelerdin' eksperimentlerde aling'an jıllılıq sıyımlılıg'ı su'wrette ko'rsetilgen. Jıllılıq sıyımlılıg'ının' usınday g'a'rezsliligi tek metal emes qattı denelerde orın aladı. Bunday denelerdegi birden bir energiya atom yamasa molekularların' ten' salmaqlıq halı do'gerindegi terbelisleri bolıp tabıladı. Metallarda bolsa erkin elektronlar bolıp, olar da jıllılıq sıyımlılıg'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 sıyımlılıg'ı ku'shli kemeyetug'ın to'mengi temperaturalarda elektronlıq jıllılıq sıyımlılıg'ı en' baslı jıllılıq sıyımlılıg'ına aylanadı.

Eynshteyn modeli. Jıllılıq sıyımlılıg'ının' temperaturag'a g'a'rezsliligin tu'sindiriw maqsetinde A.Eynshteyn 1907-jılı qattı denelerdi payda etetug'ın ostsillyatordın' energiyaların' 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:



2-40 su'wret. Metal emes qattı denenin' jıllılıq sıyımlılıg'ının' temperaturag'a g'a'rezsliligi.

“Elektrodinamika ko'z-qarası boyınsha Plank gipotezaları materiallıq deneler ta'repinen nur energiyası menen almasıw, yag'mıy nur energiyasın shıg'arıw menen jutıw sekiriw menen a'melge asatug'inlig'ı tastıyıqlawg'a alıp keledi. Qala berse Plank tın' birinshi teoriyası boyınsha (1901-jıl) dene energiyanı pu'tin san eselengen $\varepsilon = hv$ 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'zliksiz a'melge asadı... Plank tın' birinshi teoriyası boyınsha absolyut nol temperaturadag'ı energiya nolge, al ekinshi teoriyada shekli shamag'a ten'”.

Xvolson boyınsha “1907-jılı Einstein nin' usı ma'selege qatnası bar birinshi jumısı jariq ko'rdi. Onın' tiykarg'ı pikiri to'mendegidey: denelerdin' molekuları vibratorlar menen jıllılıq ten' salmaqlıg'ında turadı, eki erkinlik da'rejesine iye vibratorların' ha'r bir erkinlik da'rejesine qansha jıllılıq energiyası sa'ykes kelse, molekularların' 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'mıy

$$J = 3R \frac{\beta v}{e^{\beta v/T} - 1}.$$

Bul an'latpadan T boyınsha tuwındı alsaq

$$S_v = 3R \left(\frac{\beta v}{T} \right)^2 e^{\frac{\beta v}{T}} \frac{1}{(e^{\beta v/T} - 1)^2} = 3RF(\beta v) = F(T/\beta v)$$

yamasa

$$S_v = 3R \frac{x^2 e^x}{(e^x - 1)^2} = 3RF(\theta) = 3RF(1/x).$$

formulaların alamız.

Bul formulalar ilimde da'slep jıllılıq sıyımlılıg'ı haqqındag'ı, al keyin jıllılıq qubılısları haqqındag'ı jan'a da'wirdi (erani) ashti. Jıllılıq sıyımlılıg'ı S_v temperatura T nın' anıq tu'rdegi funktsiyası bolıp shıqtı”.

Meyli sıızılıq ostsillyator iye bola alatug'in energiyanın' elementar portsiyası E ge ten' bolsın. Usı energiya fotonnın' energiyası jıyılık penen qanday bolıp baylanısqa bolsa, tap sonday bolıp jıyılık penen baylanışlı 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 sıyımlılıg'ın da'l esaplawda E_0 din' ma'nisi a'hmiyetke iye emes. Sonlıqtan ostsillyator iye bola alatug'in 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:

$$\sum_{n=0}^{\infty} R_n = \exp[-E_0/(kT)] \exp[-E_0/(kT)] A \sum_{n=0}^{\infty} \exp[-nE/(kT)] = 1. \quad (35-6)$$

Endi ostsillyatordın' ortasha energiyasın esaplaw mu'mkin:

$$\langle E \rangle = \sum_{n=0}^{\infty} E_n R_n = E_0 + \{E \sum_{n=0}^{\infty} n \exp[-nE/(kT)]\} / \{ \sum_{n=0}^{\infty} \exp[-nE/(kT)] \}. \quad (35-7)$$

Geometriyalıq progressiya ushın formuladan:

$$\sum_{n=0}^{\infty} \exp[-nE/(kT)] = \{1 - \exp[-E/(kT)]\}^{-1}. \quad (35-8)$$

Bul ten'liktin' 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 sıyımlılıg'ı:

$$S_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V = 3N_A k \left(\frac{E}{kT} \right)^2 * \exp\left(\frac{E}{kT} \right) / \{ \exp\left(\frac{E}{kT} \right) - 1 \}^2. \quad (34-12a)$$

Bul **jıllılıq sıyımlılıg'ı ushın Eynshteyn formulası** bolıp tabıladı. Bul formuladan jetkilikli da'rejede joqarı temperaturalarda (yag'nıy $T \rightarrow \infty$ bolg'anda) $S_V \rightarrow 3R$, al $T \rightarrow 0$ de $S_V \rightarrow 3R \left(\frac{E}{kT} \right)^2 * \exp\left(-\frac{E}{kT} \right) \rightarrow 0$.

Eynshteyn formulası. E «energiyanın' elementar portsiyası» qattı denenin' qa'siyetine baylanışlı boladı. Denenin' «qattılıg'ı» artqan sayın bul energianın' ma'nisi artadı, sebebi terbelis jiyiligi ω nın' artıwı kerek. Bul energianı **Eynshteyn temperaturası** ja'rdeminde bılayınsha tikkeley ta'riplew qabıl etilgen:

$$k\theta_E = E. \quad (35-12b)$$

Endi formula (35-12a) bılay 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 sıyımlılıg'ı $S_V \sim \exp[-E/(kT)]$ - eksponenta boyınsha kemeyiwi kerek, al eksperiment bolsa $S_V \sim T^3$ ekenligin ko'rsetedi. Solay etip

Eynshteyn formulası jıllılıq sıyımlılıg'ın esaplaw ushın jaramaydı. Sonlıqtan bul formula basqa formula menen almasdırılıwı kerek.

Eynshteyn boyınsha qattı dene ha'r birinin' energiyası $E = \hbar\omega$ bolg'an bir birinen g'a'rezsiz sıziqlı ostsillyatorlardın' jıynag'ı bolıp tabıladı. Demek gazdegi molekulalardıń qozg'alısınday qattı

denelerdegi atomlar yamasa molekulların qozg'alısları Eynshteyn boyınsha bir birinen g'a'rezsiz. Bunday modeldin' qabil etiliwinin' o'zi qa'telik.

Qatti denelerdin' atomlarınin' qozg'alısın bir birinen g'a'rezsiz dep qaraw nadurıs bolıp tabıladı. Olardın' kollektivlik o'z-ara ta'sirlesiwın dıqqatqa alıw kerek. Usınday ta'sirlesiwdi esapqa alıw eksperiment penen tolıq sa'ykes keletug'ın jıllılıq sıyımlılıg'ı teoriyasının' payda bolıwın ta'miyinleydi.

Elementar qozıwlar. Qatti deneni quraytıg'ın atomlar sisteması 0 K de en' kishi energiya menen o'zinin' tiykarg'ı halında turadı. 0 K qasındag'ı jıllılıq sıyımlılıg'ın talqılaw ushın sol temperaturada atomlar sisteması iyeley alatug'ın energiyalardıń ma'nisleri tabıw kerek. Energiya beriwidin' na'tiyjesinde bazı bir atom o'zinin' ten' salmaqlıq halnan belgili bir bag'ıtta shıg'adı dep esaplaymız. Usı atomdı o'zinin' ten' salmaqlıq halına iyteriwshi ku'sh qon'ıslas atomlar ta'repinen ta'sir etetug'ın iyteriw ku'shi bolıp tabıladı. Solay etip o'zinin' ten' salmaqlıq halnan 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 qatti denede tolıq tu'rinde tarqaladı. Sonlıqtan qozg'alıs kollektivlik tu'rge iye boladı.

Atomlardın' usınday kollektivlik qozg'alısı qatti denedegi ses tolıqın 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 ω_i jiyiligi modası

$$E_i = \hbar \omega_i. \quad (35-13)$$

energiyasına iye boladı (E_0 qaldırılğ'an). Qatti 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' baylanıslı bolıwı Boltsman bo'listiriliwine bag'ınadı dep esaplaymız ha'm sonlıqtan

$$R_{in} = A \exp[-E_{in}/(kT)] = A \exp[-n \hbar \omega_i/(kT)] \quad (35-15)$$

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 ω_i bolg'an terbelis modası menen baylanıslı energiya ushın jazılğ'an (35-13) formulası usınday modanı kvazibo'lekshe sıpatında qaraw haqqında pikirdi payda etedi. Ses terbelisleri modaları menen baylanısqa usınday kvazibo'lekshe **fonon** dep ataladı. Fonon tu'sinigin paydalanıw talqılawları an'satlastıradı ja'ne matematikalıq esaplawlarda da birqansha jen'illik payda etedi. Fotonlar ushın qollanılğ'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'ın 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'ın kvazibo'leksheler belgili.

Debay modeli. Qattı denelerde ha'r qanday tezliklerge iye boylıq ha'm ko'ldenen' tolqınların taralıwı mu'mkin. Ko'ldenen' tolqınlar 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 tolqınlı ses tolqınların modaları haqqında ayıwıg'a boladı.

A'piwayılıq ushın izotrop qattı dene jag'dayına itibar beremiz. Ha'r bir polarizatsiya ushın modalar sanın esaplaw birdey. Debaydın' jıllılıq sıyımlılıg'ı teoriyası qattı denenin' ses tolqınları modaların esaplawg'a tiykarlang'an.

Jiyiliktı $\omega = 2\pi/T$ ha'm tolqınlıq sandı $k = 2\pi/\lambda$ dep belgileymiz. λ - tolqın uzınlıg'ı, T - terbelis da'wiri. Bunday jag'dayda jiyilik penen tolqın sanı arasındag'ı qatnastı ta'ripleytug'ın

$$\omega = \pm vk \quad (35-17)$$

formulası **dispersiyalıq qatnas** dep ataladı. Bul formuladag'ı $v^2 = \partial r / \partial \rho$ - basımnan tıg'ızlıq boyınsha aling'an dara tuwındı, v - tolqının' tarqalıw tezligi. (35-17) de ko'ldenen' ha'm boylıq tolqınlar 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 tolqınlıq sanlar belgili bolg'anda modalar jiyiliklerin ha'm sol jiyiliklerge sa'ykes ha'r bir modanın' energiyalarının' ma'nislerin anıqlawg'a mu'mkinshilik beredi.

Modalar sanın anıqlaw. Shekli o'lshemlerge iye bolg'an denelerde turg'ın tolqınlar payda boladı. Denenin' shegarası erkin terbeledi ha'm bul jerde hesh qanday kernewler payda bolmaydı. Ko'lemi l^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'ın tolqınlardı qaraymız. © arqalı terbeliwshi noqattın' ten' salmaqlıq haldan awısıwın belgileymiz.

X ko'sheri bag'ıtında v tezligi menen tarqalıwshi tolqındı ta'ripleytug'ın 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:

$$\left. \frac{\partial \xi}{\partial x} \right|_{x=0 \text{ ha'm } x=l} = 0. \quad (35-19)$$

(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 ω ha'm k dispersiyalıq qatnas (35-17) arqalı baylanısqan. (35-19) din' qanaatlandırılıwı ushın (35-20) da $A = 0$ dep esaplaw kerek ha'm k g'a $k_1 = n\pi$ sha'rti qoyıladı. Bul jerde $n = 1, 2, \dots$ Aling'an qatnaslar turg'ın tolqınlardıń payda bolıwına sa'ykes keletug'ın 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'ın tolqınlardıń to'mendegidey tolqınlıq sanların alamız:

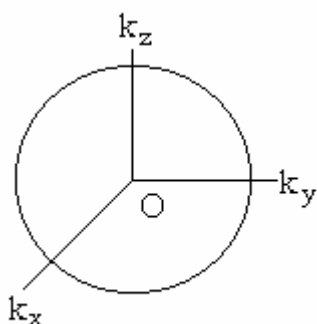
$\begin{aligned} k_x &= \pi n_x / L & (n_x &= 1, 2, \dots), \\ k_y &= \pi n_y / L & (n_y &= 1, 2, \dots), \\ k_z &= \pi n_z / L & (n_z &= 1, 2, \dots). \end{aligned}$	(35-21)
--	---------

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) noqatlarının 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 sanlarg'a sa'ykes keliwshi modalar sanı

$$dN = \Delta n_x \Delta n_y \Delta n_z = (1^3/\pi^3) dk_x dk_y dk_z. \quad (35-22)$$

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'lken.



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

$$dN = \frac{4\pi L^3}{(2\pi)^3} k^2 dk. \quad (35-23)$$

2 Bul formulada 4π sferalıq koordinatalarda esaplaw-41-su'wret.

lardın ju'rgizilip atırg'anlıg'ın an'latıw ushın bo'limindegi 2π menen arnawlı tu'rde qısqartılmağ'an. Endi (35-19) dispersiyalıq qatnasınan paydalanamız. Bul qatnastan

$$k^2 dk = (1/v^3) \omega^2 d\omega. \quad (35-24)$$

Demek ω 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 kontsentratsiyasınıń 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'ziksiz dep esaplandı. Uzunlıg'ı atomlar arasındag'ı ortasha qashıqlıqlardan a'dewir u'lken bolg'an, al atomlardın' ten' salmaqlıq haldan awısıwı u'lken bolmag'an tolqınlar ushın (34-28) durıs na'tiyje beredi. Usı jag'day qattı denelerdin' to'mengi temperaturalarda g'ı jıllılıq sıyımlılıg'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'lken ma'niske iye ha'm joqarı jiyilikli modalardıń ortasha sanı eksponentsial az. Sonlıqtan bul modalardıń ulıwma energiyag'a qosqan u'lesi de az. Sonlıqtan (35-28)-formulanı joqarı jiyilikli modalar ushın paydalanıwg'a boladı.

To'mengi temperaturalarda g'ı jıllılıq sıyımlılıg'ı. Jıllılıq energiyası menen baylanısқан terbelislerdin' barlıq modalarınan' tolıq energiyası

$$U = \int_0^\infty \langle n(\omega) \rangle \rho(\omega) \hbar\omega d\omega = \frac{4\pi L^3 \hbar}{(2\pi)^3} \left(\frac{1}{v_b^3} + \frac{2}{v_k^3} \right) * \int_0^\infty \frac{\omega^3 d\omega}{\exp[\hbar\omega/(kT)] - 1} =$$

$$= \frac{4\pi L^3}{(2\pi \hbar)^3} \left(\frac{1}{v_b^3} + \frac{2}{v_k^3} \right) (kT)^4 \int_0^\infty \frac{\xi^3 d\xi}{e^\xi - 1}. \quad (35-29)$$

$\int_0^\infty \frac{\xi^3 d\xi}{e^\xi - 1}$ integralı kompleks o'zgeriwshi funksiya ları usılları menen esaplanıwı mu'mkin ha'm ol $\pi^4/15$ ke ten'.

(34-29) jıllılıq sıyımlılıg'ın esaplawg'a mu'mkinshilik beredi:

$$S_v = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_v \sim T^3. \quad (35-30)$$

Jıllılıq sıyımlılıg'ının' temperaturadan usınday g'a'rezliligi 0 K ge jaqın temperaturalarda g'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 sıyımlılıg'ına qosatug'ın u'lesi haqqındag'ı eskertiwlerdi esapqa alıp bul formulanı joqarı jiyilikli tolqınlarg'a qollang'anda da u'lken qa'telik jiberilmeytug'inlig'ın an'g'arıwg'a boladı. Sonlıqtan bul formulanı en' u'lken bolg'an ω_{\max} jiyiliklerine shekemgi tolqınlar ushın qollanamız. Bunday jag'dayda modalardıń tolıq sanı $3N_A$ g'a ten' bolıwı kerek. Demek

$$3N_A = \int_0^{\omega_{\max}} \rho(\omega) d\omega. \quad (35-31)$$

Jiyilik ω_{\max} nın' ma'nisi materialdın' serpinli qa'siyetlerine baylanıslı. Sonın' menen birge ω_{\max} shaması polyarizatsiyanın' 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

$$\omega_{\max} = 2\pi \langle v \rangle \sqrt[3]{\frac{3N_A}{-\pi L^3}} \quad (35-32)$$

ekenligine iye bolamız. Bul jerde $\langle v \rangle$ shaması $(\frac{1}{v_b^3} + \frac{2}{v_k^3}) = 3/(\langle v \rangle)^3$ formulası ja'rdeminde alıng'an sestin' ortasha tezligi. (35-31) ja'rdeminde alıng'an maksimalıq jiyilikti Debay temperaturası θ_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 jıllılıq sıyımlılıg'ı. (35-29) dag'ı U esaplang'anda ω_{\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 $\langle v \rangle (1/v_b^3 + 2/v_k^3) = 3/(\langle v \rangle)^3$ formulası ja'rdeminde esaplanadı.

$$\xi = \frac{\hbar\omega}{kT} \quad (35-35)$$

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. Jıllılıq sıyımlılıg'ın (35-35) ti integrallaw ja'rdeminde tabıladı. $T \ll \theta_D$ bolg'anda integraldın' joqarg'ı shegi ∞ 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 temperaturalardaǵı jıllılıq sıyımlılıǵı ushın Dyulong-Pti nızamı $S_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V = 3R$ di alamız.

§ 2-36. Qattı denelerdin' jıllılıq ken'eyiwi

Temperatura joqarılag'anda ko'pshilik qattı denelerdin' ko'leminin' u'lkeyetug'ınılıǵı 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 baylanışlı ekenligi ha'mmege tu'sinikli. demek temperaturanın' o'siwi atomlar arasındag'ı qashılıqların' o'siwine alıp keledi dep juwmaq shıǵaramız. Al qızdırg'anda atomlar arasındag'ı qashılıqtıq u'lkeyiwi qanday sebeplerge baylanışlıW degen soraw qoyıladı.

Kristaldın' temperaturasınıń artıwı menen atomlardın' jıllılıq terbelislerinin' energiyası da artadı. Na'tiyjede bul terbelislerdin' amplitudaları u'lkeyedi.

Eger atomlardın' terbelisi garmonikalıq bolg'anda, onda qon'ısılas 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 aralıǵı atomlar arasındag'ı en' to'men temperaturalardaǵı ortasha qashılıqqa sa'ykes keledi. Bul jag'dayda terbelis qatan' garmonikalıq boldı. Temperaturanın' o'siwi menen atomnıń da energiyası o'sedi. Sonlıqtan da'slep k1m sızıǵı boyınsha terbelis jasaytug'ın atom k'1'm' sızıǵı boyınsha terbelis jasay baslaydı. Bul sızıqlardıń ortası (qara noqatlar menen ko'rsetilgen) R_0 shamasınan u'lken boladı.

Su'wrette temperatura qanshama joqarı bolsa energiya U dın' qa'disinin' joqarılaytug'ınılıǵı ha'm sog'an sa'ykes atomlar arasındag'ı ortasha qashılıqtın' u'lkeyetug'ınılıǵı 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.

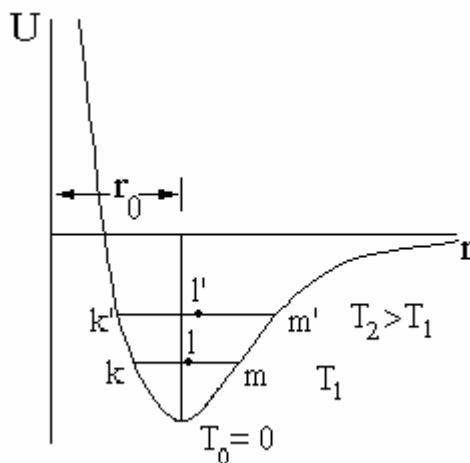
Demek **atomlardın' terbeliwindegi angaromnizmnin'** saldarman jıllılıq ken'eyiwi ju'zege keledi eken. Kristallıq denelerdi quraytug'ın atom yamasa molekulalar garmonikalıq terbelis jasaytug'ın bolg'anda jıllılıq ken'eyiwi bolmag'an bolar edi.

Jıllılıq ken'eyiwi sanlıq jaqtan sızıqlı ha'm ko'lemlik ken'eyiw koeffitsientleri menen ta'riplenedi. Meyli 1 uzınılıǵındag'ı dene temperatura ΔT shamasına ko'terilgende o'z uzınılıǵın ΔQ shamasına o'zgetetug'ın bolsın. Sızıqlı ken'eyiw koeffitsienti bılay anıqlanadı:

$$\alpha = \frac{1}{l} \frac{\Delta l}{\Delta T}.$$

Demek sızıqlı ken'eyiw koeffitsienti temperatura bir gradusqa o'zgergendegi dene uzınılıǵının' salıstırmalı o'zgerisine ten' eken. Tap sol sıyaqlı ko'lemlik ken'eyiw koeffitsienti β 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'ınloıg'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.

Kristallardın' anizotropiyasının' saldarınan ha'r qıylı kristallografiyalıq bag'ıtlarda sıızqlı 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'zgerledi. 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 α_1 , α_2 ha'm α_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)

$$\alpha_1 = \alpha_2 \neq \alpha_3 \text{ ha'm } \beta = 2\alpha_1 + \alpha_3.$$

Kristallardın' sıızqlı 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 baylanışlı o'zgeredi ha'm temperatura tu'menlegende α menen β koeffitsientleri temperaturanın' kubına proporsional kishireyedi ha'm temperatura nolge umılğ'anda kristallardın' jıllılıq sıyımlılıg'ı sıyaqlı olar da nolge umıladı. Bul jag'day su'wrette ko'rsetilgen $T = 0$ noqatına sa'ykes keledi.

Temperatura absolyut nolge umtilg'anda jıllılıq ken'eyiwınin' de, jıllılıq sıyımlıg'ının' da nolge umtılwı tan' qalarlıq na'rse emes. Sebebi bul fizikalıq qa'siyetlerdin' ekewi de atomlardın' terbelisi menen baylanıslı. Sonlıqtan jıllılıq ken'eyiwı menen jıllılıq sıyımlılıg'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'eyiwı koeffitsientinin' atomlıq jıllılıq sıyımlılıg'ına qatnası temperaturadan g'a'rezsiz turaqlı shama bolıp tabıladı.

Qattı denelerdin' jıllılıq ken'eyiw koeffitsientleri

Zat	α	Zat	α
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	$28 \cdot 10^{-6}$

§ 2-37. Ko'shiw protsesleri

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 qoyılǵ'an sistema joqarı itimallıqqa iye ten'salmaqlıq halǵ'a o'tiwge umtıladı. Usının' saldarınan sistemanı ta'riplewshi parametrlr 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 qoyılǵ'an sistema ten' salmaqlıq halına o'tiwge umtıladı. Usının' na'tiyjesinde sistema parametrleri ten' salmaqlıq halǵ'a sa'ykes keliwshi ma'nislerine jetkenshe o'zgeredi. Bul protsess sa'ykes molekulalıq belgilerdin' ko'shiwi sıpatında ta'riplenedi. Sistemanın' ten' salmaqlıq halǵ'a jetiwi ushın za'ru'r bolg'an waqıt **relaksatsiya waqıtı** dep ataladı.

Sistemanın' Maksveldin' ten' salmaqlıq bo'listiriliwinen awıtqıwı ha'r qanday parametrlr boyınsha ju'redi. Bul parametrlr ushın ha'r qıylı relaksatsiya waqıtı orın aladı. Mısalı gazdin' quramındag'ı ha'r qanday sorttag'ı molekulalar kontsentratsiyaların', tıg'ızlıqlardın' ha'm basqa da parametrlerdin' ten' salmaqlıq halǵ'a o'tiwi ha'r qıylı waqıt aralıqlarında bolatug'inlıg'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 sistemanin' bir bo'liminen ekinshi bo'limine jilliliqtin' qozg'alıwı ju'zege keledi. Usınday qozg'alıstar menen baylanıslı bolg'an jilliliqtin' ko'shiriliwi **jillılıq o'tkizgishlik** dep ataladı.

Gazlerdin' jillılıq o'tkizgishligi. Eger gaz bir tekli qızdırılǵ'an bolmasa (yag'nıy gazdin' bir bo'liminde temperatura joqarı, al ekinshi bir bo'liminde temperatura to'men) temperaturanın' ten'lesiwi baqlanadı: gazdin' ko'birek qızdırılǵ'an bo'limi salqınlaydı, al salqın bo'liminin' temperaturası joqarılaydı. Bul qubılıs gazdin' ko'birek qızdırılǵ'an bo'liminen kemirek qızdırılǵ'an bo'limine jilliliqtin' ag'ısı menen baylanısqan. Usınday bolıp gazdegi (basqa da denelerdegi) jillılıq ag'ısının' payda bolıwına **jillılıq o'tkizgishlik** dep ataymız. A'lbette, jillılıq ag'ısı gaz molekularının' ilgerilemeli qozg'alıslarındag'ı soqlıǵ'ısıwları na'tiyjesinde a'melge asadı. Suyıqlıqlarda bolsa jillılıq ag'ısı terbeliwshi molekularaldın' soqlıǵ'ısıwı na'tiyjesinde ju'zege keledi. Joqarı energiyag'a iye molekularlar u'lken amplitudag'a iye terbelislerge qatnasadı. Olar amplitudaları kishi molekularlar menen soqlıǵ'ısqanda olardı ku'shlierek terbeltedi ha'm o'z energiyasının' bir bo'limin beredi.

Jillılıq ag'ısı bag'ıtı temperaturanın' to'menlew bag'ıtına sa'ykes keledi. Ta'jiriyebe jillılıq ag'ısı Q dın' temperatura gradientine proporsional ekenligin ko'rsetedi, yag'nıy

$$Q = - \chi (dT/dx).$$

Bul an'latpadag'ı χ jillılıq o'tkizgishlik koeffitsienti dep ataladı. Jillılıq ag'ısı dep maydannın' bir birligi arqalı waqt birliginde ag'ıp o'tetug'in jillılıq mug'darin tu'sinemiz.

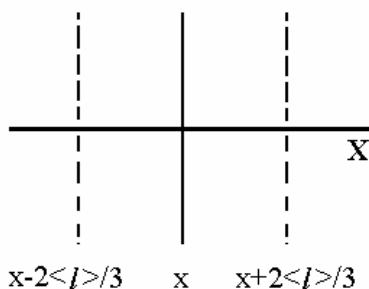
SI birlikler sistemasında jillılıq o'tkizgishlik koeffitsienti $Dj/m^2 \cdot s \cdot K$ yamasa $Vt/m^2 \cdot K$ birligine, al SGS sistemasında $erg/sm^2 \cdot s \cdot K$ birligine iye. Texnikada bolsa χ ushın $kDj/m^2 \cdot saat \cdot K$ o'lishem birligi ko'birek qollanıladi.

Diffuziya. Ten' salmaqlıq halda fazanı qurawshı ha'r bir komponentinin' tıǵ'ızlıqları ha'r bir noqatta birdey ma'niske iye boladı. Tıǵ'ızlıqtın' ten' salmaqlıq haldan awıttıwı 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 salıstırǵ'anda tınıshlıqta turadı. Olardın' biri basqa bo'limlerge salıstırǵ'anda qozg'alısqa keltirilgen jag'dayda usı qozg'alıwshı bo'limnin' tezligin kemeytiwge bag'darlang'an ku'shleypayda boladı. Yag'nıy **tormozlanıw** yamasa **jabısqaqlıq** payda boladı dep aytamız. Gazlerdegi jabısqaqlıq (tormozlanıw) qozg'alıwshı ha'm qozg'alımaytug'in qatlamlar (bo'limler) arasındag'ı impulsler almasıwǵ'a (yag'nıy ta'rtplesken qozg'alıs impulsinin' ko'shiwine) alıp kelinedi.

Sonlıqtan gazler menen suyıqlıqlardag'ı su'ykelis ku'shlerinin' payda bolıwı ko'shiw protseslerine, atap aytqanda molekularaldın' ta'rtplesken qozg'alısı impulsınun' 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'in 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'alısının' 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 belgileyemiz. 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) minaday tu'rge iye boladı:

$$I_G = -\frac{1}{3}n_0 \langle v \rangle \langle l \rangle \frac{C_v}{N_A} \frac{\partial T}{\partial x} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (37-6)$$

$$\lambda = \frac{1}{3}n_0 \langle v \rangle \langle l \rangle \frac{C_v}{N_A} = \frac{1}{3}\rho \langle v \rangle \langle l \rangle c_v \quad (37-7)$$

jıllıq o'tkizgishlik dep ataladı. $\rho = n_0 m$, $s_v = S_v / (N_A m)$ shamaları sa'ykes gazdin' tıg'ızlıg'ı ha'm turaqlı ko'lemdegi gazdin' salıstırmalı jıllıq sıyımlılıg'ı. (37-6) **jıllıq o'tkizgishlik ushın Fure ten'lemesi** yamasa **Fure nızamı** dep ataladı.

Jıllıq 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 «Jıllıqtın' analitikalıq teoriyası» kitabında tamamlandı.

Jıllıq 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'latıwıg'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 jıllıq sıyımlılıg'ı S_v da bir birinen az parqlanadı. Sonlıqtan berilgen kontsentratsiyalarda jıllıq o'tkizgishlik tiykarınan molekuların' ortasha tezligi $\langle v \rangle$ dan g'a'rezli bolıp shıg'adı.

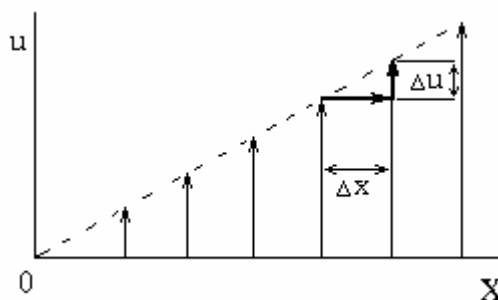
Na'tıyjede jen'il gazler awır gazlerge qarag'anda a'dewir u'lken jıllıq o'tkizgishlikke iye boladı.

Mısalı a'dettegi jag'daylarda kislorodtın' jıllıq 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 jıllıq o'tkizgishlik basımg'a g'a'rezli emes, al temperarutanın' kvadrat korenine proporsional o'zgeredi. Bul jag'daylar eksperimentte tastıyqlanadı.

Jabısqaqlıq. Joqarıda aytlıg'anday jabısqaqlıq yamasa gazlerdegi ishki su'ykelis gaz qatlamlarınin' qozg'alısı bag'ıtında molekular impulslerin ko'shiriwge baylanıslı payda boladı. Su'wrette X ko'sherine perpendikulyar bolg'an u qatlamlarınin' tezlikleri vektorları ko'rsetilgen. Iqtıyarlı 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 Δu ge parqlanatuğ'ın qatlamnın' qalın'lıg'ı Δx dep belgilengen.



2-44 su'wret. Jabisqaqlıqtın' payda bolıw mexanizmi.

Jıllılıq 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'rtpili tu'rdegi qozg'alıstın' mu impulsın alıp o'tedi. Usınday impuls almasıwdın' na'tiyjesinde kishi tezlik penen qozg'alıwshı qatlamnıń tezligi u'lkeyedi. Al u'lken tezlik penen qozg'alıwshı qatlamnıń 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 bolıwınan' ma'nisi usınnan ibarat.

Gazdın' bir biri menen su'ykelisetug'ın betlerinin' bir birligine sa'ykes keliwshi su'ykelis ku'shin τ arqalı belgileymiz. O'z gezeginde τ tezlik bag'ıtına perpendikulyar bag'ıttag'ı ta'rtpilesken qozg'alıs impulsınan' ag'ısına ten'. Bul jag'dayda

$$G = \mu u \quad (37-8)$$

ha'm (37-4) mınaday tu'rge enedi:

$$I_G = -\frac{1}{3} n_0 \langle v \rangle \langle l \rangle m \frac{\partial u}{\partial x} = -\theta \frac{\partial u}{\partial x} = \tau. \quad (37-9)$$

Bul jerde

$$\eta = \frac{1}{3} n_0 \langle v \rangle \langle l \rangle m = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle l \rangle \quad (37-10)$$

dinamikalıq jabisqaqlıq dep ataladı. $\rho = n_0 m$ - gazdın' tıg'ızlıg'ı. τ dın' belgisi u'lkenirek tezlik penen qozg'alıwshı qatlamlarg'a ta'sir etiwshi su'ykelis ku'shleri tezlikke qarama-qarsı bag'ıttang'anlıg'ın esapqa alg'an.

Bul jag'dayda da $n_0 \langle l \rangle = 1/\sigma$ basımg'a g'a'rezli emes, al $\langle v \rangle \sim T^{1/2}$ shaması da basımnan g'a'rezsiz. Sonlıqtan dinamikalıq jabisqaqlıq basımg'a baylanıslı emes, al temperaturanın' kvadrat korenine baylanıslı 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 kerı proporsional o'zgeredi, al molekulalar kontsentratsiyası basımg'a proporsional. Molekula ta'repinen alıp ju'rilgen ta'rtpilesken qozg'alıs impulsı erkin ju'riw jolına tuwra proporsional (yag'nıy basımg'a kerı proporsional). Impuls alıp ju'riwshı molekulalardıń kontsentratsiyası basımg'a tuwra proporsional bolg'anlıqtan birligi bir waqıt ishinde ha'm ko'lemdegi

molekulalar ta'ripinen alıp o'tilgen impuls basimg'a baylanissız bolıp shıg'adı. Bul juwmaq eksperimentte jaqsı tastıyıqlanadı.

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

$$I_{n_1} = -\frac{1}{3}n_0 \langle v \rangle \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{n_1}{n_0} \right) = -D \frac{\partial n_1}{\partial x}. \quad (37-12)$$

Bul jerde

$$D = \frac{1}{3} \langle v \rangle l \quad (37-13)$$

diffuziya koeffitsienti dep ataladı. (37-12) ten'lemesi Fik ten'lemesi dep ataladı.

Temperaturanın' belgili ma'nisinde $\langle v \rangle$ shaması turaqlı shama bolıp tabıladı., al $1/r$. Demek turaqlı temperaturada $D \propto 1/r$. Ekinshi ta'repten turaqlı basımda $\langle l \rangle \propto T$, al $\langle v \rangle \propto T^{1/2}$. Demek turaqlı basımda $D \propto T^{3/2}$. Bul juwmaqlar eksperimentte jetkilikli da'rejede tekserilgen. $D \propto 1/r$ qatnasın $Dr = \text{const}$ dep jazg'an qolaylı. Bul eksperimentte ju'da' tıg'ız bolmag'an gazlerde basımnın' ken' intervalında da'l tastıyıqlanadı (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 s_v arqalı turaqlı ko'lemdegi jıllılıq sıyımlılıg'ı, al ρ arqalı zattın' tıg'ızlıg'ı belgilengen.

QOSIMShALAR

R.Feynman boyinsha termodinamika nızamları

Birinshi nızam

Sistemag'a berilgen jıllılıq + sistema u'stinen islengen jumıs = cistemanın' ishki energiyasının' o'simi:

$$dQ + dW = dU.$$

Ekinshi nızam

Birden bir na'tiyjesi rezervuardan jılılıq alıp onı jumısqa aylandıratug'ın protsesstin' bolıwı mu'mkin emes.

T_1 temperaturasında Q_1 jılılıg'ın alıp T_2 temperaturasında Q_2 jılılıg'ın beretug'ın 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 Δl jılılıg'ı kelip tu'setug'ın bolsa, ondı usı sistemanın' entropiyası $\Delta S = \Delta Q/T$ shamasına artadı.

Eger $T = 0$ bolsa $S = 0$ (u'shinshi nızam).

Qaytımlı protsesslerde sistemanın' barlıq bo'limlerinin' (jılılıq rezervuarların da esapqa alg'anda) entropiyası o'zgermeydi.

Qaytımlı bolmag'an o'zgerislerde sistema entropiyası barqulla o'sedi.