

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

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

Uliwma fizika kafedrası

B. A'bdikamalov

MOLEKULALIQ FIZIKA

pa'ni boyınsha lektsiyalar tekstleri

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

İnternettegi adresi www.abdikamalov.narod.ru

No'kis 2007

Mazmuni

| | |
|---|---------|
| Mexanika ha'm molekulyar fizika kurslari ushın jazılǵ'an ulıwmalıq kirisiw | 3 |
| § 2-1. Ko'p bo'lekshelerden turatug'in sistemalar dı 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. Makrohollar itimallıǵ'ı. | 27 |
| § 2-6. Fluktuatsiyalar. | 33 |
| § 2-7. Maksvell bo'listiriliwi. | 37 |
| § 2-8. Basım | 45 |
| § 2-9. Temperatura | 47 |
| § 2-10. Boltsman bo'listiriliwi. | 49 |
| § 2-11. Energiyanıń erkinlik da'rejesi boyınsha bo'listiriliwi. | 54 |
| § 2-12. Broun qozǵ'alısınan ma'nisi. | 56 |
| § 2-13. Maksvell-Boltsman bo'listiriliwi. | 57 |
| § 2-14. Termodinamikanıń birinshi baslaması. | 60 |
| § 2-15. Differentsial formalar ha'm tolıq differentsiallar. | 64 |
| § 2-16. Qaytımlı ha'm qaytımsız protsessler. | 66 |
| § 2-17. Jıllılıq sıyımlılıǵ'ı. | 68 |
| § 2-18. Ideal gazlerdegi protsessler. | 75 |
| § 2-19. Ideal gaz entropiyası. | 83 |
| § 2-20. Tsiklik protsessler. | 89 |
| § 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. | 111 |
| § 2-26. Fazalar ha'm fazalıq o'tiwler. | 116 |
| § 2-27. Gaz halınan suyıq halǵ'a o'tiw. | 120 |
| § 2-28. Klapeyron-Klauzius ten'lemesi. | 121 |
| § 2-29. Van-der-Vaals ten'lemesi. | 124 |
| § 2-30. Djoul-Tomson effekti. | 128 |
| § 2-31. Bet kerimi. | 133 |
| § 2-32. Suyıqlıqlardıń puwlanıwı ha'm qaynawı. | 137 |
| § 2-33. Osmoslıq basım. | 139 |
| § 2-34. Qattı denelerdin' simmetriyası. | 141 |
| § 2-35. Qattı denelerdin' jıllılıq sıyımlılıǵ'ı. | 148 |
| § 2-36. Qattı denelerdin' jıllılıq ken'eyiwi. | 156 |
| § 2-37. Ko'shiw protsessleri. | 159 |
| Qosımshalar | 164-198 |

Mexanika ha'm molekulaliq fizika kurslari ushin jazilg'an uliwmalıq kirisiw

Uliwma fizika kursının «Mexanika» ha'm «Molekulalıq fizika» bo'limleri boyınsha lektsiyalar mazmunı O'zbekstan Respublikası universitetlerinin fizika qanunligi studentleri ushin duzilgen oqıw bag'darlaması tiykarında duzildi. Kursti u'yreniw barısında studentler noqat kinematikasınan baslap materiallıq noqatlar sisteması kinematikası, dinamikanın barlıq tiykarı nızamları ha'm da'stu'rge aylang'an joqarı oqıw orınları mexanikası materialları menen tanısadı.

Kursti o'tiw barısında relyativistlik mexanikag'a adewir itibar berilgen. Studentler Lorents tu'rlandırılari ha'm onnan kelip shıg'atug'ın na'tiyjeler, relyativistlik qozg'alıs ten'lemesi, joqarı tezlikler ushin saqlanıw nızamların tolıg'ıraq u'yrenedi.

Matematikalıq an'latpalardı jazıw kitaplarda qollanılatug'ın shriftlarda a'melge asırılğ'an. Vektorlar juwan ha'riplerde jazılğ'an. Mısalı \mathbf{v} tezlik vektorına sa'ykes keletug'ın bolsa, v sol vektordın san ma'nisin beredi.

Bo'lshek belgisi retinde ko'birek / belgisi qollanılg'an. Biraq tiyisli orınlarda $\frac{1}{\mu}$ yamasa $\frac{1}{2}$ tu'rdegi jazıwlar da paydalanıladı. Sol sıyaqlı tuwındılardı belgilew ushin da eki tu'rli jazıw usılı keltirilgen. Mısali d/dt yamasa $\frac{d}{dt}$ (dara tuwındılar jag'dayında $\frac{\partial}{\partial t}$) belgileri. Bul jazıwların barlıg'ı da lektsiya tekstlerin oqıwdı jen'illestiriw ushin paydalanılğ'an.

Kursta ko'p sanlı bo'lekshelerden turatug'ın sistemalardı u'yreniw din matematikalıq tiykarları, molekulaların ha'r qiyli parametrlar boyınsha bo'listirililari adewir orın aladı. Sonın na'tiyjesinde student statistikalıq fizikag'a tikkeley baylanisli bolg'an bilimlerde u'yrenedi. Bunnan keyin fizikadag'ı termodinamikalıq usıllardı o'zlestiriw baslanadı. Bul jerde termodinamikanın baslamaları ha'm olardan kelip shıg'atug'ın na'tiyjeler tolıq ko'lemde keltirilgen.

Barlıq «Molekulalıq fizika» kurslarındag'ı day molekulalıq o'z-ara ta'sir etisetug'ın real gazler fizikasına adewir diqqat awdarılğ'an. Bul jerde barlıq na'tiyjeler tiykarınan Van-der-Vaals ten'lemesinin ja'rdeminde keltirilip shıgarılğ'an. Qattı denelerdin qurılısındag'ı simmetriyalıq nızamlıqlar, qattı denelerdin jillılıq sıyımılıg'ı mashqalaları tolıg'ı menen sholing'an. «Molekulalıq fizika» bo'limi ko'shiw protsesslerin u'yreniw menen juwmaq lanadı.

Lektsiyalar tekstlerinde za'ru'rli bolg'an formulalar tiykarınan SI ha'm SGS sistemalarında jazılğ'an.

Lektsiyalar tekstleri eki bo'limge (mexanika ha'm molekulalıq fizika) bo'lingen. Ha'r bir bo'limde paragraflar menen formulalar o'z aldına nomerlengen. Mısalı § 1-10 paragrafi mexanika bo'liminin 10-paragrafin, § 2-10 bolsa molekulalıq fizika bo'liminin 10-paragrafin an'latadı.

Lektsiyalardı du'ziwde tariyxıy a'debiyat ken' tu'rde paydalanıldı. Ma'selen Nyuton nızamları bayan etilgende onın 1686-jılı birinshi ret jariq ko'rgen «Natural filosofiyanın matematikalıq baslaması» («Natural filosofiya baslaması» dep te ataladı) kitabınan aling'an mag'lıwmatlar paydalanıladı. Sonın menen birge lektsiya kursı 19-a'sirdin aqırında jazılğ'an Petrograd universiteti professorı O.D.Xvalsonnın «Fizika kursı» kitabınan mag'lıwmatlar keltirilgen. Bul mag'lıwmatlar fizika ilimine bolg'an ko'z-qarasların bizin ku'nlerimizge shekem qanday o'zgerislerge ushırag'anlıg'ın ayqın sa'wlelendiredi.

Joqarida aytilg'anlar menen bir qatarda lektsiya tekstlerin tayarlawda son'g'ı waqıtları rawajlang'an eller joqarı oqıw orınları menen kolledjlerinde ken'nen tanıl'g'an a'debiyatlar da qollanıldı. Olardıń 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:

A.N.Matveev. Mexanika i teoriya otnositelnosti. «Vısshaya shkola». Moskva. 1976. 416 s.

İ.V.Savelev. Kurs obshey fiziki. Kniga 1. Mexanika. Moskva. «Nauka». 1998. 328 s.

D.V.Sivuxin. Obshiy kurs fiziki. Tom 1. Mexanika. İzd. «Nauka». Moskva. 1974. 520 s.

S.P.Strelkov. Mexanika. İzd. «Nauka». Moskva. 1975. 560 s.

S.E.Xaykin. Fizisheskie osnovı mexaniki. İzd. «Nauka». Moskva. 1971. 752 s.

A.N.Matveev. Molekulyarnaya fizika. İzd. «Vısshaya shkola». M. 1987. 360 s.

D.V.Sivuxin. Obshiy kurs fiziki. Tom 88. Termodinamika i molekulyarnaya fizika. İzd. «Nauka». M. 1975. 552 s.

D.V.Sivuxin. Umumiy fizika kursı. Termodinamika va molekulyar fizika. Toshkent. «Wqituvshi». 1984.

A.K.Kikoin, İ.K.Kikoin. Molekulyarnaya fizika. İzd. «Nauka». M. 1976. 480 s.

A.K.Kikoin, İ.K.Kikoin. Umumiy fizika kursı. Molekulyar fizika. Toshkent. «Wqituvshi». 1978.

A.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 1. Механика. Изд. «Наука». Москва. 1974. 520 с.

С.П.Стрелков. Механика. Изд. «Наука». Москва. 1975. 560 с.

С.Э.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 88. Термодинамика и молекулярная физика. Изд. «Наука». М. 1975. 552 с.

Д.В.Сивухин. Умумий физика курси. Термодинамика ва молекуляр физика. Тошкент. «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. Тошкент. «Ўқитувчи». 1978.

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

Ko'p bo'lekshelerden turatug'in sistemalardi u'yreniwidin' usillari. Materialliq noqat penen absolyut qatti dene tu'siniginin' paydalanilw shegi. Materialliq dene modeli. Atomlar menen molekulalardin' massalari. Zattin' mug'dari. Zatlardin' agregat hallari. Agregat hallardin' tiykarg'i belgileri. Ideal gaz modeli. Dinamikaliq, statistikaliq ha'm termodinamikaliq usillar.

Materialliq noqat ha'm absolyut qatti dene modellerin paydalanw shekleri. Mexanikada qa'siyetleri materialliq noqat ha'm absolyut qatti dene dep atalwshw materialliq deneler qozg'alisi qaraladı. Bul denelerdi u'yrengende, birinshiden, olardin' ishki qurılısı menen sırtqı o'lishemleri inabatqa alınbaydı. Ekinshiden ishki qurılıs penen o'lishemler esapqa aling'an jag'daylarda bul tu'sinikler deneler iyelep turg'an ko'lemdegi inertliklin' bo'listiriliwin beriw ushin islendi. Sonın menen birge bul bo'listiriliw waqıt boyınsha o'zgermeydi dep esaplandı. Demek, mexanikada materialliq denelerdin' ishki qurılısı ha'm ishki qozg'alislari izertlenbeydi. Sonlıqtan materialliq noqat penen absolyut qatti dene modelleri materialliq denelerdin' ishki qa'siyetlerin u'yreniw ushin jaramaydı. Bul ishki qurılıs penen usi qurılıstı payda etetug'in bo'lekshelerdin' qozg'alisi payda etetug'in qa'siyetlerdi u'yrengende ayırıqsha a'hmiyetke iye.

Materialliq dene modeli. Barlıq materialliq denelerdin' atomlar menen molekulalardan turatug'inlig'ı ma'lim. Bul atomlar menen molekulalardin' qurılısı da belgili. Sonlıqtan bir biri menen bazı bir nızamlıq penen ta'sirlesetug'in, sog'an sa'ykes qozg'alatug'in atomlar menen molekulalardin' jıynag'ı materialliq denenin' modeli bolıp tabıladı. Al denelerdi qurawshw atomlar menen molekulalardin' o'zleri de qarap atırılğ'an jag'daylarga sa'ykes modeller bolıp qabil etiliwi mu'mkin. Bir jag'daylarda olardi materialliq noqatlar, ekinshi jag'daylarda absolyut qatti materialliq deneler, u'shinshi jag'daylarda olardin' ishki qurılısı menen ishki qozg'alislari esapqa alınıwı mu'mkin. Kvant mexanikası atomlar menen molekulalardin' ishki qurılısı menen qa'siyetlerin tolıq u'yreniwge mu'mkinshilik beredi. Sonlıqtan da olardin' qa'siyetleri bizge belgili dep esaplanadı.

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

Atomlar menen molekulalar massalari. Molekulalıq fizikada ko'pshilik jag'daylarda atomlar menen molekulalardin' massalari absolyut ma'nisi menen emes, al salıstırmalı o'lishem birliğı 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 massasınin' $\frac{1}{12}$ u'lesi qollanıladı.

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

Salıstırmalı molekulalıq massa yamasa molekulanın' salıstırmalı massası

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

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

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

Zattın' mug'darı. Sı esaplawlar sistemasında zattın' mug'darı onıñ' strukturalıq elementleriniñ' sanı menen ta'riplenedi. Bul shama *mol* lerde beriledi.

¹²S uglerod izotopınıñ' 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 atomların' bir moli haqqında ga'p etiw mu'mkin. Ha'r bir vodorod atomınıñ' massasınıñ' $1.66 \cdot 10^{-24}$ 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 zatlardıñ' mug'darın anıqlaw ma'nisin jog'altadı. Mısalı ıdista suwdın' 2 moli bar dep aytıw durıs emes. Al ıdista suw molekularınıñ' 2 moli bar dep aytıw durıs boladı. Bul so'z ıdista $296.02 \cdot 10^{23}$ dana N_2O molekulasınıñ' 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.

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

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

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

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

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

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

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

Moller shaması v strukturalıq elementler sanı n menen bılay baylanısqañ:

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

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

$$n = m/M$$

ekenligine iye bolamiz.

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

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

Zatlar gaz ta'rizli halda formasın da, ko'lemin de saqlamaydı. Gazdın' ko'lemi sol gaz jaylasqan ıdıtın' forması menen anıqlanadı. Idıs bolmag'an jag'dayda barlıq zat pu'tkil ko'lemdi toltırıp turıwg'a umtıladı. Gazlerdegi molekulalar qozg'alısın ko'z aldıg'a bılay keltiremiz: Ko'pshilik waqıtları molekula bir biri menen ta'sir etispey erkin qozg'aladı, keyin basqa bir molekula menen soqlıg'ısıwdın' aqibetinde o'zinin' qozg'alıs bag'ıtın o'zgerledi. Molekulanın' bir soqlıg'ısıw menen ekinshi soqlıg'ısıw ortasındag'ı ju'rip o'tken ortasha jolının' shaması sol molekula diametrinen mın'lag'an ese u'lken. :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 olardın' bir birine salıstırg'andag'ı jaylasıwları belgilenbegen, olar bir birine salıstırg'anda salıstırmalı tu'rde a'stelik penen orınların o'zgerledi.

İdeal gaz modeli. Ko'p bo'lekshelerden turatug'ın sistemalardın' en' a'piwayı tu'ri *ideal gaz* bolıp tabıladi. 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.* İdeal gaz bo'leksheleri arasındag'ı sharlardın' soqlıg'ısıw nızamları boyınsha soqlıg'ısıwdın' orın alatug'ınlg'ın ayırıqsha atap o'tiw kerek. Sebebi noqatlıq bo'leksheler tek qaptalı menen soqlıg'ısadı ha'm sonlıqtan soqlıg'ısıwda olardın' qozg'alıw bag'ıtı u'lken emes mu'yeshlerge o'zgeredi. İdeal gazdın' qa'siyetine jetkilikli da'rejede siyrekletilgen gazler sa'ykes keledi.

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

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

Haqıyqatında a'dettegi jag'daylarda 1 sm^3 gazde shama menen $2.7 \cdot 10^{19}$ molekula jaylasadı. Demek bazı bir waqıt momentindegi barlıq molekulalardın' iyelegen orınların (koordinataların) ha'm tezliklerin jazıw ushın $692.7 \cdot 10^{19}$ 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 ushın jaramaydı.*

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

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

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

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

Termodinamikalıq usıl. Ko'p bo'lekshelerden turatug'ın sistemalardı onın' ishki qurılısın esapqa almay-aq izertlewge boladı. Bunday jag'dayda sistemanı tolıg'ı menen qamtıytug'ın tu'sinikler menen shamalardan paydalanıw kerek. Ma'selen ideal gaz modeli bunday qarawda ko'lem, basım ha'm temperatura menen ta'riplenedi. Eksperimentallıq izertlewler bunday shamalar arasındag'ı baylanıslarda tabıw ushın islenedi. Al teoriya bolsa bazı bir ulıwmalıq jag'daylar tiykarında (mısalı 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'ın protsesslerdin' ishki mexanizmleri menen qızıqpaydı. Ko'p sanlı bo'lekshelerden turatug'ın sistemalardı u'yreniwdin' bunday usılın *termodinamikalıq usıl* dep ataymız.

Ko'p sanli bo'lekshelerden turatug'in sistemalar di u'yreniw din' statistikal i q ha'm termodinamik ali q us ill ar i bir bir in to li q t ra d i. Termodinamik ali q us il o'z in in' ul i w ma l i g' i me ne n ta'ri ple ne di, q u bi l i s la r d i ol ar d i n' is h ki me x a n i z m i s i z u'y re n i w g e mu' m k i n s h i l i k be re di. Statistikal i q us il q u bi l i s la r d i n' ma' n i s i n tu' s i n i w g e al i p ke le di. Du' z i l g e n te o r i y a ul i w m a s i s t e m a n i n' q a' s i y e t l e r i me ne n ay i r i m bo'leksheler di n' q a' s i y e t l e r i n bay la n i s t i r a d i.

Zatlard i n' a g r e g a t h a l i m o l e k u l a l a r d i n' o r t a s h a k i n e t i k a l i q e n e r g i y a s i me ne n sol m o l e k u l a l a r a r a s i n d a g' i o' z - a r a ta' s i r e t i s i w g e sa' y k e s k e l e t u g' i n o r t a s h a p o t e n t s i a l e n e r g i y a n i n' o' z - a r a q a t n a s i n a bay la n i s l i: g a z l e r d e m o l e k u l a l a r d i n' o r t a s h a k i n e t i k a l i q e n e r g i y a s i o r t a s h a p o t e n t s i a l e n e r g i y a s i n i n' m o d u l i n e n u' l k e n (t a r t i l s q a sa' y k e s k e l i w s h i p o t e n t s i a l e n e r g i y a n i n' t e r i s b e l g i g e i y e b o - l a t u g' i n l i g' i n e s k e t u' s i r e m i z), s u y i q l i q l a r d a e n e r g i y a n i n' sol e k i t u' r i b i r b i r i n e b a r a b a r (s h a m a me ne n t e n'). Q a t t i d e n e l e r d e b o l s a ta' s i r l e s i d i n' o r t a - s h a p o t e n t s i a l e n e r g i y a s i m o l e k u l a l a r d i n' o r t a s h a k i n e t i k a l i q e n e r g i y a s i n a n a' d e w i r (k o' p e s e) k o' p.

I d e a l g a z t e k g' a n a o y i m i z d a g' i i d e y a b o l i p t a b i l a d i, al r e a l d u' n y a d a i d e a l g a z d i n' b o l i w i mu' m k i n e m e s: m o l e k u l a l a r d i n o q a t h a' m ol a r d i b i r b i r i m e - n e n ta' s i r l e s p e y d i d e p e s a p l a w m o l e k u l a l a r d i k e n' i s l i k p e n e n w a q i t t a n t i s j a s a y d i (y a g' m y j a s a m a y d i) d e p e s a p l a w me ne n e k v i v a l e n t.

Ko'p bo'leksheler di n t u r a t u g' i n s i s t e m a n i d i n a m i k a l i q ta' r i p l e w d i t e x n i k a l i q j a q t a n a' m e l g e a s i r i w mu' m k i n e m e s, b u n d a y ta' r i p l e w t e o r i y a l i q k o' z - q a r a s t a n j a r a m s i z, al a' m e l i y j a q t a n p a y d a s i z b o l i p t a b i l a d i.

Ko'p bo'leksheler di n t u r a t u g' i n s i s t e m a n i s t a t i s t i k a l i q h a' m t e r m o d i n a m i k a - l i q u s i l l a r b i r b i r i n t o l i q t i r a d i.

Sorawlar:

Molekulali q fizikadag' i zatlard i n' modelin i n' t i y k a r g' i e l e m e n t l e r i n a y t i p b e r i n' i z.

Zatlard i n' h a' r q i y l i a g r e g a t h a l l a r i n i n' b e l g i l e r i n e l e r d e n i b a r a t?

Q a n d a y s e b e p l e r g e bay la n i s l i k o'p bo'leksheler di n t u r a t u g' i n s i s t e m a n i d i n a m i k a l i q ta' r i p l e w d i t e x n i k a l i q j a q t a n a' m e l g e a s i r i w mu' m k i n e m e s, b u n d a y ta' r i p l e w t e o r i - y a l i q k o' z - q a r a s t a n j a r a m s i z, al a' m e l i y j a q t a n p a y d a s i z b o l i p t a b i l a d i?

Ko'p bo'leksheler di n t u r a t u g' i n s i s t e m a n i t r e m o d i n a m i k a l i q ta' r i p l e w d i n' t i y k a r g' i o' z g e s h e l i k l e r i n e l e r d e n i b a r a t?

§ 2-2. Matematikal i q tu' s i n i k l e r

T o s a t t a n b o l a t u g' i n q u b i l i s l a r h a' m s h a m a l a r. I t i m a l l i q. I t i m a l l i q t i j y i l i g i b o y i n s h a a n i q l a w. I t i m a l l i q t i g' i z l i g' i. I t i m a l l i q l a r d i ul i w m a j a g' d a y l a r d a q o s i w. I t i m a l l i q l a r d i n' n o r m i r o v k a s i. S H a' r t l i t u' r d e g i i t i m a l l i q. B i r b i r i n e n g' a' r e z s i z w a q i y a l a r. K o' p w a q i - y a l a r u s h i n i t i m a l l i q l a r d i k o' b e y t i w. T o s a t t a n b o l a t u g' i n d i s k r e t s h a m a n i n' o r t a s h a m a' n i s i. D i s p e r s i y a. I t i m a l l i q l a r d i n' t a r q a l i w f u n k t s i y a s i. G a u s s b o' l i s t i r i l i w i.

B u l p a r a g r a f t a i t i m a l l i q l a r t e o r i y a s i n a n e n' m i n i m a l b o l g' a n m a g' l i w m a t l a r k e l t i r i l e d i. M a t e m a t i k a - l i q t u' s i n i k l e r d i n' f i z i k a l i q a y q i n l a s t i r i l i w i t i y k a r i n a n i d e a l g a z m i s a l i n d a a' m e l g e a s i r i l a d i.

Tosattan bolatug'ın waqıyalar. Qozg'alıstı dinamikalıq jaqtan ta'riplewden bas tartıwdın' na'tiyjesinde ma'seleni qoyıwı o'zgeritiwge 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'ın waqıya bolıp sanaladı.

Turmıstag'ı geypara waqıyalardın' qashan bolatug'ınlǵ'ın bilmewimizdin' sebebinen solardın' tosattan ju'z beriwı subektiv jag'day bolıp tabıladı. Biraq ko'pshilik jag'daylarda olardın' tosattan bolıwı obektiv ha'm printsipiallıq jag'day bolıp tabıladı. Sonlıqtan tosattan ju'z beretug'ın waqıyanı da'l boljaw haqqındag'ı ma'selenin' qoyılıwı fizikalıq ma'niske iye emes.

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

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

İtimallıq. İlim menen praktikada tosattan bolatug'ın 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'ın qubılıslar teoriiyasının' wazıypası sol waqıyanın' bolatug'ınlag'ına yamasa bolmaytug'ınlǵ'ına sanlıq ma'nis beriw bolıp tabıladı. Bul «*itimallıq*» tu'sinigi ja'rdeminde a'melge asırıladı.

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

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

formulası ja'rdeminde anıqlanadı.

Bul jerde o'zgerissiz qalatug'ın sırtqı jag'daylardag'ı sınap ko'riwler sanı $N \rightarrow \infty$ sha'rti u'lken a'hmiyetke iye. Bir sistema u'stinen ju'rgizilgen ko'p sanlı sınap ko'riwler ornına ko'p sandag'ı birdey sistemalar u'stinen ju'rgizilgen ayırım sınap ko'riwler haqqında aytıwǵ'a boladı. Ko'p sanlı birdey bolǵ'an sistemalar *ansambli* dep ataladı. Sonlıqtan (2-1) degi N_A sanı bo'lekshe ıdistın' berilgen yarımında jaylasqan jag'dayına sa'ykes keletug'ın ansambldegi sistemalar sanı bolıp tabıladı. N ansambldegi sistemalardın' ulıwma sanı. A'llette, eki anıqlama da durıs bolıp tabıladı. Biraq ayqın jag'daylar ushın ju'rgizilgen teoriyalıq esaplawlarda eki anıqlamanın' biri ekinshisine qarag'anda qolaylıraq bolıp shıǵ'ıwı mu'mkin.

İtimallıq tıǵ'ızlıǵ'ı. Eger waqıya u'zliksiz o'zgeretug'ın shamalar menen ta'riplenetug'ın bolsa (2-1) formula menen itimallıqtı anıqlaw ma'niske iye bolmay qaladı. Mısalı bo'lekshenin' tezligi 10 m/s qa ten' bolıwının' itimallıǵ'ı nege ten' dep soraw ma'niske iye emes. Bunday jag'dayda itimallıq ornına *itimallıq tıǵ'ızlıǵ'ı* tu'siniginen paydalanamız.

Endi gaz toltırılǵ'an ıdıstı ΔV_i ko'lemlerine bo'lemiz ($i = 1, 2, \dots$). Bunday ko'lemler sanı sheksiz ko'p. Baqlawlar (sınap ko'riwler) sanın N arqalı belgileyemiz. Ha'r bir baqlaw aktinde molekula qanday da bir ΔV_i ko'leminde tabıladı. Meyli N ret baqlaw ju'rgizilgende ($N \rightarrow \infty$) molekula N ret ΔV_i

ko'leminde tabılsın. (2-1) aniqlamasına muvafiq kelesi baqlawdı molekulanı ΔV_i ko'leminde tabıwdın' itimallıg'ı

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

Eger salmaq ku'shi bar bolatug'in bolsa molekulanı ıdıstın' to'meninde tabıwdın' itimallıg'ı joqarısında tabıwdın' itimallıg'ınan u'lken boladı. Bul itimallıq ko'lem ΔV_i ge de baylanıslı. Sonlıqtan

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

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

dV ko'lemindegi x, y, z noqatının' a'tirapında N_0 baqlaw ju'rgizilgende (2-2a) an'latpasınan molecula

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\int_V f dV = 1.$$

Qoyılǵ'an eksperimentte nelikten ten'ley itimlallıqqa 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 talqılǵ'an. Eshekten ten'dey qashıqlıqqa eshek jeytug'ın eki portsiya sho'p ornalastırılǵ'an jag'dayda eshekting' qaysı portsiyanı saylap alatug'ınlıǵ'ı diskussiya qılınǵ'an. Bunday jag'dayda eshek ne qıladı yamasa ol ashtan o'le me? A'llette eshek bunday logikanı maqullamaydı. İlim de bunday logikanı maqullamaydı.

Waqıyaların' tosınnan bolatug'ınlıǵ'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 sebeplilikting' tek statistikalıq jaqtan ju'zege keliwi orın ala aladı. Waqıyaların' tosınnan bolıwı bul waqıyalardı basqarıwǵ'a bolmaytug'ınlıǵ'ın, olardıń qadag'alawdan tıs ekenligin an'g'artpaydı. Mısalı lotoreyadan utıw mu'mkinshiligin joqarılattıw ushın ko'birek bilet satıp alıw kerek.

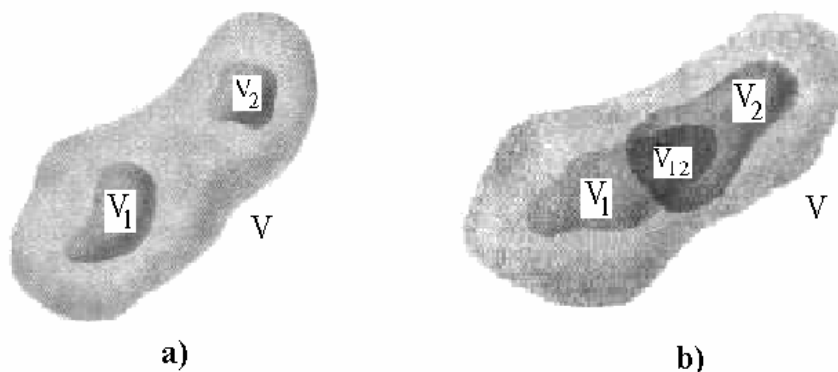
Bir birin biykarlaytug'ın waqıyalar itimallıqların qosıw. Meyli bir birin biykarlaytug'ın eki waqıya bar bolsın. Mısalı V ko'leminde eki bir biri menen kesispeytug'ın eki V_1 ha'm V_2 ko'lemleri bar bolatug'ın bolsa (su'wrette ko'rsetilgen), onda bo'leksheni V_1 ko'leminde tabıw V_2 ko'leminde tabıwdı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

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

yag'nıy bo'leksheni V_1 ha'm V_2 ko'lemlerinde tabıwdın' itimallıqlarının' qosındısı bolıp tabıladı. Bul formula bir birin biykarlaytug'ın waqıyaların' itimallıqların qosıw qag'ıydasin beredi.

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



2-1 su'wret.

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

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

Bunday waqıya ushın ulıwma formulanı bılay jazamız

$$P(A+B) = P(A) + P(B). \quad (2-4)$$

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

Bazı bir birin biykarlaytug'ın ha'r qanday waqıyalardıń jıynag'ınan turatug'ın berilgen sistemadag'ı birdey mu'mkinshiliklerde orınlag'an sınavlardın' sanı berilgen bolsın. Bul waqıyalardı 1, 2, ... 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 P_i arqalı i - waqıya itimallıg'ı belgilengen.

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

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

İtimallıqlardı ulıwma jag'dayda qosıw. Eger eki waqıya da bir waqıtta ju'zege keletug'ın bolsa (2-4) formula g'a o'zgeris kirgiziwimiz kerek. Meyli sınap ko'riwlerdin' ulıwma sanı N bolsın. Usınday sınaqlardıń na'tiyjesinde A waqıyası N_A ret, al V waqıyası N_V ret baqlansın. Basqa sınaqlarda A waqıyası da, V waqıyası da baqlanbag'an bolsın. Biraq N_A menen N_V waqıyalarının' 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 waqıyalarının' 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

$$P(A+B) = P(A) + P(B) - P(AB). \quad (2-7)$$

Bul jerde

$$P(AB) = N_{AB} / N. \quad (2-8)$$

A ha'm B waqıyalarının' bir waqıtta ju'zege keliw itimallıg'ı. Eger $P(AB) = 0$ bolsa (2-7) (2-4) ke o'tedi.

İtimallıqtı kontinuallıq interpretatsiya qılǵ'anda (2-7) formula a'piwayı tu'rge keledi. Meyli V_1 ha'm V_2 ko'lemleri kesilisetug'in bolsın. Kesilisiwden payda bolǵ'an ko'lemdi V_{12} dep belgileyik. Onda V_1 ha'm V_2 ko'lemelerin qosıwdan alınatug'in ko'lem $V_1 + V_2 - V_{12}$. Usı ko'lemde bo'leksheni tabıwdın' itimallıǵ'ı

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

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

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

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

$$P(A / B) = N_{AB} / N_B. \quad (2-9)$$

İtimallıqtı kontinual anıqlag'anda

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

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

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

$R(AV)$ (2-8) ja'rdeminde anıqlang'an A ha'm B waqıyalarının' bir waqıtta ju'zege keliw itimallıǵ'ı.

$$P(AB) = P(B) * P(A/B) = P(A) * P(B/A) \quad (2-11)$$

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

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

$$P(AB) = P(A) * P(B) \quad (2-12)$$

tu'rine iye boladı.

Ko'p waqıyalar ushın itimallıqlardı ko'beytiw formulası. Bul formula (2-11) formulasınan tikkeley alınadı. Mısalı A, B ha'm C waqıyalarının' bir waqıtta ju'zege keliw itimallıǵ'ı

$$P(ABC) = P(AB) * P(C/AB) = P(A) * P(B/A) * P(C/AB). \quad (2-13)$$

Eger waqıyalar g'a'rezsiz bolsa

$$P(ABC) = P(A) * P(B) * P(C). \quad (2-14)$$

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 shamalarının' arasında o'z ara ten' keletug'ınları bolıwı mu'mkin. Sonlıqtan (2-15) qosındısının' 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 bilayınsha jazamız:

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

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

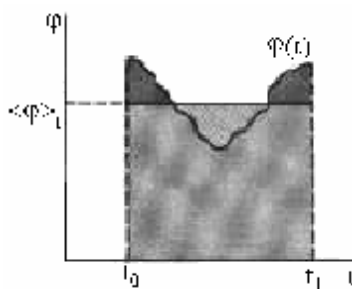
U'zliksiz o'zgeriwshi shamanın' ortasha ma'nisi. Ortasha ma'nis (2-15) sa'ykes keliwshi formula tiykarında esaplanıwı kerek. Meyli $\varphi(t)$ waqıt t nın' funktsiyası bolsın. Bunday jag'dayda t_0 den t_1 ge shekemgi intervalda ortasha ma'nis

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

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 bilayınsha ulıwmalastırıladi:

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



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. SHamanin' ortasha ma'nisi a'tirapındag'ı shashılıwı *dispersiya* menen ta'riplenedi. Dispersiya qarap atırılǵ'an shamanın' ortasha ma'nisinen awısıwının' kvadrati 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 alıń'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:

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

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

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

(2-20) ja'rdeminde anıqlang'an $F(x_0)$ funktsiyası itimallıqtın' bo'listiriliw funktsiyası dep ataladı. U'zliksiz o'zgeretug'ın shama ushın $F(x_0)$ itimallıq tıǵ'ızlıǵ'ı menen to'mendegidey formula boyınsha baylanısqa:

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

(2-21) den

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

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

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

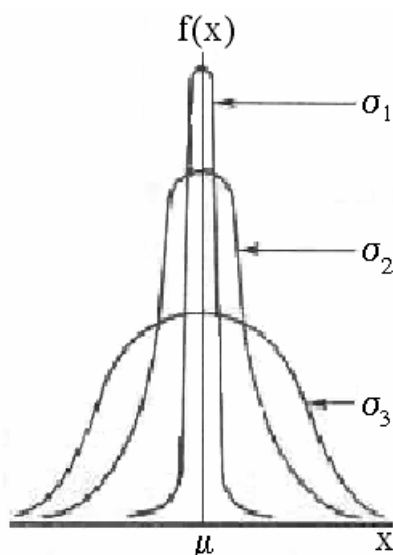
Soday-aq (2-20) menen (2-21) di esapqa alıp tosattan bolatug'ın x shamasının' $x_1 < x < x_2$ intervalında bolıw itimallıǵ'ı

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

formulası menen esaplanadı.

Gauss bo'listiriliwi. Meyli dekart koordinatalar sistemasında O noqatınan adımlap noqat shıqsın. Ha'r bir adım barlıq bag'ıtlar boyınsha ten'dey itimallıqta, al 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 koordinataların' bo'listiriliwi qanday boladı dep soraw beriledi.

Barlıq bag'ıtlardıń ekvivalent ekenligi tu'sinikli, al noqattın' X ha'm Y 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 Y koordinatası ushın $\varphi(u^2)$. (x, y) koordinatalarına iye $dS = dx dy$ maydanı elementinde jaylasıw itimallıg'ı:



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

$$dP = \varphi(x^2) \varphi(y^2) dS \quad (2-25)$$

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

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

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

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

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

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

yamasa

$$[\varphi'(x^2)/\varphi(x^2) - \varphi'(x^2 + y^2)/\varphi(x^2 + y^2)] x dx + [\varphi'(y^2)/\varphi(y^2) - \varphi'(x^2 + y^2)/\varphi(x^2 + y^2)] y dy = 0.$$

Bunnan differentsialların' bir birinen g'a'rezsizliginen

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

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

ekenligi kelip shıg'adı. Onda

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

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

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

ekenligine isenemiz.

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

İtimallıqlar 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 tuwrı keledi. Eger bul maksimum $x = \mu$ noqatına tuwrı keletug'ın bolsa, onda

$$f(x) = \text{Vexr} [-\alpha(x-\mu)^2]. \quad (2-29)$$

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

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

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

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

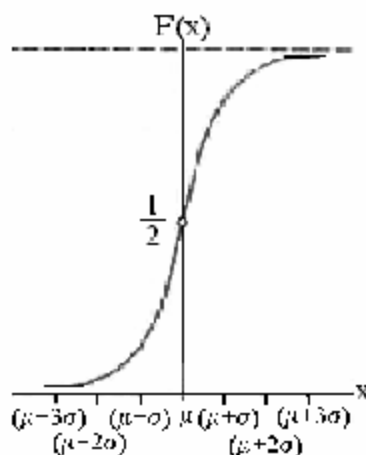
Endi x shamasının' ortasha ma'nisi menen σ^2 dispersiyanı esaplaymız:

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

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

Demek $\alpha = \frac{1}{2\sigma^2}$ ha'm itimalliqtn' bo'listiriliwinin' tıg'izlıg'ı standart formada bılay jazıladı:

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



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

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

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

Bul funktsiya bo'listiriliwdin' **Gauss** yamasa **normal nızamı** dep ataladı. $z = (x - \mu) / \sigma$ dep belgilep

$$\Phi(z) = \int_{-\infty}^z \exp(-z^2 / 2) dz \quad (2-32)$$

bo'listiriliwdin' standart normal nızamı formulasın alamız.

Ko'p bo'lekshelerden turatug'in sistemanı dinamikalıq ta'riplewdin' mu'mkin emes ekenligi sebepli onın' mikrohalın baqlaw mu'mkin emes. Qala berse mikrohallardın' o'zgerisin baqlap barıw da mu'mkin emes. Usı mikrohallardın' bar ekenligin ha'm olardın' o'zgeretug'inlıg'ın qalay da'lillewge boladı? Biz ayırım bo'lekshenin' halın ta'ripleytug'in ha'rıqlı parametrlerdi o'lsheymiz ha'm usı bo'lekshenin' sistema menen ta'sirlesiwın baqlay alamız. Usınnan bo'leksheler sistemasının' mikrohalı ha'm bul mikrorhaldın' o'zgeriwi haqqında juwmaq shig'aramız.

Sorawlar:

İtimallıqtın' anıqlamasın berin'iz.

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

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

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

§ 2-3. Sistemalardıń makroskopiyalıq ha'm mikroskopiyalıq halları

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

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

Sistema shegarası menen birge usı sistemag'a kırıwshi 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' ıdı diywalına urılıwı absolyut serpinli bolsın, al urılıwdın' saldarınan ıdıstın' diywalları o'zgeriske ushıramaydı dep esaplayıq (ıdıstın' massası u'lken bolǵ'an jag'day). Solay etip V ko'lemindegi ideal gaz usı ko'lemnin' sırtındag'ı materiallıq deneler menen energiya almaspaydı, yag'nıy izolyatsiyalang'an bolıp tabılardı. Usınday sha'rtler orınlag'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 waqt o'tkennen keyin gazdın' halı statsionar halg'a keledi ha'm bul hal waqtın' o'tiwi menen o'zgermeydi. Bul tastıyıqlawda «jetkilikli waqt o'tkennen keyin» ha'm «gazdın' halı statsionar boladı» so'zleri ele anıq emes ayılǵ'an. Da'l anıqlama keyinirek beriledi.

«Jetkilikli waqt o'tkennen keyin» waqtı degenimizde basımlar menen temperaturalar ten'lesetug'ın waqtı tu'sinemiz. Bul waqt ko'shiw qubılısların u'yreniwın' na'tiyjesinde bahalanıwı mu'mkin. Ha'zirshe ten'lesiw ses tezligi v_{ses} menen boladı dep qabıl etemiz. Eger 1 ıdıstın' sıızıqlı o'lshepleri bolatug'ın bolǵ'an jag'dayda basımlardıń ten'lesetug'ın waqtı shama menen $1/v_{ses}$ ke ten'. Uzunlıg'ı 1 m ge ten' ıdı ushın $3 \cdot 10^{-3}$ sekundtı quraydı. Eger u'yrenshikli makroskopiyalıq sezimler tiykarında aytsaq bul waqt ju'da' kishi waqt. Al mikroskopiyalıq qubılıslar ko'z-qarasınan bul u'lken waqt. Mısalı, normal jag'daylarda 1 molekula 1 sekund waqt ishinde shama menen 10^9 ret basqa molekular menen soqlıǵ'ıladı. Demek $3 \cdot 10^{-3}$ sekund ishinde molekula millionlag'an ret soqlıǵ'ısıwılg'a ushıraydı. **Basımı, temperaturası ha'm ko'lemi menen ta'riplenetug'ın gazdın' halı makroskopiyalıq hal dep ataladı.**

Basim, temperatura ha'm ko'lem sistemanin' makroskopiya halin ta'ripleytug'in makroskopiya parametrlerge misallar bolip tabiladi. Bunday parametrler ishki ha'm sirtqi parametrler bolwi mu'mkin. Ishki parametrler dep sistemanin' fizika obektleri ta'repinen aniqlanaturug'in parametrlerge aytamiz. Al sirtqi parametrler sistema quramuna kirmeytug'in fizika obektler ta'repinen aniqlanadi.

Bir shama jag'daylarg'a baylanishi bir waqitta ha'm ishki ha'm sirtqi parametr bolwi mu'mkin.

Mikroskopiya hal. Gazdi qurawshi bo'lekshelerdi $i = 1, 2, \dots, n$ dep belgileyik. Demek gaz n dana bo'leksheden turadi. Bul san ju'da u'lken. Eger ko'lem $1^3 = 1 \text{ sm}^3$ bolsa $n = 2.7 \cdot 10^{19}$ bo'lekshelge iye bolamiz. *Barliq bo'lekshelerinin iyelegan orinlari (koordinatalari) ha'm tezliklari menen ta'riplenaturug'in gazdin' hal mikroskopiya hal dep ataladi.*

Demek gazdin' mikroskopiya hali $6n$ san menen ta'riplenedi: barliq bo'lekshelerdin' fn dana (x_i, y_i, z_i) koordinatalari ha'm olardn' tezliklarinin' $3n$ proektsiyalari (v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}) . bul sanlardi tosattan bolaturug'in sanlar dep qaraw kerek.

Joqarida aytilganlar gazdin' mikroskopiya halin tek statistika jaqtan ta'riplewdin' kerek ekanligin bildiredi.

Ten'salmaqliq hal. Sirtqi ortalıqtan bo'lip aling'an (izolyatsiyalang'an) ko'lemi V bolgan gazdin' statsionar makroskopiya hali ten'salmaqliq hal dep ataladi. Usunday halda onin' makroskopiya ta'riplemeleri - basim, temperatura, ko'lem waqittin' o'tiwi menen o'zlarinin' ma'nislerin turaqli etip saqlaydi. Sonin' menen birge ko'lemnin' barliq noqatlarida basim menen temperaturi turaqli ma'nislerine iye boladi.

Ten'salmaqliq halga aniqlama bergende sistemanin' izolyatsiyalang'anligi a'hamiyetke iye. Eger sistema izolyatsiyalang'an bolmasa ten'salmaqliq emes statsionar hallardn' bolwi mu'mkin.

Misali gaz jaylasqan ıds diywalinin' ha'r qiyli bo'limlari sirtqi dereklerin' ja'rdeminde ha'r qiyli, biraq turaqli temperaturalarda uslap turilwi mu'mkin. Bunday jag'dayda gazde waqitga baylanishi o'zgermeytug'in statsionar hal payda qaliplesedi. Biraq bul hal ten'salmaqliq emes: ıds ishinin' barliq noqatlarida basim birdey, biraq temperaturanın' ma'nisi ha'r qiyli.

Sistemalardn' statistika ansambl.

Ishindegi bo'leksheleri menen birge ıds statistika sistema dep ataladi.

Birdey bolgan statistika sistemalardn' jynagi statistika ansambl dep ataladi.

Bir makroskopiya hal ansambldin' ha'r qiyli mikroskopiya hallarında turg'an ko'p sanli sistemalarında ju'z beredi.

Mikrokanonik ansambl. Birdey energiyaga iye izolyatsiyalang'an ha'm o'z-ara birdey bolgan sistemalar mikrokanonik ansambl dep ataladi. Statistika fizikada mikrokanonik ansamblden basqa kanonik ansambller de u'yreniledi. Ansambller usuli statistika fizikaga 1902-jili Amerika fizigi Gibbs (1839-1903) ta'repinen kirgizildi.

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

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

Sorawlar:

Gazdegi basımnın' ten'lesiwi ushın kerek bolatug'ın waqıttın' shamasın qalay anıqlawg'a boladı?

Gazdin' makroskopiyalıq ha'm mikroskopiyalıq halları qanday shamalar menen ta'riplenedi?

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

Atomlar menen molekulların belgili bir o'lishemlerge iye bolatug'ınlıg'ı jaqsı belgili. Olardıń diametri $\sim 10^{-8} \text{ sm} = 10^{-10} \text{ m}$. Demek molekula yamasa atom $d^3 \sim 10^{-24} \text{ sm}^3$ ko'lemde iyeleydi. «Ko'lemde iyeleydi» so'zi eger usı ko'lem bir molekula menen iyelengen bolsa, onda basqa molekula menen iyeleniwi mu'mkin emesligin an'g'artadı. Demek bo'lekshe o'zinin' **ko'lemdegi awhalın** o'zgerledi degen so'z bo'lekshenin' iyelegen bir ko'lemde taslap, ekinshi ko'lemge o'tkenliginen derek beredi. Usınday ko'z-qarasta barlıq ko'lem bo'leksheler menen iyelengen ko'lemi d^3 bolg'an ko'lemdegi 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 waqıt intervalı dawamında turadı (v arqalı bo'lekshenin' tezligi belgilengen).

Endi mikroholları bo'lekshelerdin' awhalları arqalı ayırıwıg'a boladı. Ko'lemdegi awhal boyınsha mikrohal pu'tkil ko'lemde bo'liwden payda bolg'an qutishalar boyınsha bo'lekshelerdin' bo'listiriliwi menen ta'riplenedi. bo'lekshenin' bir qutıdan ekinshi qutıg'a o'tiwleri sistemanın' mikrohollarının' o'zgeriwiniń ma'nisin beredi. Usınday ko'z-qarastan paydalanıw ushın 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 ayılğ'anınday 1 sm^3 ko'lemde barlıg'ı bolıp $N = 1/d^3 \approx 10^{24}$ qutisha bolıwı kerek. Normal atmosfera basımında 1 sm^3 ko'lemde $n = 2.7 \cdot 10^{19}$ bo'lekshe jaylasadı. Sonlıqtan a'dettegi jag'daylarda bir bo'lekshenge $N/n \approx 4 \cdot 10^4$ qutisha sa'ykes keledi. Demek qutishalardin' basım ko'pshiligi bos, tek ayırım qutishalar g'ana bo'leksheler menen iyelengen bolıp shıg'adı. Eger qutishalırdı kublarğ'a jıynaytug'ın bolsaq 1 bo'lekshe $40\,000$ qutisha jaylasqan kubta jaylasadı. Usınday kubtın' qabırğ'ası boyınsha 30 qutisha jaylasadı. Bul alıng'an sanlar iyelengen qutishalar arasındag'ı ortasha qashılıq qutishanın' sızılıq 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 tezliklin' 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'ınlig'ı ko'rsetti. Bo'lekshenin' ken'islik boyınsha ha'm tezlikler boyınsha ta'riplemeleri o'z-ara baylanısqa 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 waqıt momentinde bazı bir bo'lekshe ansambldin' ha'r qanday sistemalarında, ha'r qıylı qutishalarda boladı. Eger baslang'ısh waqıt momentinen baslap bir qansha waqıt o'tse, sistemalar o'zlerinin' da'slepki halların «umıtqa» bolsa, berilgen waqıt momentindegi bo'lekshe jaylasqa qutisha tosattan bolg'an qutisha bolıp tabıladı. Qarap atırılga'n 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 sistemalar'ga iye bolsa, qarap atırılga'n 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 misallar 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 iqtıyarlı bolıwı mu'mkin. Biraq sistema ansambldin' barlıq sistemalarına salıstır'anda birdey bolıwı kerek. Statistikalıq ansambldin' i-sistemasındag'ı bo'lekshenin' koordinataların i indeksi menen nomerleyemiz. Bunday jag'dayda shamanın' ortasha ma'nisinin' anıqlaması boyınsha iye bolamız:

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

Bul ten'likte a indeksi esaplanıp atır'ga'n shamanın' ma'nisin ansambl boyınsha ortasha ma'nis ekenligin bildiredi. N_a ansambldegi sistemalar sanı, x_i i-sistemadag'ı bo'lekshenin' koordinatası. Ansambldin' ha'r bir sistemasındag'ı qutishalar sanı $N \sim 10^{24}$, al ansambldegi sistemalar sanı N_a bul sannan a'dewir u'iken

dep esaplanadı ($N_a \gg N$). Sonliqtan bo'lekshe j-qutishada joylasatug'in 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'zalardı toparlastırıw maqsetinde (4-2) ni tu'rlendiremiz. Ansambldin' N_{aj} sistemasındag'ı j-qutishada bo'lekshe joylasatug'in 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 ansambldagi sistemalar sanı, N - statistikalıq ansambldin' 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, P_j - bo'lekshenin' usı qutishada joylasıw itimallıg'ı. Bul formula tosattan bolatug'in shamanın' matematikalıq ku'tiliwin ta'ripleytug'in (2-17)-formulag'a sa'ykes keledi. Onın' on' ta'repinde sistemalar ansambli haqqında tikkeley hesh na'rse joq.

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

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

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

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

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. Sonliqtan T waqtı ishinde j-qutishada

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

waqıt 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 jazamız:

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

Bul formulada

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

Bul barlıq waqıtqa salıstırǵ'andag'ı bo'lekshenin' j-qutıshada turıw waqtı. (2-2v) dag'ı itimallıqqa berilgen anıqlama boyınsha \tilde{P}_j bo'lekshenin' j-qutıshada bolıw itimallıǵ'ı.

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

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

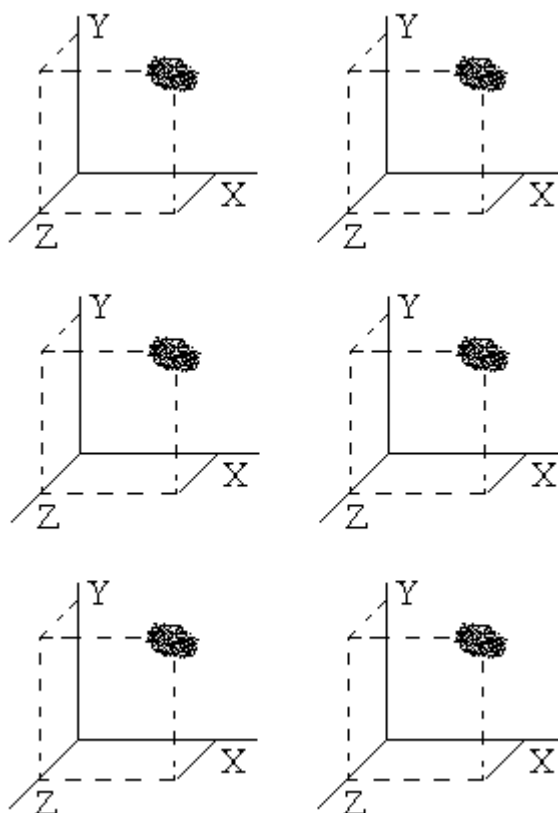
dep tastıyıqlaw *ergodik gipoteza* dep ataladı. (4-10), (4-5) ha'm (4-12) tiykarında

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

dep ergodik gipotezanı basqasha jazamız.

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

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



2-5 su'wret. Statistikalıq ansambl

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 «irarxialıq 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 makrohollardın' itimallıg'ı bir birinen keskin tu'rde ayırıladı.

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

§ 2-5. Makrohallar itimallig'ı

Makrohallar itimallig'ı. Elementar kombinatorika formulaları. Makrohallardın' itimallig'in esaplaw. Stirling formulasi. Makrohal itimallig'ı formulasi. Bo'leksheler saninin' en' itimal ma'nisi. Binomialliq bo'listiriliw ha'm onin' shekli ma'nislerinin' formulasi. Puasson bo'listiriliwi.

Makrohallar itimallig'ı. Makrohal u'lken sandag'ı mikrohallar tiykarında ju'zege keledi. Eger berilgen makrohal dın' belgileri belgili bolsa, onda printsipinde usı makrohalg'a sa'ykes keliwshi barlıq mikrohallardı tabıwǵa boladı. Γ_α arqalı mikrohallar sanın belgileymiz. α makrohal dı ta'ripleydi. Makrohal dın' belgisin $\Gamma(\alpha)$ arqalı belgileyik. Γ_0 arqalı ergodik gipoteza tiykarında alınıwı mu'mkin bolǵan hallardın' ulıwma sanı. Bunday jag'dayda qarap atırılǵan makrohal itimallig'ı

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

Mikrohallar sanı Γ_α makroskopiyalıq haldın' *termodinamikalıq itimallig'ı* dep te ataladı. Matematikalıq ma'niste P_α itimallıq bolıp tabılamaydı. Sebebi ol birge ya ten', yamasa kishi ma'niske iye, al Γ_α u'lken san. Biraq sog'an qaramastan (5-1) (termodinamikalıq) itimallıq atın aldı. Sebebi (5-1) dın' ja'rdeminde sa'ykes makrohal itimallig'ı esaplanadı.

Teoriya aldında turg'an ma'sele (5-1) formulag'a kiriwshi hallardın' sanın tabıwdan ibarat boladı. A'lbette tikkeley hallar sanın esaplaw tek ayırım jag'daylardı a'melge asırıladi. Sonlıqtan ko'pshilik jag'daylarda teoriyanın' aldına birim-birim esaplamay-aq hallar sanın yamasa P_α nin' ma'nisin anıqlawdan ibarat ma'sele qoyıladi.

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 shıǵ'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 shıǵ'ıwı mu'mkin. Ha'r bir $n(n-1)$ jaylastırıwda u'shinshi zat $n-2$ orında jaylastırıladi. Sonlıqtan u'sh zat n orında $n(n-1)(n-2)$ usıl menen jayǵ'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 orınlardın' birdeyligi, biraq zatlardın' ha'r qıylılıǵ'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 qoyıladi. Ha'r bir jaylastırıwda $n-m$ orın bos qaladı. Bunday jag'dayda m dana zattı n dana orıng'a jaylastırıwlar sanı

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

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

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

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

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

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

formulasın alamız.

Makrohallar itimallıǵ'ın esaplaw. İdeal gaz iyelegen ko'lem V, bul ko'lemdegi bo'leksheler sanı n bolsın. Bo'lekshe iyelewi mu'mkin bolǵ'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' itimallıǵ'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 $N_1 \geq m$.

Mikrohallardıń 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 bolǵ'an mikrohallar bir birinen ayırıladı degendi an'latadı. Sonın' menen birge qarap atırılǵ'an bo'leksheler qa'siyetleri boyınsha birdey. Sonlıqtan bo'leksheler orın almasırg'anda payda bolǵ'an mikrohallar qa'siyetleri boyınsha birdey bolıwı sha'rt. Biraq sol sha'rtlerge qaramastan mikrohallar birdey emes dep esaplaymız.

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

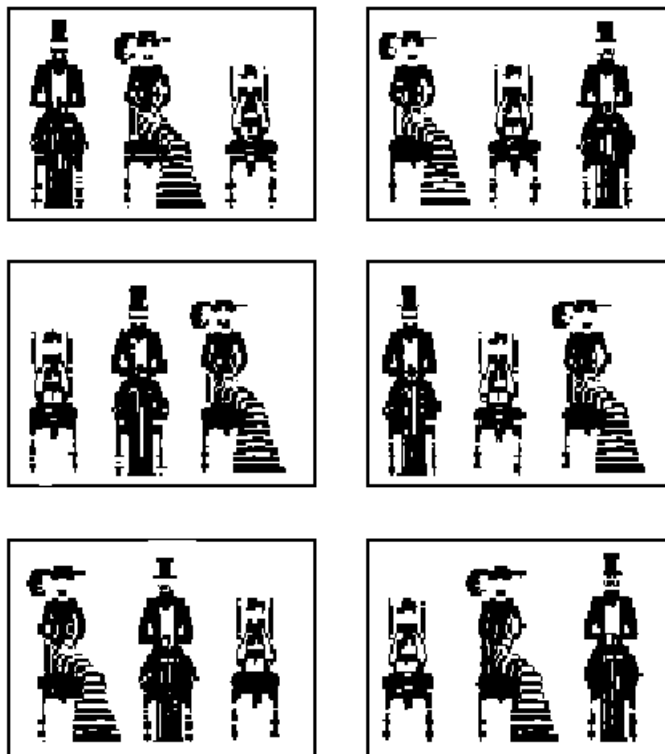
$$\Gamma_0 = N! / (N-n)! \quad (5-6)$$

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

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



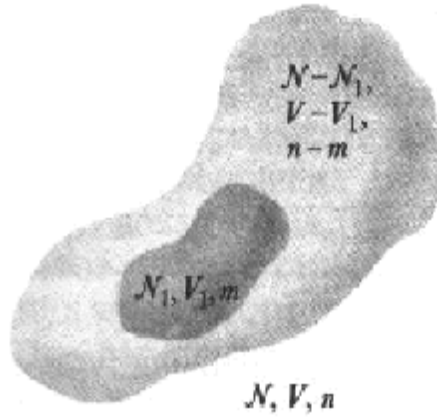
Solay etip V_1 ko'lemindegi m ayqın bo'lekshe ushın makrohaldı qa'liplestiretug'ın mikrohollar sanı $\gamma(V_1, m)$ $\gamma(V - V_1, n - m)$ ge ten'. Biraq bul ko'beyme makrohaldı payda etiwshi barlıq mikroholları bermeydi. Bul V_1 ko'lemindegi m dana ayqın bo'leksheler jıynag'ına tiyisli mikrohollar.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

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

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

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

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



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

Ju'da' u'lken n sanında

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

Bul *Stirling formulası* 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 salıstırğ'anda kishi bolğ'anlıqtan 1 qaldırılıp ketken. (5-13) ti potentsiallap (5-11) ge kelemiz.

Makrohallardıń 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

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

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

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

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'listirildi basqasha da jaza alamız:

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

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

$$P(V_1, m \rightarrow 0) \approx q^n \rightarrow 0, \quad P(V_1, m \rightarrow n) \approx p^n \rightarrow 0.$$

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

Bul tuwındını V_1 ha'm p jetkilikli da'rejede kishi, al q birge jaqın bolg'an jag'day ushın sheshemiz. Biraq V_1 dım kishi bolmawı kerek. Bul jag'dayda p^m 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. Onday 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'lese 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

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

Esaplawlardın' barlıg'ı da juwıq tu'rde islendi. Sonlıqtan (5-19) tek juwıq ma'nisti beredi. Da'lirek bahalawlar V ko'lemindegi n nin' u'lken ma'nislerinde ha'm V_1 din' ju'da' kishi bolmag'an ma'nislerinde u'lken da'llikke iye bolatug'inlıg'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'lsheqli tarqalg'an bolsa), $n_{\max} = m_0/V_1 - V_1$ ko'lemindegi en' itimal konsentratsiya. $p = V_1/V$ ekenligin esapqa alıp (5-19) dı bılay jazamız

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

Demek V_1 ko'lemindegi en' itimal konsentratsiya bo'lekshelerdin' barliq ko'lem boyinsha ten' o'lshefli bo'listiriliwine sa'ykes keledi. V_1 ko'lemin V ko'lemi ishinde saylap aliw iqtiyarli bolg'anliqtan bo'lekshelerdin' konsentratsiyasinin' en' itimal bo'listiriliwi ten' o'lshefli bo'listiriliw bolip tabiladi. Tuyiq sistemanin' usinday halı statsionar ha'm ten' salmaqlı bolip tabiladi. Sonin' ushin aling'an juwmaqtı bılayınsha jazamız:

Sistemanın' ten' salmaqlıq halı onın' en' itimal halı bolip tabiladi.

Binomial bo'listiriw. Nyuton binomı formulasına muwapıq (5-15a) binomial bo'listiriliw dep ataladı. Nyuton binomı bılay jazıladı:

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

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

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

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

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

Bul jerde Δm - piktin' ken'ligi.

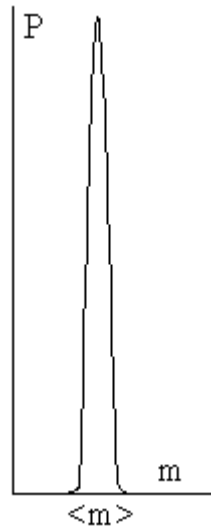
Demek, V_1 ko'lemindegi bo'leksheler sanı m_{\max} nan awısıwı ju'da' az shama boladı. Usı awısıwı menen R nın' ma'nisi tez kemeyedi. Biraq sog'an qaramastan barlıq waqıtta m_{\max} g 'a ten' emes, al usı shama do'geresinde terbeledi. Bul awıtqıwlar **fluktuatsiyalar** dep ataladı.

Binomial bo'listiriwdin' shektegi formaları. Sheksiz ko'p sanlı sınaqlarda ($n \rightarrow \infty$) (5-15b) shektegi tu'rine umtıladı. Sonin' 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.

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

bo'listiriliwi Puasson bo'listiriliwi dep ataladı.



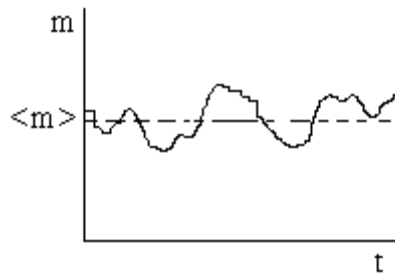
2-7 su'wret. n menen $\langle m \rangle$ nin u'lken ma'nislerindeki binomliq bo'listiriliw.

§ 2-6. Fluktuatsiyalar

Ko'lemdegi bo'leksheler saninin' ortasha ma'nisi. Joqarida aytilg'aninday ko'lemdegi bo'lekshelerdin' ortasha ma'nisi turaqli bolip qalmaydi, u'lken emes sheklerde o'zgeriske ushiraiddi. Printsipinde u'lken awisiwlar da mu'mkin, biraq itimallig'ı kem ha'm sonliqtan ju'da' siyrek boladi. V_1 ko'lemidegi bo'leksheler saninin' waqitqa baylanislig'ı su'wrette ko'rsetilgen. Aniqlama boyinsha V_1 ko'lemidegi bo'lekshelerdin' ortasha sani $T \rightarrow \infty$ bolg'anda:

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

shamasına ten'. Biraq sonin' menen birge (4-13) ergodik gipotezadan paydalanip waqit boyinsha ortashani ansambl boyinsha ortashag'a alip keliwge ha'm (4-5) formulasinan paydalanıwg'a boladi. Ondaı jag'dayda



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

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

Bul shamani bilay esaplawg'a boladi:

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

$p+q=1$ bolg'anlıqtan

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

Demek V_1 ko'lemindegi ortasha tıg'ızlıq barlıq V ko'lemindegi ortasha tıg'ızlıqqa ten' boladı eken. Bunnan bilay qaysı ortalaw boyınsha ga'p etilip atırğ'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 almastırıw 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:

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

$p+q=1$ ekenligin esapqa alıp

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

(2-19a) formuladan dispersiya ushın:

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

Demek standart awısıw:

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

Bul ten'lik sistemadag'ı bo'lekshelerdin' ulıwma sanına qarag'anda standart awısıwdın' a'stelik penen o'setug'inlig'in 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 formulaning 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 fluktuatsiyalardin' 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 bılajazamız:

$$\frac{\sqrt{\langle (\Delta m)^2 \rangle}}{\langle m \rangle} = \sqrt{\frac{V}{V_1}} \frac{1}{\sqrt{n}} = \frac{1}{\sqrt{\langle m \rangle}}. \quad (6-12)$$

Bul jerde $n = \langle m \rangle V/V_1$. (6-12) den *fluktuatsiyanın salıstırmalı tutqan ornı usı fluktuatsiya qarap atırılğan oblasttıń kemeyiwi menen artatug'ınlg'ı ko'rinedi*. Mısalı eger bir neshe bo'leksheden turatug'ın ko'lem alınsa fluktuatsiyalardin' 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. Iken da'llik penen bul shamalardı olardin' ortasha ma'nisine ten' dep aytıwıg'a boladı.

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

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

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

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

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

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

$$\langle f_i \rangle = \langle f_j \rangle = \dots \langle f \rangle. \quad (6-15)$$

Al (6-14) mına tu'rde jazıladı:

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

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

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

Bul an'latpanın' eki ta'repin de kvadratqa ko'terip, aling'an na'tiyjene ortalasay

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

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

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

(6-16) menen (6-19) dan salıstırmalı standart awısıw ushın alamız:

$$\frac{\sqrt{\langle (\Delta F)^2 \rangle}}{\langle F \rangle} = \frac{\sqrt{\langle (\Delta f)^2 \rangle}}{\langle f \rangle} \cdot \frac{1}{\sqrt{n}}. \quad (6-20)$$

(6-20) ulıwma jag'dayda bo'leksheler sistemasına tiyisli shamanın' salıstırmalı standart awısıwının' bo'leksheler sanının' kvadrat korenine keri proporsional kemeyetug'ınlg'ın 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 makroskopiyalıq parametrlar de o'zgeriske ushıraydı. Ten' salmaqlıq hal usı makroskopiyalıq parametrlardin' ortasha ma'nisi menen ta'riplenedi. Bunnan ten' salmaqlıq halda sistemanın' makroskopiyalıq parametrlari olardin' ortasha ten' salmaqlıq ma'nislerine ten' turaqlı shamalar bolıp qalmaydı degen juwmaq kelip shıg'adı. Bul parametrlar 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 kemeydi. Sonlıqtan makroskopiyalıq sistemalarda fluktuatsiyalardin' salıstırmalı shaması esapqa alarlıqtay u'lken emes ha'm sistemanın' barlıq makroskopiyalıq parametrlari u'lken da'llikte olardin' waqt boyınsha ortashasına ten'.

Sorawlar:

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

§ 2-7. Maksvell bo'listiriliwi

Molekulaların' tezlikler boyınsha bo'listiriliwi. Ha'r bir soqlıg'ısıw akti na'tiyjesinde molekulanın' tezligi tosattan o'zgeredi. Og'ada ko'p sanlı soqlıg'ısıwlar aqibetinde tezlikleri berilgen intervalındag'ı tezliktin' ma'nisine ten' bolg'an bo'leksheler sanı saqlanatug'in statsionar ten' salmaqlıq hal ornaydı. Bunday jag'dayda tezliklerdin' berilgen intervalındag'ı bo'leksheler sanı fluktuatsiyalar da'lliginde turaqlı tu'rde saqlanadı. Tezlikler boyınsha molekulaların' bo'listiriliwi birinshi ret Djeymss Klerk Maksvell (1831-1879) ta'repinen tabıldı ha'm onın' atı menen ataladı.

Molekulaların' ortasha kinetikalıq energiyası. Ortasha kinetikalıq energiya molekulaların' tezlikler boyınsha bo'listiriliwin ta'ripleytug'in a'hmiyetli makroskopiyaqlıq parametr bolıp tabıladı. Molekulaların' tezlikler boyınsha bo'listiriliwindegi onın' fundamentallıg'in anıqlawshı bas qa'siyet minadan ibarat: izolyatsiyalang'an ko'lemdegi ha'r qıylı sorttag'ı molekulaların' barlıg'ı da birdey ortasha kinetikalıq energiyag'a iye boladı. Bul ha'r qıylı sorttag'ı ha'r qıylı kinetikalıq energiyag'a iye molekulalar bir biri menen ta'sir etiskende olardıń kinetikalıq energiyaların' ortasha ten'lesetug'inlıg'in bildiredi.

Da'lillew ushın eki sorttag'ı molekulalardan turatug'in gaz aralaspasın qaraymız. Birinshi ha'm ekinshi sortqa tiyisli bolgan shamalardı 1 ha'm 2 indeksleri menen belgileyemiz. Barlıq mu'mkin bolg'an molekulalar jubın alıp qaraymız ha'm olardıń salıstırmalı tezlikleri $v_2 - v_1$ menen olardıń massa orayların' 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 orayların' tezlikleri menen molekulaların' 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 korrelyatsiyanı bag'anlıqtan $\langle (v_1 v_2) \rangle = 0$. Sonlıqtan $m_2 \langle v_2^2 \rangle = m_1 \langle v_1^2 \rangle$. Basqa so'z benen aytqanda

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

Endi sol ha'r qıylı sorttag'ı molekulalar bir biri menen energiyanın' almasıwına mu'mkinshilik beretug'in diywal menen ayrılg'an bolsın dep esaplayıq. Bul diywal tek energiya almasıwdag'ı ortalıq (da'lda'lıshı) bolıp g'ana xızmet etedi, al energiya almasıwdın' tiykarg'ı na'tiyjesine ta'sirin tiygizbeydi – diywaldın' eki ta'repindegi molekulaların' ortasha kinetikalıq energiyaları birdey boladı. Bunday tastıyıqlawdın' diywal arkalı energiya almasıp atırg'an birdey sorttag'ı molekulalar ushın da durıs ekenligi tu'sinikli. Diywal arqalı kinetikalıq energiya almasıw diywaldın' molekulalarına energiya beriwden ha'm bunnan keyin diywaldın' usı molekulaların' ekinshi ta'reptegi molekulalarg'a kinetikalıq energiyanı beriwden ibarat boladı. Diywaldın' ha'r bir ta'repindegi energiya almasıwdın' eki bag'ıt boyınsha bolatug'inlıg'ı tu'sinikli. Bunnan energiya almasıwların' na'tiyjesinde diywaldın' molekulaların' da ortasha kinetikalıq energiyasının' gaz molekulaların' ortasha energiyasına ten' bolatug'inlıg'ı ko'rinip tur.

Demek molekullar sistemasidag'ı energiya almasıwı orın alatug'ın barlıq molekullaradın' ortasha kinetikalıq energiyaları, sonday-aq sistemanın' barlıq ken'isliklik bo'limlerindeki (molekullaradın') ortasha kinetikalıq energiyalar birdey boladı.

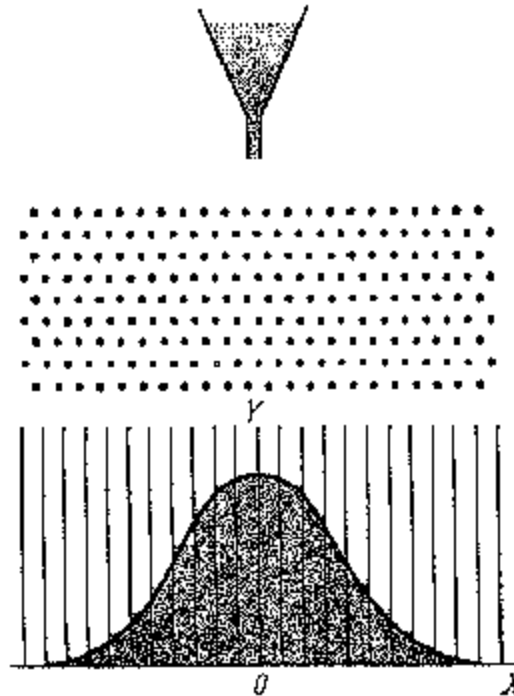
Sistemanın' usınday halı **termodinamikalıq ten' salmaqlıq** dep ataladı. Al ortasha kinetikalıq energiya **temperatura** dep atalatug'ın fizikalıq shama menen ta'riplenedi. Ortasha kinetikalıq energianın' turaqlılıg'ının' ornına a'dette temperaturanın' turaqlılıg'ın aytadı, al ortasha kinetikalıq energianın'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

Temperatura. Anıqlama boyınsha T temperatura molekullaradın' ortasha kinetikalıq energiyası menen bılay baylanısqa:

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

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.

Sİ birlikler sistemasında temperatura birligi **kelvin** bolıp tabıladı. Termodinamikalıq temperatura TSelsiya temperaturası menen $T = t + 273.15$ qatnası boyınsha baylanısqa.



2-9 su'wret. Galton doskasının' su'wreti.

Molekullaradın' tezlikleri boyınsha bo'listiriliw haqqındag'ı ma'selenin' statistikalıq ma'sele ekenligin tolıg'ıraq tu'siniw ushın **Galton doskası** dep atalatug'ın demonstratsiyalıq a'sbap ju'da' paydalı bolıp tabıladı (su'wrette ko'rsetilgen). Bul bet jag'ı tegis mo'ldir shiyshe menen jabılğ'an jiyi tu'rde shaxmat ta'rtibinde mıyıqlar qag'ılğ'an doska bolıp tabıladı. Mıyıqlardan to'mende bir birine parallel bolğ'an metall plastinkalar orналаstırılğ'an. Bul plastinkalar doska menen shiyshe arasındag'ı ken'islikti qutışılar dep atalatug'ın o'z-ara birdey ko'lemlerge bo'ledi. Mıyıqlaradın' joqarısında, a'sbaptın' ortasında sharshar orналаstırılğ'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 soqlig'iswlar'ga ushirap, aqir ayag'ında qutishalirdin' birine barip tu'sedi. Qaysi qutishag'a bo'lekshenin' barip tu'setug'inlig'in usi bo'lekshenin' qozg'alısına ta'sir jasaytug'in tosinnan ushirasatug'in faktorlardin' ko'p bolg'anlig'ı sebepli aldın aytiw mu'mkin emes. Tek g'ana bo'lekshenin' anaw yamasa minaw qutishag'a barip tu'setug'inlig'inin' itimallig'in aytiwg'a boladı. Bo'lekshenin' orayliq qutishag'a barip tu'siw itimallig'ı en' u'lken ma'niske iye boladı dep boljaw ta'biyiy na'rse. Haqiqatında da eger sharshar arqalı bo'lekshelerdi ag'izsaq, a'sbaptin' orayliq qutishalarına shettegi qutishalarg'a qarag'anda ko'birek bo'leksheler kelip tu'setug'inlig'ına ko'z jetkeriwge boladı. Eger sharshar arqalı jetkilikli da'rejedegi bo'leksheler o'tse olardin' qutishalar arqalı bo'listiriliwinin' aniq statistikaliq nızamı ko'rinedi. Bul nızamlı analitikaliq formula menen de ko'rsetiw mu'mkin. Ta'jiriybe bo'leksheler sanı ko'p bolg'anda bul bo'listiriliw

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

iymekligine asimptotaliq jaqınlasadı. A ha'm α on' ma'niske iye turaqlılar. α nın' ma'nisi a'sbaptin' qurılısına baylanisli bolıp, bo'leksheler sanına g'a'rezli emes. A turaqlısı bo'leksheler sanına baylanisli ha'm α menen normirovka sha'rti arqalı baylanisadı.

$u = \varphi(x) \equiv A e^{-\alpha x^2}$ 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' itimallig'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 qanaatlandırıwı 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 baylanistırıw 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 kvadartaliq yamasa ortasha arifmetikaliq qa'telikler menen baylanisli 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. Termodinamikaliq ten' salmaqlıq molekularlar arasındag'ı og'ada u'lken sandag'ı soqlig'iswlar na'tiyjesinde ornaydı. Ha'r bir soqlig'iswda molekula tezliginin' proektsiyaları Δv_x , Δv_y , 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 molekularlar og'ada ko'p sandag'ı soqlig'iswlar'ga ushirag'annan tezlikler

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

shamalarına ten' boladı.

Bul molekulanın' tezliginin' proektsiyaları qanday nızam menen bo'listirilgen dep soraw beriw mu'mkin. Ha'r bir proektsiya u'lken sandag'ı tosattan bolatug'in shamalardin' qosındısınan turadı. Bul tosattan ju'z beretug'in sanlar Gauss bo'listiriliwin qanaatlandıradı. Sonlıqtan (2-28) formulasına sa'ykes

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

SHamalardın' 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 proektsiyasının' $[v_x, v_x+dv_x]$ intervalında jatiw itimallıg'ı mınag'an ten':

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

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

$$dP(v_x, v_y, v_z) = A^3 \exp[-\alpha(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)] dv_x dv_y dv_z. \quad (7-7)$$

A turaqlısı normirovka sha'rtinen anıqlanadı:

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

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

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

ekenligin esapqa alsaq, onda

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

Molekulanın' kinetikalıq energiyasının' ortasha ma'nisin esaplaymız:

$$\left\langle \frac{mv^2}{2} \right\rangle = \frac{m}{2} \langle v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 \rangle = \frac{m}{2} \iiint_{-\infty}^{\infty} (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) dP(v_x, v_y, v_z) = \quad (7-11)$$

$$= \frac{m}{2} \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^{3/2} \iiint_{-\infty}^{\infty} (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) \exp[-\alpha(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)] dv_x dv_y dv_z.$$

(7-11) degi integrallar differentsiallaw jolı menen tabıladı. Mısalı:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} v_x^2 e^{-\alpha v_x^2} dv_x = \frac{\partial}{\partial \alpha} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\alpha v_x^2} dv_x = -\frac{\partial}{\partial \alpha} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} = \frac{1}{2} \alpha^{-3/2} \sqrt{\pi}. \quad (7-12)$$

Sonlıqtan (7-11) mına tu'rge iye boladı:

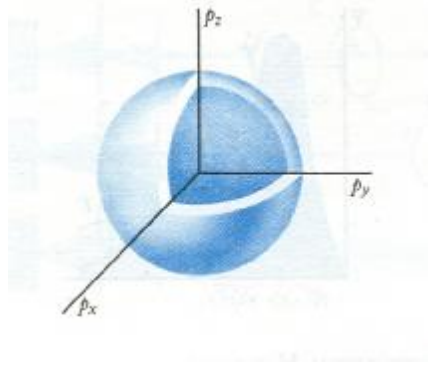
$$\left\langle \frac{mv^2}{2} \right\rangle = \frac{3m}{4\alpha}. \quad (7-13)$$

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

$$\alpha = \frac{m}{2kT} \quad (7-14)$$

ekenligin alamız. Onda

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



İmpulsler ken'isligindeki koordinatalar sistemasi

Tezliklerdin' bo'listiriliwi izotrop. Sonliqtan tezliklerdin' proektsiyalarinin' bo'listiriliwi bolg'an (7-15) ten tezlikdin' modulinin' bo'listiriliwine o'temiz. Bul maqsette tezlikler ken'isligindeki (yamasa impulsler ken'isligindeki, su'wretti qaran'iz) sferaliq koordinatalar sistemasina o'tken maqsetke muvapiq boladi ha'm (7-15) ti qalin'lig'i dv , radiusi $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$ bolg'an sferaliq qatlam boyinsha integral-laymiz. Bunnan

$$dv_x dv_y dv_z = v^2 d\Omega dv \quad (7-16)$$

an'latpasmina iye bolamiz. Bul an'latpadag'i $d\Omega$ denelik mu'yesh (usinday mu'yesh penen sferaliq qatlamnin' betinin' elementi ko'rinedi). Sferaliq qatlamnin' barliq beti boyinsha aling'an integraldin'

$$\int_{\Omega=4\pi} v^2 d\Omega = v^2 \int_{\Omega=4\pi} d\Omega = 4\pi^2 \quad (7-17)$$

ekenligi an'sat esaplanadi. Sonliqtan (7-15) ti qalin'lig'i dv bolg'an sferaliq qatlam boyinsha integrallasıq

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

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

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

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

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

$$dN = N F(v)dv.$$

Al F(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 İ.K.Kikoinnıń «Molekulyarnaya fizika» kitabında (Moskva. «Nauka» baspası. 1976. 480 b.) tezlikleri [v, v+dv] intervalındag'ı molekular dın salıstırmalı sanı ushın $\frac{dn}{n} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{m}{2kT} \right)^{3/2} v^2 \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT} \right) dv$ formulası berilgen. Demek ¹

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

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

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

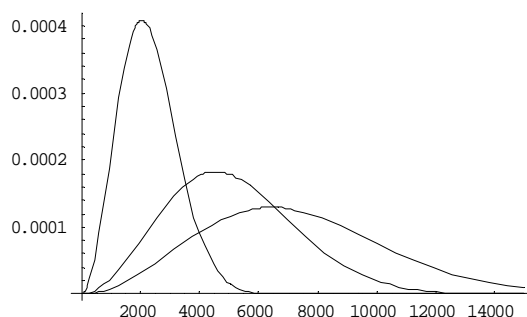
n sistemadag'ı barlıq molekular dın sanı. Bul intervaldag'ı molekular dın salıstırmalı sanı

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

¹ Haqıyqatında da, eger biz f(v) ushın usı formuladan paydalansaq «mathematica 5» programmalaw tilinde T = 300 K, 1500 K, 3000 K temperaturaları ushın mınaday programma jazamız:

```
m = 2 * 10-27
k = 1.38 * 10-23
T1 = 300
T2 = 1500
T3 = 3000
z1 = 4 * Pi * (m / (2 * Pi * k * T1))3/2
z2 = 4 * Pi * (m / (2 * Pi * k * T2))3/2
z3 = 4 * Pi * (m / (2 * Pi * k * T3))3/2
Plot[{z1 * v2 * Exp[-m * v2 / (2 * k * T1)], z2 * v2 * Exp[-m * v2 / (2 * k * T2)], z3 * v2 * Exp[-m * v2 / (2 * k * T3)]}, {v, 0, 15000}]
```

Na'tiyjede mınaday grafiklerdi alamız:



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

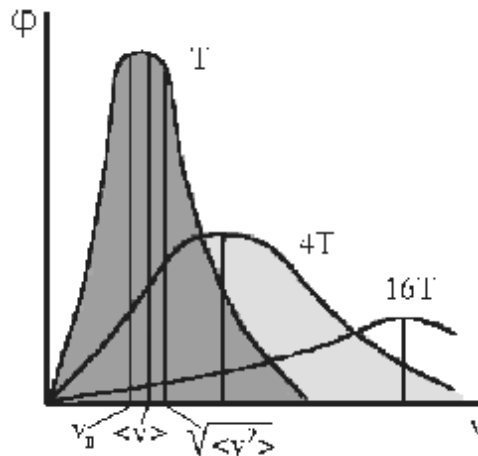
$$\langle \varphi \rangle = \int_0^{\infty} \varphi(v) f(v) dv. \quad (7-22)$$

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

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}, \quad \sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}. \quad (7-23)$$

formuların alamız.

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 ataladı. Bul ma'nis ekstremum sha'rti $df(v)/dv = 0$ menen anıqlanadı, yag'nıy

$$v_{\text{итм}} = \sqrt{\frac{2kT}{m}}. \quad (7-24)$$

(8-18) ha'm (8-19) lardı salıstırıp Maksvell bo'listiriliwinin' xarakterli tezlikleri arasındag'ı baylanıslardı alamız:

$$\sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{\frac{3\pi}{8}} \langle v \rangle = \sqrt{\frac{3}{2}} v_{\text{итм}}. \quad (7-25)$$

Komnatalıq temperaturalarda hawadag'ı kislorod penen azot molekularının' tezlikleri shama menen (400-500) m/s qa ten'. Vodorod molekulasının' tezligi usınday jag'daylarda shama menen 4 ese u'lken. Temperaturanın' o'siwi menen tezliktin' shaması \sqrt{T} ge proporsional o'sedi.

Idis diywalına molekularıdın' urılıwının' jiyiligi. X ko'sherin diywalg'a perpendikulyar etip bag'ıtlaymız ha'm molekular kontsentratsiyasın n_0 arqalı belgileyemiz. Bunday jag'dayda diywalg'a bag'ıtlang'an molekular ag'ısının' tıg'ızlıg'ı

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

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

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

(7-23) formulasın na'zerde tutıp aqırg'ı formulanı bilay 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 molekularının' [O₂] molekular sanın esaplayıq.

195 ten 205 ke shekemgi interval ju'da' kishkene bolg'anlıqtan ortasha haqqındag'ı teoremadan paydalanıwǵa 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 molekularlıq 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.

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

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

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

Ayqın na'tiyjege iye soqlıg'ısıwdın' itimallıg'ı kese-kesim menen ta'riplenedi.

Soqlıg'ısıwshı bo'lekshe noqatlıq dep esaplanadı, al usı bo'lekshe soqlıg'ısatug'ın nıshana-bo'leksheler ken'islikte kelip soqlıg'ısatug'ın bo'lekshenin' qozg'alıs bag'ıtına perpendikulyar bag'ıtta bazı bir σ kese-kesimine iye dep sanaladı.

Bul geometriyalıq emes, al oyda alıng'an maydan bolıp tabıladı. Qarap atırılǵan soqlıg'ısıwdın' itimallıg'ı bilay anıqlanadı: soqlıg'ısıwshı bo'lekshe basqa bo'leksheler menen ta'sirlespesten tuwrı sıızıq boyınsha qozg'alıp usı σ maydanına kelip soqlıg'ısıw itimallıg'ına ten' bolıwı kerek.

Meyli bo'lekshe kontsentratsiyası n_0 ge ten' bolg'an bo'leksheler joylasqan ko'lemnin' kese-kesimi S ke ten' bolg'an maydanına kelip tu'ssin. dx qalın'lig'ına iye qatlamda $n_0 S dx$ bo'lekshe joylasadi. Olardın' 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'ısıwının' itimallıg'ı

$$dP = dS/S = \sigma n_0 dx \quad (7-29)$$

shamasına ten'. **Bul qarap atırılğ'an protsess ushın kese-kesim S tin' anıqlaması bolıp tabıladi.** dP itimallılıg'ı soqlıg'ısıw protsessinin' ayqın nızamlılıqların esapqa alıw jolı menen esaplanadı yamasa eksperimentte o'lishenedi, al kese-kesim (7-29)-formulası boyınsha alınadı.

Mısalı. Soqlıg'ısıw protsessinde kelip tu'siwshi bo'lekshe soqlıg'ısıwdın' aqıbetinde qozg'alıs bag'ıtın o'zgerledi ha'm berilgen bag'ıt boyınsha qozg'alıstan shıg'ıp qaladı. Uran yadroları joylasqan ken'isliktegi neytronnıń qozg'alısında bolsa protsess yadrolardıń birewi ta'repinen neytrondı jutıp alınıwdan turadı. Eki jag'dayda da esaplanıwshı yamasa o'lisheniwshı shama bo'lekshe dx aralıg'ın o'tkendegi waqıyanın' itimallılıg'ı bolıp tabıladi. Al usı mag'lıwmatlardın' ja'rdeminde esaplanatug'ın shama kese-kesim σ bolıp tabıladi. Al bul kese-kesim bunnan keyingi esaplawlarda ha'm talqılawlarda en' da'slep berilgen shama sıpatında paydalanıladı.

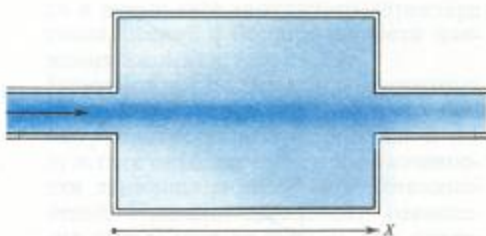
Erkin ju'rigen joldın' ortasha uzınlıg'ı. A'llette σ ha'm n_0 shamaları x tan g'a'rezli emes. Sonlıqtan waqıyanın' itimallılıg'ı kelip tu'siwshi bo'lekshenin' o'tken jolına proporsional o'sedi. Usı itimallılıq birge ten' bolg'an joldın' uzınlılıg'ı $\langle l \rangle$ **erkin ju'riw jolının' ortasha ma'nisi** dep ataladı. Bul ma'nisti anıqlaw ushın (7-29) den $\sigma n_0 \langle l \rangle = 1$ alınadı ha'm

$$\langle l \rangle = 1/(\sigma n_0). \quad (7-30)$$

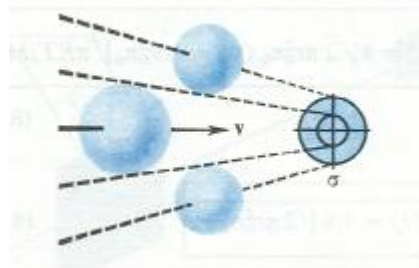
Bul shama nıshana zatı ishinde soqlıg'ıwshı (kelip tu'siwshi) bo'lekshenin' ortasha erkin ju'riw jolı bolıp tabıladi.

Soqlıg'ısıwlardın' kese-kesimin eksperimentte anıqlaw. Meyli kelip tu'siwshi bo'leksheler da'stesi X ko'sheri bag'ıtında qozg'alsın (su'wretti qaran'ız). Da'ste bo'leksheleri basqa bo'leksheler menen soqlıg'ısıp o'zlerinin' bag'ıtın o'zgerledi ha'm da'steden shıg'ıp kaladı. Sonlıqtan da'stedegi bo'leksheler ag'ısı $I(x)$ zat arqalı o'tiw barısında, yag'nıy x tın' osiwi menen kemeyedi. dx qatlamın o'tkendegi bo'lekshelerdin' ag'ısının' tıg'ızlıg'ının' ha'lsirewi $dI(x)$ bo'lekshe-nıshana menen bo'lekshenin' soqlıg'ısıwlar sanına ten'. Da'stenin' bo'lekshesinin' ha'r birinin' soqlıg'ısıwının' itimallılıg'ı (7-29) ge ten' bolg'anlıqtan ag'ıstın' tıg'ızlıg'ının' ha'lsirewi dI/P g'a ten'. Demek tu'siwshi da'stedegi bo'leksheler ag'ısının' tıg'ızlıg'ı ushın mına ten'lemenı alamız:

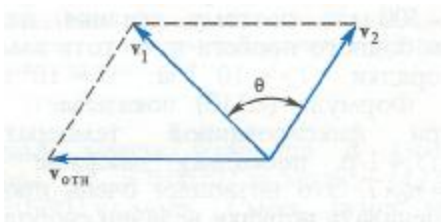
$$dI = -I(x)\sigma n_0 dx. \quad (7-31)$$



Soqlıg'ısıwlardın' kese-kesiminin' maydanın eksperimentte anıqlawdı tu'sindiriwshı su'wret.



Qattı sharlardın' soqlıg'ısıwının' kese-kesimin esaplawdı tu'sindiriwshı su'wret.



Ortasha salıstırmalı tezlikti esaplawg'a.

Minus belgisi x tın' o'siwi menen (yag'nıy da'stenin' zattag'ı qozg'alısı barısında) ag'ıstın' tıg'ızlıg'ının' kemeyetug'ınlg'ın bildiredi. (7-31) ti sheshiw arqalı tabamız:

$$I(x) = I(0) \exp(-\sigma n_0 x) = I(0) \exp(-x / \langle l \rangle). \quad (7-32)$$

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

$$\sigma = \frac{1}{n_0 x} \ln \frac{I(0)}{I(x)}. \quad (7-33)$$

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

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

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

waqıtta o'tedi. Al

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

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

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

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

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

Bunnan

$$\langle l \rangle = 1 / (4\pi r_0^2 n_0) \quad (7-35)$$

ekenligi kelip shıg'adı. (7-34) nın' tiykarında soqlıg'ısıwlar jiyiliginin' mınag'ın ten' ekenligin alamız:

$$v' = 4\pi r_0^2 n_0 \langle v \rangle. \quad (7-36)$$

Haqıyqatında gazde nıshana-molekulalar qozg'alısta boladı, al kelip tu'siwshi molekulalar ha'r qıylı tezlik penen qozg'aladı. Qala berse nıshana-molekulaların' da, kelip tu'siwshi molekulaların' da tezlikleri Maksvell bo'listiriliwi ja'rdeminde beriledi. Bunı esapqa alıw ushın barlıq talqılıwlar dı o'zgerissiz qaldıramız, tek (7-36) degi $\langle v \rangle$ tezligi haqqında aytilganda tu'siwshi molekulaların' ortasha tezligin tu'sinemiz. v_1 ha'm v_2 tezlikleri menen qozg'alıwshı eki molekulanın' salıstırmalı tezligi mınagan ten':

$$v_{\text{салыст}} = v_1 - v_2.$$

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

$$v_{\text{салыст}} = \sqrt{(v_1 - v_2)^2} = \sqrt{v_2^2 + v_1^2 - 2v_1v_2 \cos \theta}. \quad (7-37)$$

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

Salıstırmalı tezliktin' ortasha ma'nisin (7-19) Maksvell bo'listiriwin esapqa alıp esaplaw za'ru'r. Sferalıq koordinatalar sistemasının' Z ko'sherin v_2 bag'ıtında bag'ıtlap alamız:

$$\langle v_{\text{салыст}} \rangle = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\pi \sin\theta d\theta \int_0^\infty dv_1 dv_2 dv_{\text{салыст}} f(v_1) f(v_2) = \sqrt{2} \langle v \rangle = \sqrt{16RT/(\pi M)}. \quad (7-38)$$

Bul an'latpadag'ı $1/(4\pi)$ ko'beytiwshisi tezliklerdin' bir birine salıstırgandag'ı mu'mkin bolg'an barlıq bag'ıtları boyınsha (yag'nıy tolıq denelik mu'yesh 4π boyınsha) salıstırmalı tezlikti ortashalawdı esapqa aladı. Al $\langle v \rangle$ bolsa (7-23)-formula beretug'ın Maksvell bo'listiriliwindegi molekulaların' qozg'alısının' ortasha ma'nisi.

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

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

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

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

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

Kese-kesimdi anıqlag'anda nıshanag'a kelip tiyiwshi bo'lekshe noqatlıq dep qabıl etiledi. Kese-kesimnin' bo'lekshenin' geometriyalıq o'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

İdeal gazlardin' kinetikalıq teoriyasının' tiykarg'ı ten'lemesi. Bul ten'lemelerin' ha'r kıylı formaları ha'm usı formalarg'a baylanışlı bolg'an nızamlıqlar. Barometrlık formula talqılanadı ha'm hawa sharı menen aerostattın' ko'teriw ku'shinin' payda bolıw mexanizmlari dodalanadı. Klapeyron-Mendeleev ten'lemesi. Dalton nızamı. Avagadro nızamı. Basımdı o'lshepw. Mollik ha'm salıstırmalı shamalar.

İdeal gazlardin' kinetikalıq teoriyasının' tiykarg'ı ten'lemesi. Basım molekullarlardıń ıdısqıywallarına urılıwının' saldarınan payda boladı. Ha'r bir molekula diywalg'a kelip soqlıg'ısıwdın' aqıbetinde og'an impuls beredi. Usının' saldarınan molekulanın' impulsı de tap sonday shamag'a o'zgeredi. Eger X ko'sherin ıdısqıywalına perpendikulyar etip bag'ıtlasaq bir soqlıg'ısıwdag'ı ıdısqıywalı ta'repinen alinatug'ın impuls $2mv_x^{(+)}$ ke ten' (m arqalı molekulanın' massası belgilengen). Basım maydanı 1 sm^2 (1 m^2) bolg'an diywalg'a 1 sekund waqıt ishinde berilgen impulsqa ten'. Sonlıqtan basım ıdısqıywalına normal bag'ıtlang'an molekullarlardıń impulsının' ekiletilgen ag'ısına ten'.

İdısqıywalına qaray bag'ıtlang'an impuls ag'ısı

$$n_0 \int f(v_x^{(+)}, v_y, v_z) v_x^{(+)} dv_x^{(+)} dv_y dv_z m v_x^{(+)} \quad (8-1)$$

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

$$r_x = 2n_0 m \int f(v_x^{(+)}, v_y, v_z) [v_x^{(+)}]^2 dv_x^{(+)} dv_y dv_z = n_0 kT. \quad (8-2)$$

Tap usınday jol menen basqa qurawshılardı da tabamız:

$$p_x = p_y = p_z = p = n_0 kT. \quad (8-3)$$

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

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

$$p = \frac{2}{3} \left\langle \frac{mv^2}{2} \right\rangle n_0. \quad (8-4)$$

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

(9-4) ti keltirip shıg'arg'anda molekulların' ıdı diywalına urılıwın' nızamı haqqında hesh na'rse de boljap ayılmadı. Bul protsess ju'da' quramalı ha'm molekullar menen diywaldın' materialınan ja'ne diywaldın' betin' kaday da'rejede tegislengenligine baylanışlı. Atomların' diywaldan shag'ılısıwı ulıwma aytqanda aynalıq shag'ılısıw nızamı boyınsha ju'zege kelmeydi, yag'nıy tu'siw mu'yeshi shag'ılısıw mu'yeshine ten' emes. Ko'pshilik jag'daylarda «kosinuslar nızamı» orınlanıp, bul nızamg'a sa'ykes shag'ılısıwdın' intensiviligi bazı bir bag'ıtlarda usı bag'ıt penen betke normal arasındag'ı mu'yeshin' kosinusına proporsional boladı. Tu'siw mu'yeshinen bul intensivlik derlik g'a'rezli emes. Eger bet monokristaldın' kaptal beti bolsa, onda shag'ılısıw nızamı kristaldın' qa'siyetlerinen g'a'rezli bolıp, ha'r kıylı bag'ıtlar boyınsha maksimumlar menen minimumlarga iye boladı. Biraq basımdı esaplag'anda olardıń hesh qaysısın da esapqa almawg'a boladı.

Klapeyron-Mendeleev ten'lemesi. n arqalı gazdın' V ko'lemindegi molekulların' ulıwmalıq sanın belgileyemiz. $n_0 = n/V$ ekenligin esapqa alıp (8-3) ti bılay jazamız

$$pV = nkT. \quad (8-5)$$

n nin' shaması tikkeley o'lshenbeytug'ın bolg'anlıqtan bul ten'lemege basqasha qolaylı tu'r beremiz. Molekulların' n molindegi molekulların' ulıwma sanı $n = vN_A$. Sonlıqtan (8-5) ti bılay jazamız:

$$pV = vN_A kT = vRT. \quad (8-6a)$$

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

Mollik ko'lem tu'sinigin kirgiziw arqalı (8-6a) g'a basqa tu'r beremiz. Mollik ko'lem V_m dep zattın' 1 molinın' ko'lemine aytamız: $V_m = (\text{gaz ta'repinen iyelengen ko'lem})/(\text{gazdegi moller sanı}) = V/v$. Bunday jag'dayda

$$pV_m = RT. \quad (8-6b)$$

Ko'pshilik jag'daylarda (8-6a) g'a gaz massasın kirgizedi. Zattın' massası m menen mollik massa M arasında $M = m/v$ baylanısı bar. Demek

$$pV = \frac{m}{M} RT. \quad (9-7)$$

(8-6a) formulasına B.P.E.Klapeyron ha'm D.İ.Mendeleevlerdin' atın' beriliwi to'mendegi jag'daylarg'a baylanışlı. 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.İ.Mendeleev ta'repinen jetilistirildi. Ol ten'lemege mollik gaz turaqlısın endirdi ha'm ten'lemenı (8-7) tu'rinde jazdı.

Dalton nızamı. Gazlerdin' aralaspasın' ha'r bir qurawshısın' bir birinen g'a'rezsiz ekenligi joqarıda ayılıp o'tilgen edi. Sonlıqtan ha'r bir qurawshı (8-3) ke sa'ykes o'z basımın payda etedi. Al tolıq basım ha'r bir qurawshı payda etken basımlardıń qosındısına ten':

$$p = n_{01}kT + n_{02}kT + \dots + n_{0i}kT = p_1 + p_2 + \dots + p_i. \quad (8-8)$$

Bul formulada p_i arqalı **partsiyalıq basım** belgilengen. (8-8) ten'ligi menen an'latılǵ'an nızam **Dalton nızamı** dep ataladı. A'lbette jetkilikli u'lken basımlarda Dalton nızamı juwıq tu'rde orınlanadı. Sebebi bul jag'daylarda aralaspanın' ha'r tu'rli qurawshıları arasında o'z-ara ta'sirlesiw sezile baslaydı ha'm na'tiyjede olar bir birinen g'a'rezsiz bolıp qala almaydı. Bul haqıyqatında da real jag'daylarda u'lken basımlarda orın aladı. Bul nızam 1801-jılı D.Dalton (1766-1844) ta'repinen ashıldı ha'm ol bul nızamdı atomlıq ko'z-qaras ja'rdeminde tu'sindirdi.

Gaz aralaspasının' qurawshılarının' partsiyalıq basımın, massasın ha'm mollik massasın sa'ykes p_i , m_i ha'm M_i arqalı belgilep Dalton nızamı (8-7) nın' ja'rdeminde (8-7) ten'lemesin bilayınsha jazamız:

$$(p_1 + p_2 + \dots + p_i)V = \left(\frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2} + \dots + \frac{m_i}{M_i} \right) RT. \quad (8-9)$$

Gaz aralaspasının' tolıq basımın $p = p_1 + p_2 + \dots + p_i$, massasın $m = m_1 + m_2 + \dots + m_i$ arqalı belgileymiz ha'm gaz aralaspasının' ortasha mollik massası $\langle M \rangle$ shamasın kirgizemiz. Onın' shamasın $1/\langle M \rangle = (1/m)(m_1/M_1 + m_2/M_2 + \dots + m_i/M_i)$ ten'ligi menen anıqlaymız ha'm (8-9) ten'lemesin bir qurawshıǵ'a iye gaz ushın jazılǵ'an (8-7) ten'lemesindey etip jazamız:

$$pV = \frac{m}{\langle M \rangle} RT. \quad (8-10)$$

Avagadro nızamı. İdeal gazlerdin' hal ten'lemesi (8-5) tan birdey temperatura menen birdey basımlarda qa'legen gazdin' o'z-ara ten'dey bolǵ'an ko'lemlerinde birdey sandag'ı molekulalardın' jaylasatug'inlıǵ'ı ko'rınip 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. A'dettegidey sharayatlarda ($p = 101.325$ kPa; $T = 273.15$ K) bul ko'lem

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

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

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

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

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

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

Ko'p jag'daylarda formulalar mollik shamalar ushın da, salıstırmalı shamalar ushın da birdey tu'rge iye boladı. Sonlıqtan olardı eki ret jazıp otırıwdın' ha'm indeksler menen olardı quramalastırıwdın'

za'ru'rliğı joq. Biraq eger qa'teliklerge jol qoyıw mu'mkin bolg'an jag'daylar ushırasatug'ın bolsa shamanın' xarakteri onın' belgilewleri menen an'latıladı.

Mısal retinde ideal gaz ushın ten'lemenı qaraymız. (8-7) tu'rinde jazılğ'an ten'leme massası m ge ten' mollik massası M bolg'an ha'm V ko'lemin iyelewshi gaz ushın ten'leme bolıp tabıladı. Al

$$pV = \nu RT$$

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

$$pV_m = RT$$

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

$$pv = R_0 T$$

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

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

§ 2-9. Temperatura

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

Termometrlik dene ha'm termometrlik shama. Temperatura denenin' «qızdırılğ'anlıg'ının» sanlıq o'lishemi bolıp tabıladı. A'lbette «Qızdırılğ'anlıq» tu'sinigi subektov tu'siniklerdin' katarına kiredi. «Qızdırılğ'an» dene «qızdırılmağ'an» dene menen uzaq waqt bir birine tiydirilip qoyılsa «qızdırılğ'an» deneden «qızdırılmağ'an» denegе jıllılıq o'tedi ha'm na'tiyjede «qızdırılmağ'an» denenin' temperaturası artadı dep esaplaymız. Denenin' «qızdırılğ'anlıq» da'rejesi usı «qızdırılğ'anlıq» qa baylanisli bolg'an metariiallıq denelerdin' xarakteristikaları menen o'lishenedi.

Mısalı «qızdırılğ'anlıq» qa qattı denenin' uzınlıg'ı, gazdın' basımı baylanisli boladı. Uzınlıq penen basımdı o'lishewdin' usılları jaqsı belgili. Sonlıqtan da «qızdırılğ'anlıq» tı o'lishew a'dette basqa bir shamanı o'lishewge alıp kelinesi.

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

Temperaturanın' empirikalıq shkalası. En' aldı menen termometrlik deneni saylap alamız. Termometrlik shamanı 1 ha'ripi menen belgileyміз. Termometrlik dene retinde metal sterjen alanıwı mu'mkin. A'piwayılıq ushın suwdın' qatıw noqatı menen qaynaw noqatın alayıq. O'lishewler qatıw noqatında 1_1 , qaynaw noqatında 1_2 uzınlıg'ın ko'rsetken bolsın. *Temperatura dep denenin' «qızdırılğ'anlıg'ın» ta'ripleytug'ın 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

$$I^0 = \frac{l_2 - l_1}{t_2 - t_1} \quad (9-1)$$

shamasına aytamız.

Termometrlik denenin' temperaturası dep

$$t = t_1 + \frac{l_t - l_1}{I^0} = t_1 + \frac{l_t - l_1}{l_2 - l_1} (t_2 - t_1) \quad (9-2)$$

shamasın tu'sinemiz. Bul jerdegi l_t o'lsheńip atırılıg'an «qızdırg'anlıqtı» o'lshegende alıng'an termometrlik shama.

(9-1) ha'm (9-2) formulalar temperaturaların' empirikalıq shkalasın ta'ripleydi. Olar termometrlik dene menen termometrlik shama anıq saylap alıng'anda bir ma'niske iye boladı.

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

| SHkala | t_2 | t_1 |
|-----------|-------|-------|
| TSelsiya | 100 | 0 |
| Reomyur | 80 | 0 |
| Farengeyt | 212 | 32 |

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

$$\begin{aligned} t^0C &= \frac{l_t - l_1}{l_2 - l_1} 100, \\ t_R &= (l_t - l_1) * 80 / (l_2 - l_1), \\ t_F &= 32 + (l_t - l_1) * 180 / (l_2 - l_1). \end{aligned} \quad (9-3)$$

Bul formulalarda bir termometrlik dene ha'm bir termometrlik shama alınadı dep esaplang'an. (9-3) ten bir shkaladag'ı temperaturanı ekinshi shkalag'a o'tkeriw formulası an'sat keltirilip shıg'arıladı:

$$t_R = 0,8 * t^0C, \quad t_F = 32 + 1,8 * t^0C. \quad (9-4)$$

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

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

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

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

Temperaturalardıń absolyut termodinamikalıq shkalası. Termometrlik dene ushın qoyılatug'ın talaplar usınday dana retinde ideal gazdı alıw haqqındag'ı pikirdi payda etedi. İdeal gazdın' hal ten'lemesi $pV = \nu RT$ termometrlik shama retinde da'l o'lsheñiwı mu'mkin bolg'an V yamasa r shamaların alıwdın' mu'mkin ekenligin ko'rsetedi. Bunday termometrlik denede qaytadan o'lsheñler ju'rgizgende da'slepkeyde shamaların' da'l alınatug'ınlig'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. İdeal gazdın' ten'lemesi bolg'an (8-6a) 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' anıqlamasın' na'tiyjesi bolıp qaladı. Bul jag'dayda ideal gazdın' ekinshi g'a'rezsi nızamı retinde $r_1/r_2 = T_1/T_2$ SHarl nızamı alınadı.

Reperlik noqatlar retinde suwdın' eriw ha'm qaynaw temperaturaların alıwg'a boladı. Bul temperaturalar 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 temperaturasında r_1 ha'm qaynaw temperaturasında r_2 basımların o'lsheñiwı mu'mkin. Usınday o'lsheñlerdin' 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 $T_1 = 273.15\text{ K}$ ha'm $T_2 = 373.15\text{ K}$ shamaların beredi. Solay etip temperaturalar shkalası tolıq belgilenip alınadı.

Biraq joqarıda ayılğ'anday etip temperaturalar shkalasın qabıl etiw tolıg'ı menen qanaatlandırılıq emes. Sebebi suwdın' eriw menen qaytaw temperaturası basımdan g'a'rezli. Sonlıqtan SI sistemasında suwdın' eriw temperaturasına 273.16 K , al temperatura birliğı retinde suwdın' eriw temperaturası menen absolyut nol arasındag'ı ayırmanın' $1/273.16$ bo'legi qabıl etilgen.

Termometrlik dene retinde ideal gazdı qabıl etip temperaturanı

$$T = \frac{273.16}{p_0} p \quad (9-5)$$

formulası menen esaplawg'a boladı. p_0 suwdın' eriw temperaturasında r_1 basım, p - o'lsheñip atırg'an temperaturadag'ı basım. O'lsheñ barısında gazdın' ko'lemi V turaqlı bolıp qalıwı kerek.

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

Kelvin boyınsha nol. (8-6) ten'lemesinen to'mendegiler kelip shıg'adı:

İdeal gazdın' teris ma'nisli basımın' bolmawına baylanışlı absolyut termodinamikalıq temperatura belgisin o'zgerge almaydı. Reperlik temperatura retinde on' ma'nisli temperatura qabıl etilgenlikten termodinamikalıq temperatura teris ma'nisti qabıl 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 op-eratsiyalardin' na'tiyjesinde mu'mkin emesligi termodinamikada *termodinamikanın' u'shinshi basla-ması* dep atalıwshı postulat sıpatında qabıl etiledi.

Temperatura termometrlik shama bolıp tabılmaydı. Sonlıqtan temperaturanı o'lshew barlıq waqıtta da barometrдин' ja'rdeminde biyiklikti o'lshewdi eske tu'siredi. Barometrдин' ja'rdeminde biyiklik basımdı o'lshew yamasa barometrди biyiklikten erkin tu'rde taslap jiberip, onın' Jer betine kelip jetemen degenshe waittı o'lshew arqalı a'melge asırıladı. Basqa jolı joq.

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

Temperaturanın' xalıqaralıq a'meliy shkalası o'lshew a'sbapların an'sat kali-brovkalaw ha'm temperaturanın' absolyut termodinamikalıq shkalasın jetkilikli da'rejede a'piwayı ha'm da'l etip du'zip alıwdı a'melge asırıwg'a karatılğ'an.

Absolyut termodinamikalıq temperatura o'z belgisin o'zgerte almaydı. Bul tem-peraturanı on' ma'niske iye dep esaplaw ulıwma tu'rde qabıl etilgen. Sonlıqtan bunday temperatura teris ma'niske iye bolmaydı.

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

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

Temperaturanın' sırtqı potentsial maydannan g'a'rezsizligi. Sırtqı potentsial maydanda turg'an gazdin' tolıq energiyası $E = \frac{mv^2}{2} + E_p$ g'a ten', E_p - molekulanın' potentsial energiyası. Potentsial may-danda qozg'alg'anda bo'lekshenin' kinetikalıq energiyası o'zgeredi. Da'slepki ko'z-qaras penen qarag'anda molekulalardin' 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 aytlg'anlar potentsial maydanda turg'an jag'daylar ushın da orınlanadı. Maksvell bo'listiriliwi de o'zinin' a'hmiyetin tolıq saqlaydı. De-mek *termodinamikalıq ten' salmaqlıq halında sırtqı potentsial maydanda turg'an sistemanın' barlıq noqatlarında temperatura birdey ma'niske iye boladı.*

Sırtqı potentsial maydan molekulalardin' 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 , dy , dz bolg'an kubtın' ishindegi molekulalarg'a ta'sir etetug'ın ku'sh:

$$dF_{1x} = -n_0 dydz dx \frac{\partial E_p}{\partial x}. \quad (10-1)$$

n_0 - molekular kontsentratsiyası. Kubtin' X ko'sheri bag'ıtındaǵı jaqları arasındaǵı basımlar ayırması $\frac{\partial p}{\partial x} dx$ qa ten'. Al usı ayırmanın' bar bolıwı sebepli payda bolǵan X ko'sheri bag'ıtında ta'sir etiwshi ku'sh:

$$dF_{2x} = -\frac{\partial p}{\partial x} dx dy dz. \quad (10-2)$$

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

$$\frac{\partial p}{\partial x} dx = -\frac{\partial E_p}{\partial x} dx dy dz. \quad (10-3)$$

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

$$\frac{\partial p}{\partial x} dx + \frac{\partial p}{\partial y} dy + \frac{\partial p}{\partial z} dz = -n_0 \left[\frac{\partial E_p}{\partial x} dx + \frac{\partial E_p}{\partial y} dy + \frac{\partial E_p}{\partial z} dz \right] = -n_0 dE_p. \quad (10-4)$$

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

$$dp = kT dn_0 \quad (10-5)$$

ha'm

$$\frac{dn_0}{n} = -\frac{dE_p}{kT}. \quad (10-6)$$

(x_0, y_0, z_0) ha'm (x, y, z) noqatları arasındaǵı ıqtıyarlı alıng'an jol boyınsha bul an'latpanı integrallap **Boltsman bo'listiriwin** alamız:

$$n_0(x, y, z) = n_0(x_0, y_0, z_0) * \exp \left[-\frac{E(x, y, z) - E(x_0, y_0, z_0)}{kT} \right]. \quad (10-7a)$$

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

Eger (x_0, y_0, z_0) noqatındaǵı potentsial energianı nolge normirovkalasaq

$$n_0 = n_{00} \exp \left[-\frac{E(x, y, z)}{kT} \right], \quad (10-7b)$$

bul jerde $n_0 = n_0(x, y, z)$, $n_{00} = n_0(x_0, y_0, z_0)$.

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

$$n_0 = A \exp \left[-\frac{E(x, y, z)}{kT} \right], \quad (10-8)$$

al normirovka turaqlisın normirovka sha'rtinen tabamız:

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

bul jerde V sistema ko'lemi. Bul sha'rtten (10-8) di esapqa alıp iye bolamız:

$$\frac{n}{A} = \int_V \exp \left[-\frac{E(x, y, z)}{kT} \right] dx dy dz. \quad (10-9)$$

Boltsman bo'listiriwi (10-8) potentsial energiya $E_p = E(x, y, z)$ tek g'ana koordinatag'a baylanisli bolg'anda emes, al basqa da o'zgermeli shamalg'a baylanisli bolg'an jag'daylarda da duris boladi. Misali elektrlik momenti r bolg'an polyar molekulaning kernewliligi E bolg'an sirtqi elektr maydanindagi potentsial energiyasi $E_p = -pE \cos \theta$, bul jerde θ elektr momenti vektori menen kernewlilik vektori arasindagi mu'yesh. Termodinamikaliq ten' salmaqliqta polyar molekulalarning elektr momentleri (10-8) formulasida $E_p = -pE \cos \theta$ bolg'ang'a sa'ykes denelik mu'yeshler boyinsha bo'listiriledi.

Idistagi gazlarning aralaspasi. Meyli ultanining maydani S , biyikligi h_0 bolg'an tsilindr idista eki sorttag'i molekulalar aralaspasi bolsin. Birinshi sort molekulalarning toliq sani n_1 , ekinshisidiki n_2 , al mas-salari sa'ykes m_1, m_2 dep belgilensin. Biyiklikke baylanisli molekulalarning bo'listiriliwin tabamız.

Molekulalarning potentsial energiyasi $h = 0$ de nolga ten' etip normirovkalansin. h biyikligidagi potentsial energiya $U = mgh$ boladi. Demek kontsentratsiyaning bo'listiriliwi (10-7a) g'a sa'ykes

$$n_{01}(h) = n_{01}(0) \exp [-m_1 gh / (kT)], \quad (10-10)$$

$$n_{02}(h) = n_{02}(0) \exp [-m_2 gh / (kT)].$$

Normirovka sha'rtinen

$$\begin{aligned} S \int_0^{h_0} n_{01}(h) dh &= n_1, \\ S \int_0^{h_0} n_{02}(h) dh &= n_2 \end{aligned} \quad (10-11)$$

to'mendegidey ten'likler alamiz:

$$n_{01}(0) = \frac{n_1 m_1 g / (SkT)}{1 - \exp [-m_1 gh_0 / (kT)]}, \quad (10-12)$$

$$n_{02}(0) = \frac{n_2 m_2 g / (SkT)}{1 - \exp [-m_2 gh_0 / (kT)]}.$$

Ha'r qanday biyikliklerdegi molekulalarning kontsentratsiyalarining qatnasi:

$$n_{02}(0)/n_{01}(0) = [n_2 m_2 / (n_1 m_1)] * [1 - \exp \{-m_1 g h_0 / (kT)\}] / [1 - \exp \{-m_2 g h_0 / (kT)\}] * \exp [-(m_2 - m_1) g h / (kT)]. \quad (10-13)$$

(10-10) formulasidan u'ikenirek massali molekullarning biyiklikke baylanishi kontsentratsiyasining tezirek kemeyetug'inligi ko'rinib tur. (10-13)-formula awir gaz tiykarinan ıdistin' to'meninde, al jen'il gaz ıdistin' joqarisında ko'birek kontsentratsiyalanadi. Bul hawadan jen'il bolg'an ushiw apparatlarining ko'teriliw ku'shinin' payda bolıw sebebi bolıp tabiladi.

Maksvell ha'm Boltsman bo'listiriliwleri arasındag'i baylanis. Maksvell ha'm Boltsman bo'listiriliwleri Gibbs bo'listiriliwinin' quramlıq bo'lekleri bolıp tabiladi.

Gibbs bo'listiriliwi (yamasa ko'p jag'daylarda kanonikalıq bo'listiriliw dep te ataladi) bilay jaziladi:

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

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

Temperatura ortasha kinetikalıq energiyadan kelip shıg'adi. Sonliqtan potentsial maydanda nelikten temperatura turaqlı bolıp qaladi 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 joqari qaray qozg'alg'anda kinetikalıq energiyaları kemeyedi, temperatura bolsa o'zgermey qaladi, al bo'lekshe to'menge qaray qozg'alsa kinetikalıq energiya artadi, al ortasha energiya turaqlı bolıp qala ma?

Bul jag'day bilayınsha tu'sindiriledi: Ko'terilgende bo'leksheler jıynag'ınan en' a'steleri, en' «salqınları» ayırılıp shıg'adi. Sonliqtan ortasha energiya aniqlang'anda bo'lekshelerdin' barlıg'i boyınsha esaplaw ju'rgizilmeydi. Al sol biyiklikte jaylasqan «ıssıraq» molekullar boyınsha esaplaw ju'rgiziledi. Eger nollik biyiklikten h biyikligine bazı bir sandag'i 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'alıwshi salqın» bo'leksheler h biyikligine jete almaydi. 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 energiyani esaplasaq, onda bul ortasha kinetikalıq energiyanın' ma'nisi nollik biyikliktegi barlıq bo'lekshelerdi esapqa alg'andag'i ortasha kinetikalıq energiyanın' ma'nisinen artıq bolıp shıg'adi. Sonliqtan h biyikligindegi ha'r bir bo'lekshenin' ortasha kinetikalıq energiyası haqiqatında da kemeydi dep ayta alamız. Bunday ma'niste bo'leksheler toparı joqarig'a ko'terilgende «salqınlawdın» ju'z bergengligin ko'remiz. Biraq, eger h biyikliginde ha'm nollik biyiklikte usı biyikliklerdegi barlıq bo'leksheler esapqa alinatug'in bolg'anda olardin' ha'r birine sa'ykes keliwshi ortasha energiyalar, sog'an sa'ykes temperaturalar birdey boladi. Bunnan

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

Planetalarđın' atmosferası. SHar ta'rizli dene payda etken awırlıq maydanındag'i m massalı bo'lekshenin' potentsial energiyası:

$$E_p(r) = -G \frac{vm}{r}. \quad (10-16)$$

Planetalarđın', sonın' ishinde Jerdin' atmosferası ten' salmaqlıq halda turmaydi. Jer atmosferası ten' salmaqlıq halda turmag'anlıqtan biyiklikke baylanisli temperatura to'menleydi. Planetanın' atmosferasınn' ten' salmaqlıqta turıwının' printsipinde mu'mkin emes ekenligin ko'rsetemiz. Eger de mu'mkin

bolg'anda atmosferanın' tıg'ızlıg'ı biyiklikke baylanıslı (10-7a) boyınsha o'zgerer edi. Bul jag'dayda (10-7a) mına tu'rge enedi:

$$n_0(r) = n_0(r_0) \exp \{ - G[Mm/(kT)](1/r_0 - 1/r) \}. \quad (10-17)$$

Bul jerde potentsial energiya ushın (10-16) an'latpası esapqa alıng'an, r_0 planetanın' radiusı. (10-17) $r \rightarrow \infty$ te shekke iye:

$$n_0(r \rightarrow \infty) \rightarrow n_0(r_0) \exp \{ - G[Mm/(kT)]1/r_0 \}. \quad (10-8)$$

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

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

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

Barometrlık formula. Jjarıda keltirilgen $p_x = p_y = p_z = p = n_0 kT$ formulası ja'rdeminde basım temperatura ja'rdeminde bir ma'nisli an'latılutug'ın bolg'anlıqtan (10-10) Boltsman bo'listiriliwi usı formula durıs boatug'ın jag'daylar ushın qosımsha esaplawlardı ju'rgizbesten-aq ten' salmaqlıq sharayatlardı ushın ($T = \text{const}$) basımın' bo'listiriwin ta'ripleytug'ın formulanı jazıwg'a mu'mkinshilik beredi. Sonlıqtan izotermalıq atmosfera jag'dayında h biyikligindegi basım ha'm bir qurawshı ushın mına formulalar ja'rdeminde beriledi:

$$p_i(h) = n_{0i}(h)kT, \quad (10-19)$$

$$p_i(h) = p_i(0) \exp[-m_i g h / (kT)]$$

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

$$p(h) = p_1(h) + p_2(h) = p_1(0) \exp[-m_1 g h / (kT)] + p_2(0) \exp[-m_2 g h / (kT)]. \quad (10-20)$$

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

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

$$p(h) = \exp(-\rho_0 g h / p_0). \quad (10-21)$$

Jerdin' betinde $p_0 = 101.325$ kPa qabıl etiledi. Biyiklikke baylanıslı temperatura o'zgermeydi dep esaplanadı.

Eger biyiklikni kilometrlerde alsaq formula mına tu'ske enedi:

$$p(h) = p_0 \exp(-h/7.99). \quad (10-22)$$

Biraq haqiqatında atmosfera statsionar emes, al temperatura bolsa biyiklikke baylanisli to'menleydi. Usig'an baylanisli basim menen biyiklik arasındag'ı g'a'rezlilik sezilerliktey o'zgeredi. Ortalaştirilg'an jag'daylarda ten'iz betindegi ortasha basim p_0 de ha'm temperatura $+15^0\text{C}$ da 11000 m biyiklikke shekem (troposfera) xalıqaralıq barometrlık formula sıpatında mına an'latpa qabil etilgen:

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

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

Ko'teriw ku'shi. Hawadan jen'il bolg'an ushiw apparatlarındag'ı ko'teriw ku'shi qalay payda bolatug'inlig'in ko'rip o'temiz. TSilindr ta'rizli qatti ıdıs berilgen bolsın. Uzınlıg'ı 1 bolg'an tsilindrdin' qaptal jaqları vertikal bag'itlang'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 $n_1 = n_0 \exp[-mgl/(kT)] \approx n_0 [1 - mgl/(kT)]$.

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

$$F_{\text{koteriw}} = S(p_0 - p_1) = S \ln_0 mg. \quad (10-23)$$

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

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

Sorawlar:

Salmaq maydanında molekulalar ko'terilgende olardıń kinetikalıq energiyaları kemeyedi. Biraq qanlay sebeplerge baylanisli 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 shamalardın' sanı sistemanın' erkinlik da'rejesi dep ataladı. Materiallıq noqattın' qozg'alısının' bazı bir waqıt momentindegi energiyanıq halın tolıq ta'riplew ushın kinetikalıq energiyanı anıqlawg'a tezlikin' u'sh komponentasın, al potentsial energiyanı anıqlawg'a u'sh koordinata kerek. YAg'mıy 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 tabılaturug'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 tastıyıqlawı a'hmiyetli orın tutadı. Bul ma'seleni matematikalıq jaqtan tolıq da'llilewdi keyinge qaldıramız.

Joqarıda ideal gazdin' molekulasının' ortasha kinetikalıq energiyasının'

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

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

$$\left\langle \frac{mv_x^2}{2} \right\rangle = \left\langle \frac{mv_y^2}{2} \right\rangle = \left\langle \frac{mv_z^2}{2} \right\rangle = \frac{1}{2} kT. \quad (11-2)$$

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

Joqarıda gazdin' quramındag'ı ha'r qanday sorttag'ı molekulalardıń ortasha kinetikalıq energiya-larının' birdey ekenligi da'llillengen edi. Sonlıqtan energiyanın' erkinlik da'rejeleri boyınsha birdey bolıp bo'listiriliwi ha'r qanday gazlerdin' aralaspası ushın da durıs boladı dep tastıyıqlay alamız.

Endi molekulamız eki atomnan turatug'ın bolsın. Bunday jag'dayda eki atomlı molekulalardan tu-ratug'ın gazdi molekulları molekulanın' quramına kiretug'ın atomlardı dep esaplanaturug'ın eki sorttag'ı molekullardıń jıynag'ı dep qarawg'a boladı. Bunday jag'dayda eki atomlı molekulanın' ortasha energi-

yasi $2 \cdot 3 \cdot \frac{kT}{2}$. 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'gereginde aylanıwına, al bir erkinlik da'rejesi atomlardın' bir birin tutastırıwshı tuwrı boyınsha terbelisine sa'ykes keledi.

Potentsial energiya menen baylanıshı bolg'an erkinlik da'rejeleri. Bir birin tutastırıwshı tuwrı bag'ıtında terbeliwshı atomlar sızıqlı ostsillyator bolıp tabıladi. Bunday sızıqlı ostsillyatordın' ortasha kinetikalıq energiyası ortasha potentsial energiyag'a ten' boladı. Demek eki atomlı molekuladag'ı potentsial energiya menen baylanısqa erkinlik da'rejesine qosımsha $kT/2$ energiya sa'ykes keledi.

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

Energiyanın' erkinlik da'rejeleri boyınsha birdey bo'listiliwi bir erkinlik da'rejesine sa'ykes keletug'ın energiyanı na'zerde tutadı. Ayqın waqıt momentinde berilgen erkinlik da'rejesine sa'ykes keletug'ın energiya basqa erkinlik da'rejesine sa'ykes keliwshı energiyag'a ten' bolmawı mu'mkin. Tek u'lken waqıt aralıg'ında alıng'an ha'r qıylı erkinlik da'rejelerine sa'ykes keliwshı energiyalardıń ortasha ma'nisleri bir birine ten' boladı. Ergodikalıq gipotezag'a muwapıq bul ansambl boyınsha alıng'an sa'ykes erkinlik da'rejelerine sa'ykes keliwshı 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'ın mayda bo'lekshelerdin' barlıq waqıtta qozg'alısta bolatug'ınlıg'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 molekularlar menen birlikte bir tutas statistikalıq sistemanı payda etedi. Erkinlik da'rejesi boyınsha ten'dey bolıp bo'listiriliw teoreması boyınsha broun bo'lekshesinin' ha'r bir erkinlik da'rejesine $\frac{kT}{2}$ energiyası sa'ykes keliwi kerek.

Bo'lekshenin' u'sh ilgerilemeli erkinlik da'rejesine sa'ykes keliwshı $3 \frac{kT}{2}$ energiyası onın' massa orayının' qozg'alısın ta'miynleydi ha'm bul qozg'alıs mikroskopta baqlanadı. Eger Broun bo'lekshesi jetkilikli da'rejede qattı bolsa ha'm o'zin qattı dene sipatında

ko'rsetse aylanıw erkinlik da'rejelerine ja'ne $3 \frac{kT}{2}$ energiyası sa'ykes keledi. Sonlıqtan o'zinin qozg'alısı barısında bo'lekshe qozg'alıs bag'ıtın turaqlı tu'rde o'zgertip baradı.

Aylanıw Broun qozg'alısın 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'alıstı jin'ishke jipke ildirip qoyılğ'an aynanın ja'rdeminde baqlaw mu'mkin. Hawa molekulları menen barqulla ta'sir etiskenlikten ten' salmaqlıq hal ornaydı ha'm aynanın ha'r bir erkinlik da'rejesine $kT/2$ energiyası sa'ykes keledi. Sonlıqtan ildirilip qoyılğ'an jiptin' a'tirapında 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'lshewge boladı.

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

$$J \ddot{\phi} = D\phi. \quad (12-1)$$

Bul ten'lemedegi minus belgisi jiptin' serpililiginin 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:

$$\frac{1}{2} J \dot{\phi}^2 = \frac{1}{2} D \phi^2. \quad (12-2)$$

Kishi buralıw terbelisleri garmonikalıq terbelis bolıp tabıladı. Sonlıqtan:

$$\frac{1}{2} J \langle \dot{\phi}^2 \rangle = \frac{1}{2} D \langle \phi^2 \rangle = \frac{kT}{2}. \quad (12-3)$$

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

$$\langle \phi^2 \rangle = kT/D. \quad (12-4)$$

Bul shamanı o'lshew mu'mkin. Misalı $T \approx 290$ K, $D \approx 10^{-15}$ N*m bolğ'an jag'dayda $\langle \phi^2 \rangle \approx 4 \cdot 10^{-6}$. 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 statistikalarının dara jag'dayı sıpatında. Bir birinen ayrılatug'ın bo'lekshelerdin' energiya boyınsha tarqalıwı.

Usı waqıtlarg'a shekem ko'p bo'lekshelerden turatug'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 mikrohاللardin' sanı esaplang'anda eki bo'lekshe orın almastırğ'andag'ı mikrohاللar birdey

emes dep esaplandı. Bir birinen parqı bar bo'lekshelerdin' usınday modeli **Maksvel-Boltsman modeli** dep ataladı. Usınday tiykarda aling'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 bolg'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'ınlıg'ı tu'sinikli na'rse.

Eger eki elektron alıp qaralsa olardın' bir birinen parqının' joqlıg'ı o'z o'zinen tu'sinikli. Eger bo'lekshelerdi bir birinen parqı joq dep esaplasaq, mikrohollar sanın esaplawdın' Maksvel-Boltsman modelinendegiden o'zgeshe basqa usıllardan paydalanıw kerek.

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

Sonın' menen birge mikrohollarg'a bo'lekshelerdin' qatnası boyınsha bul modeller bir birinen ayırladı. Berilgen halda tek g'ana bir bo'lekshe bola aladı dep esaplanatug'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 energiyasının' ma'nisi boyınsha emes, al basqa da parametrlar menen ta'riplenitug'ınlıg'ın atap o'temiz. Misalı birdey energiyalı, biraq bo'lekshenin' impulsinin' bag'ıtı boyınsha ayırlatug'ın hallar ha'r qıylı hallar bolıp tabıladı. Sonlıqtan da'lirek tu'rde bilay tastıyıqlaymız: **Boze-Eynshteyn modelinde ha'r bir kvant halında qa'legen sandag'ı, al Fermi-Dirak modelinde tek g'ana bir bo'lekshe tura aladı.** Boze-Eynshteyn modeline tiykarlang'an statistikalıq teoriya **Boze-Eynshteyn statistikasi** dep ataladı.

Maksvel-Boltsman statistikasi formulası Boze-Eynshteyn ha'm Fermi-Dirak statistikalari formulaların' shektegi dara jag'dayı bolıp tabıladı. Real bo'leksheler bir birinen parqı joq, sonlıqtan da olar Maksvel-Boltsman modeline sa'ykes kelmeydi ha'm yaki Boze-Eynshteyn, yaki Fermi-Dirak statistikasına bag'ınadı. V.Pauli ta'repinen pu'tin spinge iye bo'lekshelerdin' Boze-Eynshteyn, al yarım pu'tin spinge iye bo'lekshelerdin' Fermi-Dirak statistikasına bag'ınatug'ınlıg'ı anıqlandı. Maksvel-Boltsman statistikasına bag'ınatug'ın bo'leksheler joq. Biraq sog'an qaramastan bul statistika ko'pshilik jag'daylarda ko'p bo'lekshelerden turatug'ın sistemalardın' qa'siyetlerin durıs ta'ripleydi. **Sebebi bo'leksheler tura alatug'ın 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 statistikalarının' formulaları Maksvel-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 jiyi ushırasadı. Tek sheklik jag'daylarda formulaların' birinin' birine o'tiwi haqqında g'ana ga'p etilip atır. Al bo'lekshelerdin' qa'siyetlerinin' o'zgeriwi haqqında ga'ptin' bolıwı mu'mkin emes. **Yarım pu'tin spinli bo'leksheler barlıq waqıtta Fermi-Dirak statistikasına, al pu'tin spinli bo'leksheler ba'rhama Boze-Eynshteyn statistikasına bag'ınadı.**

Bo'lekshenin' tolıq energiyası onın' tezlikke baylanıslı bolg'an kinetikalıq energiyası

$$E_k = \frac{m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)}{2}$$

menen koordinatalarına g'a'rezli bolg'an potentsial energiya $E_p = E_p(x, y, z)$ nın' qosındısınan turadı.

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

$$P_i = A \exp(-\beta E_i)$$

formulası menen aniqlanadı. Bul jerde $A = e^{-\alpha}$ normirovkalawshı turaqlı. Bul formula mikrokanonik sistemag'a tiyisli. Usı formuladan $dx dy dz dv_x dv_y dv_z$ ko'lem elementindegi $(dx dy dz dv_x dv_y dv_z)$ noqatı janında bo'lekshelerdin' sanı

$$dn(dx dy dz dv_x dv_y dv_z) = A \exp[-\beta(E_k + E_p)] dx dy dz dv_x dv_y dv_z.$$

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

$$dn(dx dy dz dv_x dv_y dv_z) = A \exp\{[mv^2/2 + E_p]/(kT)\} dx dy dz dv_x dv_y dv_z \quad (13-1)$$

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

Koordinatalar ha'm tezlikler bir birinen g'a'rezsiz shamalar bolıp tabıladı. Sonlıqtan (13-1) di tezlikler ha'm koordinatalar boyınsha integrallap to'mendegidey formulalardı alamız:

$$dn(x, y, z) = A_1 \exp[-E_p(x, y, z)/(kT)] dx dy dz, \quad (13-2)$$

$$dn(v_x, v_y, v_z) = A_2 \exp[m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)/(2kT)] dv_x dv_y dv_z. \quad (13-3)$$

A_1 ha'm A_2 ler normirovkalawshı turaqlılar. (13-2) menen (13-3) sa'ykes Boltsman ha'm Maksvell bo'listiriwlerin beredi.

Maksvell-Boltsman bo'listiriliwin Maksvell ha'm Boltsman bo'listiriwlerin bir birine ko'beytiw jolı menen formal tu'rde alıw mu'mkin. Biraq bunday jag'dayda en' tiykarg'ı orında turg'an bo'lekshelerdin' bir birinen parqlanatug'inlıg'ı dıqqattan tısta qaladı.

Fizikalıq jaqtan bul awhaldın' orın alıwı qa'telik bolıp tabıladı. Sebebi ta'biyatta bir birinen parqlanatug'in bo'leksheler joq ha'm olar ya Boze-Eynshteyn, ya Fermi-Dirak bo'listiriliwi boyınsha ta'riplenedi. Biraq klassikalıq fizikanın' en' ko'p ushırasatug'in situatsiyalarında Fermi-Dirak ha'm Boze-Eynshteyn bo'listiriliwleri Maksvell-Boltsman bo'listiriliwi menen sa'ykes keledi. Usının' saldarınan bal bo'listiriliw klassikalıq statistikalıq fizikanın' tiykarg'ı bo'listiriliwi bolıp esaplanadı.

Bo'leksheler ha'r qıylı dep esaplanatug'in jag'dayda qanday da eki bo'leksheler orınların almasırg'anda payda bolatug'in 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 tabıladi.

Soraw:

Ta'biyatta bir birinen ajralatug'in bo'leksheler bolmaydı. Sonlıqtan Maksvell-Boltsman bo'listiriw funktsiyası qanday da bir real bar bo'lekshelerge tiyisli emes. Biraq sog'an qaramastan bul bo'listiriw funktsiyası klassikalıq statistikalıq fizikanın' tiykarg'ı bo'listiriw funktsiyası bolıp tabıladı ha'm real bo'lekshelerden turatug'in sistemalar ushın tabıslı tu'rde qollanıladı. Bul qalay tu'sindiriledi?

§ 2-14. Termodinamikanın' birinshi baslaması

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

Ko'p bo'lekshelerden turatug'ın sistemalar bazı bir ulıwmalıq nızamlarg'a (mısalı energiyanın' saqlanıw nızamı) bag'ınadı. Bul nızamlardı termodinamikanın' baslamaları dep ataydı. Sistemanın' makroskopiyalıq halı usı sistemag'a tolıg'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. Differentzial formalar teoriyası menen dara tuwındılı ten'lemeler matematikalıq apparatı bolıp tabıladı.

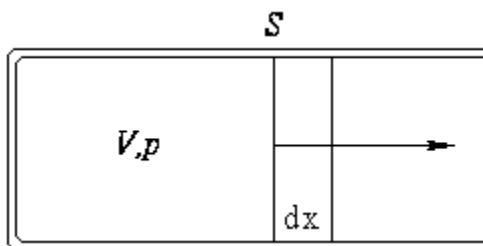
Termodinamika ma'seleleri. Termodinamika ma'seleleri u'yrenilip atırg'an qubılıslardıń mikroskopiyaalıq mexanizmlerine itibar bermey termodinamika baslamaları dep atalatuǵın ulıwmalıq nızamlar tiykarında makroskopiyaalıq parametrler menen ta'riplenetuǵın materiallıq denelerdin' qa'siyetleri fenomenologiyalıq 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'yreniletuǵın protsesslerdin' bag'ıtın anıqlaydı. Yshinshi baslama termodinamikalıq temperaturanın' noline jetiwidin' mu'mkin emesligi tiykarında protsesslerge shek qoyadı.

Jumıs. Gaz benen toltırılǵan ko'lemdi kishireytiw ushın usı gaz basımın jen'iw ushın jumıs islew kerek. Qozǵalıwın nı na'tiyjesinde jumıs islenetuǵın porshenge iye tsilindrlik ıdıstıǵı gazdı ko'z aldımızǵa keltireyik (su'wrette ko'rsetilgen). Basım p g'a ten' gazdin' maydanı S ke ten' bolǵan porshenge ta'sir etiw ku'shi pS ke ten'. Demek porshen jılısqanda islengen jumıs $pSdV = p dV$ 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 alıng'an. Sonlıqtan gazdin' ko'lemi o'skende islengen jumıs

$$\delta A = p dV. \quad (14-1)$$

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



2-11 su'wret. Jumıs ushın an'latpa alıw maqsetinde qollanılatuǵın su'wret.

Eger ideal gazdin' ornına basqa quramalı gaz alıng'an bolsa onda sistema u'stinen yamasa sistema ta'repinen islengen jumıstın isleniwiniń 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 makroskopiyaalıq parametrlerin o'zgertiw arqalı sistemadan energiya alınadı

yamasa sistemag'a energiya beriledi. Bul so'zler ayriqsha a'hmiyetke iye. Sistemanin' makroskopiyaliq parametrlarin o'zgertpey energiya beriw de, energiyani aliw da mu'mkin emes. Bunday jag'dayda jumis islendi dep aytiwg'a bolmaydi.

Sistemag'a jilliliq beriw arqali energiya beriwdi misal retinde ko'reyik. Bul jag'dayda sistema u'stinen jumis islendi dep aytiwg'a bolmaydi ha'm makroskopiyaliq parametrlar jilliliq beriwdin' na'tiyjesi sipatında o'zgeredi.

Uliwma jag'dayda jumis ushin an'latpa to'mendegidey tu'rge iye boladi:

Jumisqa baylanisli o'zgeretug'in parametrlardi μ_1, μ_2, \dots dep belgileyik. μ_i parametri sheksiz kishi o'zgerse $\delta A = f_i d\mu_i$ jumisi islenedi. Bul jerde f_i uliwmalasqan ku'sh. Belgiler (14-1) degidey etip alinadi.

Eger jumis sistema u'stinen islense δA teris ma'niske iye boladi.

Toliq jumis:

$$\delta A = f_1 d\mu_1 + f_2 d\mu_2 + \dots \quad (14-2)$$

$f_i d\mu_i$ ag'zaları arasına (14-1) de kirgizilgen dep esaplaymiz. Misali uliwmalasqan ku'sh $f_1 = p$ al uliwmalasqan koordinata $\mu_1 = V$, yag'nuy $d\mu_1 = dV$. Biraq a'dette a'piwayiliq ushin (14-1) tu'rindegi jaziw qollaniladi. (14-2) degi keyingi ag'zalar qaldirilib ketedi. Usig'an baylanisli bazi bir misallar keltiremiz.

Sterjen ku'shtin' ta'sirinde qisqaradi yamasa soziladi. Onin' uzinlig'i dl shamasina o'zgergende islengen jumis

$$\delta A = -fdl.$$

f ku'shtin' absolyut ma'nisi. Sterjen sozilg'anda sistema u'stinen jumis islenedi. Sonliqtan minus belgisi qoyilg'an.

dq zaryadin U potentsiallar ayirmasina iye noqatlar arasında ko'shigende islengen jumis

$$\delta A = -Udq.$$

Bul misal (14-2) degi uliwmalasqan ku'shler menen koordinatalar a'dettegi ku'shler menen koordinatalardi eske tu'sirmewi mu'mkin ekenligi ko'rsetedi.

Jilliliq. Eksperimentten eki dene bir biri menen tiyisip turg'anda olardin' jilliliq halinin' ten'lesetug'inlig'i ma'lim. Jilliraq denelerden salqin denelerde jilliliq o'tedi dep aytamiz. **Jilliliq - bul ayriqsha formadag'i, molekulaliq qozg'alis formasidag'i energiya.** Usunday ayriqsha formadag'i sheksiz kishi energiyani δQ arqali belgileyemiz. Bunday ayriqsha formadag'i energiya - jilliliq sistemag'a beriliwi de, sistemadan alinwi da mu'mkin. Eger sistemag'a jilliliq beriletug'in bolsa δQ din' belgisi on', al alinatug'in bolsa teris etip alinadi.

Jumis tu'sinigi texnikada da'slep XVIII a'sirdin' ortalarinda suw ko'teriwshi mashinalardin' jumis isley aliwshiliq qa'biletliginin' o'lishemi retinde paydalana basladi. Keyinirek bul tu'sinik a'ste-aqirliq penen mexanikag'a o'tti. Bul shama ku'sh penen jol ha'm olar arasindag'i mu'yeshin' kosinusinin' ko'beymesi dep 1803-jili L.Karno ta'repinen belgilendi (1753-1823). XIX a'sirdin' birinshi yariminda jumis termini a'sirese a'meliy mexanikada ko'p tarqaldi. Sonin' menen birge bul termin Nikola Leonar Sadi Karno (1796-1832) ta'repinen baslang'an jilliliq penen jumistin' bir birine aylanwinda aylanw protsesslerin' izertlewlerde ken'nen qollanildi.

İshki energiya. *Sistemadag'ı bo'lekshelerdin' mu'mkin bolg'an qozg'alıslarının' barlıq tu'rleri ha'm olardın' bir biri menen ta'sir etisiwine baylanıslı bolg'an, sonın' menen birge sistemanı qurawshı bo'lekshelerdin' o'zleri de quramalı bolg'an jag'dayda sol bo'lekshelerdi qurawshı bo'lekshelerdin' qozg'alısları ha'm o'z-ara ta'sir etisiwleri energiyaların' jıynag'ı sistemanın' ishki energiyası dep ataladı.* Bul anıqlamadan sistemanın' massa orayının' qozg'alısı menen baylanısqa kinetikalıq energiyası, sistemanın' sırtqı potentsial maydanındag'ı potentsial energiyası ishki energiyag'a kirmeytug'ınlıg'ı kelip shıg'adı.

İshki energiyanın' sheksiz kishi o'simi dU arqalı belgilenedi. Eger sistemanın' ishki energiyası o'setug'ın bolsa dU on' shama dep, kemeygen jag'dayda teris shama dep qabıl etiledi.

Parametrlerdi ishki ha'm sırtqı dep ekige bo'ledi. Sırtqı parametrler dep sistema ushın sırtqı jag'daylardı anıqlaytug'ın parametrler ayıladı. Al ishki parametrler dep sırtqı parametrler belgili bir jag'daylar tuwdırğ'andag'ı sistema ishinde qalıplesetug'ın jag'daylardı ta'ripleytug'ın shamalar ayıladı. Ma'selen gazdın' ko'lemi V parametri arqalı belgilenedi. Bul sırtqı parametr. Al usı ko'lem ishinde anıq p basımı ornaydı. Bul ishki parametr.

Basqasha situatsiyanı qarayıq. Ko'lem qozg'alıwshı porshen ta'repinen sheklengen bolsın. Porshendi qozg'altıw arqalı biz basımdı o'zgeritemiz. Bunday jag'dayda sırttan basım berilip ol sırtqı parametrge aylanadı, al ko'lem bolsa ishki parametr bolıp qaladı.

Termodinamikanın' birinshi baslaması. Energiyanın' bir forması sıpatında jıllılıq, ishki energiya ha'm islengen jumı ushın energiyanın' saqlanıw nızamı bılay jazılıwı mu'mkin:

$$\delta Q = dU + \delta A. \quad (14-3)$$

(14-3) 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 talqılawlardın' ko'pshiliginde basım ku'shlerinin' ta'siri menen ko'lemnin' o'zgeriwine baylanıslı bolg'an jumı qarap shıg'ıladı. Sonlıqtan birinshi baslama (14-3) bılayınsha jazıladı:

$$\delta Q = dU + p dV. \quad (14-4)$$

Mexanikadag'ı sıyaqlı (14-3) protsesstin' rawajlanıw bag'ıtın anıqlay almaydı. Bul an'lapta protsess ju'rgen jag'dayda usı shamalardın' qalayınsha o'zgeretug'ınlıg'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.

Mısallar keltiremiz:

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

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

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

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

Termodinamikanın' birinshi baslaması jıllılıq qatnasatug'ın protsessler ushın energianın' saqlanıw nızamının' an'latpası bolıp tabıladı. Jumıs makroskopiyalıq parametrlerdin' o'zgeriwi menen ju'retug'ın jıllılıqtın' beriliwi menen baylanışlı, al jıllılıqtın' beriliwi molekulalıq qozg'alis energiyasının' beriliwi menen a'melge asadı. Usınday jag'daylardag'ı makroskopiyalıq parametrlerdin' o'zgerisi molekulalıq qa'ddilerdegi energiyalıq sharayatlardıń o'zgerisinin' na'tiyjesi bolıp tabıladı.

R.Feynman boyınsha termodinamika nızamları:

Birinshi nızam

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

$$dQ + dW = dU.$$

Ekinshi nızam

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

T_1 temperaturasında Q_1 jıllılıg'ın alıp T_2 temperaturasında Q_2 jıllılıg'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 jıllılıg'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' (jıllılıq rezervuarların da esapqa alg'anda) entropiyası o'zgermeydi.

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

§ 2-15. Differentsial formalar ha'm toliq differentsiallar

Differentsial formalar. Toliq differentsial.

Differentsial formanın' toliq diifferentsial bolatug'ın sha'rtler talqılanadı. Toliq differentsial menen hal funktsiyaları arasındag'ı baylanislar ko'rsetiledi.

Differentsial formalar. Termodinamikanın' birinshi basamasın eske tu'siremiz:

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

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'rılıgı usı sheksiz kishi shamalardın' qa'siyetlerindeki ayırmag'a baylanislı. Meyli bazı bir g'a'rezsiz o'zgeriwshi shamalar berilgen bolsın. Da'slep bir g'a'rezsiz o'zgeriwshi x misalın qaraymız. Bul shamanın' differentsialı dx . $f(x)dx$ sheksiz kishi shama bolsın. $f(x)$ iqtıyarlı 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:

$$f(x)dx = F(x + dx) - F(x) \quad ? \quad (15-1)$$

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

$$F(x) = \int f(x)dx \quad (15-2)$$

bolg'an jag'dayda funktsiyanın' o'simi sıpatında qaraw mu'mkin ekenligi da'lillenedi. Sonlıqtan bir o'zgermeli shama jag'dayında sheksiz kishi shamanı bazı bir funktsiyanın' sheksiz kishi o'simi sıpatında qarawg'a boladı. Bul jag'dayda sheksiz kishi $f(x)dx$ shaması **tolıq differentsial** dep ataladı. $F(x)$ funktsiyasının' sheksiz kishi o'simi sıpatında ol bilay jazıladı:

$$dF(x) = f(x)dx. \quad (15-3)$$

Bul jerde d simvolın funktsiyanın' sheksiz kishi o'simin belgilew ushın kiritemiz.

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

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

$$\sigma = P(x, y)dx + Q(x, y)dy. \quad (15-4)$$

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

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

$$P(x, y)dx + Q(x, y)dy = F(x + dx, y + dy) - F(x, y) \quad (15-5)$$

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

$$F(x + dx, y + dy) - F(x, y) = F(x, y) + \frac{\partial F}{\partial x} dx + \frac{\partial F}{\partial y} dy. \quad (15-6)$$

(15-5) ten'ligi to'mendegige aylanadı:

$$Pdx + Qdy = \frac{\partial F}{\partial x} dx + \frac{\partial F}{\partial y} dy. \quad (15-7)$$

x ha'm u ler g'a'rezsiz shamalar bolg'anlıqtan (15-7) den

$$P = \frac{\partial F}{\partial x}, \quad Q = \frac{\partial F}{\partial y}. \quad (15-8)$$

ekenligi kelip shıg'adı. P nı y, Q dı x boyınsha differentsiallap

$$\frac{\partial P}{\partial y} = \frac{\partial^2 F}{\partial y \partial x}, \quad \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y}. \quad (15-9)$$

Aralas tuwındı differentsiallaw ta'rtibinen g'a'rezli emes. Sonlıqtan

$$\frac{\partial^2 F}{\partial y \partial x} = \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y}$$

ha'm (15-9) dan alamız:

$$\frac{\partial P}{\partial y} = \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (15-10)$$

Demek (15-4) sheksiz kishi shamasın eger P ha'm Q funktsiyaları (15-10) sha'rtin qanaatlándıratug'ın bolsa basqa bir $F(x, y)$ funktsiyasının' (15-5) yamasa (15-7) tu'rindegi o'simi tu'rinde qaray alamız. Bul sheksiz kishi shamanı eki funktsiyanın' o'simi dep qarawdın' za'ru'rli ha'm jetkilikli sha'rti bolıp tabıladı. Ko'rilip atırug'an jag'dayda (15-4) sheksiz kishi shaması **tolıq differentsial** dep ataladı ha'm (15-7) nin' ja'rdeminde bılay jazıladı

$$\sigma = Pdx + Qdy = \frac{\partial F}{\partial x} dx + \frac{\partial F}{\partial y} dy = dF \quad (15-11)$$

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

Tolıq differentsial bolıp tabılıwshı sheksiz kishi shamanın' tiykarg'ı qa'siyeti (x_1, y_1) ha'm (x_2, y_2) noqatları arasında alıng'an

$$\int_{(x_1, y_1)}^{(x_2, y_2)} (Pdx + Qdy) \quad (15-12)$$

integralının' tek g'ana baslang'ısh ha'm aqırğ'ı noqatlarg'a baylanışlı, al sol noqatlar arasındag'ı o'tken jolg'a g'a'rezsizlilinde boladı. (15-12) integralı (15-11) sha'rti orınlang'anda bılayınsha esaplanadı:

$$\int_{(x_1, y_1)}^{(x_2, y_2)} (Pdx + Qdy) = \int_{(x_1, y_1)}^{(x_2, y_2)} dF = F(x_1, y_1) - F(x_2, y_2). \quad (15-13)$$

Eger o'zgermeli shama x bazı bir sistemanin' halin ta'riplese, (15-4) tu'rindagi sheksiz kishi shama F funktsiyasinin' toliq differentsiali bolsa, onda

F funktsiyasi hal funktsiyasi bolip tabiladi. Bul funktsiya sistemanıq berilgen hali ushin anıq ma'niske iye boladı, funktsiyanın' bul ma'nisi sistemanın' usı halg'a qanday jol yamasa usıl menen kelgenligine baylanisli emes.

Hal funktsiyaları usı haldın' a'hmiyetli ta'riplemeleri bolip tabiladı.

Sorawlar: Ishki energiya sıyaqlı jıllılıq ta molekularlar qa'ddindegi energiyalıq sha'rtlerge baylanisli. Olardin' ayırması nelerden ibarat?
Qanday sharayatlarda differentsial formalar toliq differentsial bolip tabiladı 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 makroskopiyaqlı parametrlar bolg'an r, V ha'm T lardin' ma'nisleri menen ta'riplenedi. Biraq termodinamikaqlı qaraw ramkasında ideal gazdın' ne ekenligi ele anıqlang'an joq.

İdeal gaz. Boyle-Mariott nızamına bag'ınıwg'a bag'darlang'an talap tiykarında anıqlanadı. Atap aytqanda belgili bir massadag'ı ideal gazdın' basımı menen ko'leminin' ko'beymesi tek temperaturag'a baylanisli boladı.

Protsess dep sistemanın' bir ten' salmaqlıq haldan ekinshisine o'tiwine, yag'nıy p_1, V_1 ha'm T_1 parametrlarinen p_2, V_2 ha'm T_2 parametrlarına o'tiwge aytamız. Bul jerde eki haldın' da ten' salmaqlı hal bolıw talabı tiykarı orında turadı.

p_1, V_1, T_1 halın A halı, al p_2, V_2 ha'm T_2 parametrlari menen belgilengen haldı B ha'ripi menen belgileyik. Bunday jag'dayda A halınan B halına o'tiw protsessin ($A \rightarrow B$ protsessin) a'dette tuwrı, al $B \rightarrow A$ protsessin **keri protsess** dep ataymız.

Ten' salmaqlıq emes protsessler. Ma'yli basqa ko'lemge iye halg'a o'tiw 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 aqırıg'ı ko'lemlerge g'a'rezli bolip qalmay, o'tiwdin' qanday usıl menen a'melge asırılğ'anlıg'ına da baylanisli. Solay etip usınday protsess tegi aralıqtag'ı haldardin' barlıg'ı da ten' salmaqlı emes hallar bolip tabiladı. *Usınday protsess ten' salmaqlı emes protsess dep ataladı.*

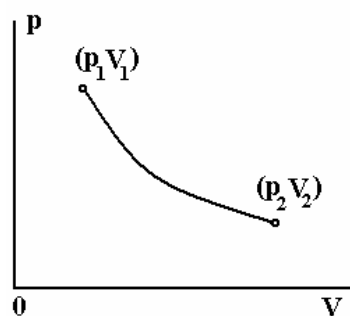
Ten' salmaqlı protsessler. O'tiwdi basqa usıl menen - ju'da' aqırılıq penen a'melge asırıw mu'mkin. Ha'r bir sheksiz kishi o'zgerisinen keyin barlıq makroskopiyaqlı parametrlar o'zlerinin' turaqlı ma'nislerine kelmegenshe o'zgeris bolmaytug'ın jag'daydı a'melge asıramız. Solay etip protsessin' bar-

lig'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. İdeal gazlerdin' hal ten'lemesi bolg'an $pV_m = RT$ ten'lemesinde qa'legen eki parametr protsessti ta'ripleytug'ın g'a'rezsiz parametr bolıp esaplanadı. Mısal retinde su'wrette p_1, V_1 halınan p_2, V_2 halına o'tiw protsessi ko'rsetilgen. Ha'r bir noqattag'ı temperatura hal ten'lemesinen bir ma'nisli anıqlanadı.

Termodinamikanın' teoriyalıq usıllarında **kvazistatikalıq** yamasa **kvaziten'salmaqlıq** protsessler dep atalatug'ın protsessler ken'nen qollanıladı. Bunday protsessler birinin' izinen biri u'zliksiz tu'rde payda bolatug'ın ideallastırılıg'an ten' salmaqlıq hallardan turatug'ın protsessler kiredi.

Qaytımlı ha'm qaytımsız protsessler. Qaytımlı protsess dep aqırg'ı haldan da'slepki halg'a tuwrı protsesste o'tken hallar arqalı keri o'tiw mu'mkin bolg'an protsesske aytamız.

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



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

Qaytımsız protsesske mısal retinde bir birine tiydirilip qoyılğ'an to'men qızdırılğ'an deneden joqarıraq qızdırılğ'an deneg'e jıllılıqtın' o'tiwin keltiriwge boladı. Bunday protsesstin' qaytımsız ekenligi lektsiyalarda keyinirek ga'p etiletug'ın Klauzius postulatınan kelip shıg'adı (Klauzius 1850-jılı «Jıllılıq to'men qızdırılğ'an deneden joqarı qızdırılğ'an deneg'e o'zinen o'zi o'te almaydı» dep ayıtılutug'ın postulattı usındı, bul jerde jıllılıq dep denenin' ishki energiyasın tu'sinemiz).

Joqarıda keltirilgen mısal menen bir qatarda qaytımsız protsesske su'ykelistin' saldarınan jıllılıqtın' alınıwın da ko'rsetiw mu'mkin. Bunday protsesstin' qaytımsızlıg'ı bolsa Tomson-Plank postulatınan kelip shıg'adı (Tomson-Plank postulattı boyınsha birden bir na'tiyjesi jıllılıq rezervuarının' salqınlawının' esabınan jumıs isleytug'ın aylanbalı protsesstin' bolıwı mu'mkin emes).

Ten' salmaqlıq emes protsesstin' qaytımsız protsess ekenligi anıq. Sonın' menen birge ten' salmaqlıq protsess barlıq waqıtta da qaytımlı. Biraq qaytımlı protsess sheksiz a'ste aqırınlıq penen ju'retug'ın protsess dep oylamaw kerek. SHEksiz a'stelik penen ju'retug'ın ten' salmaqlı emes qaytımsız protsesstin' bolıwı mu'mkin (mısalı qattı denelerdegi plastik deformatsiya).

Demek ten' salmaqlıq protsesste barlıq aralıqlıq hallar ten' salmaqlıq hallar bolıp tabıladı, al ten' salmaqlıq emes protsesste aralıqlıq hallar ishinde ten' salmaqlıq emes hallar boladı. Ten' salmaqlıq protsessler qaytımlı, ten' salmaqlı emes protsessler qaytımsız. SHEksiz kishi tezliklerde ju'retug'ın protsessler barlıq waqıtta qaytımlı ha'm ten' salmaqlı bolmaydı.

Endi sistemanı o'zinin' da'slepki A halınan qanday da bir jollar menen B halına o'tkerek. Bunday protsessti tuwrı protsess dep atayıq. Eger bul sistemanı B halınan A halına tuwrı protsesste o'tken joldan o'zgeshe jol menen apara alsaq a'melge asırılğ'an protsessti **ken' ma'nistegi qaytımlı protsess** dep ataw qabil etilgen. Eger sistema B halınan A halına tek g'ana $A \rightarrow B$ o'tiwindegi ju'rgen jol menen qaytatug'ın bolsa $A \rightarrow B$ protsessi **tar ma'nistegi qaytımlı protsess** dep ataladı.

Barlıq kvazistatikalıq protsessler qaytımlı, sonın' menen qatar tar ma'nistegi qaytımlı protsessler bolıp tabıladı. Haqıyqatında kvazistatikalıq protsess ten' salmaqlıq hallar (durısırag'ı ten' salmaqlıq haldan sheksiz az parqlanıtug'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. Protsestin' baslanıwı ushın sistemanı sırttan bolatug'ın ta'sirdin' sebebinen ten' salmaqlıq haldan shıg'arıw kerek, yag'nıy sırtqı parametrler menen qorshap turg'an ortalıqtın' temperaturasını o'zgeriw 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 parqlanıtug'ın halda turıwı kerek. Na'tiyjede sheksiz kishi tezlik penen ju'retug'ın ileallastırılǵan protsess alınadı. Usınday protsestin' ja'rdeminde da'slepki A halınan pu'tkilley alıs bolǵan B halına sistemanı o'tkeriwge, sonın' menen birge sistemanı B halınan A halına qaytadan o'tkeriw mu'mkin. Usınday jollar menen aylanbalı protsess alamız. Al *qa'legen kvazistatikalıq aylanbalı protsess tuwrı bag'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 protsestin' 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 sıyımlılıǵı

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

Amıqlama. Denege δQ jıllılıǵı berilse onın' temperaturası dT shamasına o'zgeredi.

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

shaması *jıllılıq sıyımlılıǵı* dep ataladı. Jıllılıq sıyımlılıǵı denenin' temperaturasını 1 K ge ko'teriw ushın kerek bolatug'ın jıllılıq mug'darı menen o'lishenedi. Jıllılıq sıyımlılıǵı denenin' massasına baylanışlı. Denenin' massa birligine sa'ykes keletug'ın jıllılıq sıyımlılıǵı *salıstırmalı jıllılıq sıyımlılıǵı* dep ataladı. Zattın' molekularının' 1 molin alg'an a'dewir qolaylı boladı. Bunday jıllılıq sıyımlılıǵı mollik jıllılıq sıyımlılıǵı dep ataladı.

Jıllılıq sıyımlılıǵı denege jıllılıq beriw ha'm onın' temperaturasınıń o'zgeriw jag'dayların' o'zgesheligine g'a'rezli.

Mısalı, eger gazge δQ jıllılıǵı berilgen jag'dayda gaz ken'eyip jumıs islese, onın' temperaturası gaz ken'eymegen jag'daydag'ıg'a salıstırǵanda kishi shamag'a ko'teriledi. Sonlıqtan bul jag'dayda (17-1) formulası boyınsha gazdin' jıllılıq sıyımlılıǵı u'iken boladı. Demek jıllılıq sıyımlılıǵı anıq ma'niske iye bolmay, qa'legen ma'nisti qabıl etiwı mu'mkin. Sonlıqtan (17-1) boyınsha esaplang'an jıllılıq sıyımlılıǵına, usı jıllılıq sıyımlılıǵı qanday jag'daylarda alıng'anlıǵın qosa aytıw kerek.

İshki energiya hal funksiyası sıpatında. İshki energiyanın' anıqlamasınan onın' sistemanın' qa'legen halında belgili bir ma'niske iye bolatug'ınlg'ı ko'rinedi. Bul

$$\text{ishki energiya } U \text{ dın' hal funksiyası, al } dU \text{ dın' tolıq differentsial ekenligin}$$

ko'rsetedi. Usıg'an baylanıslı biz bunnan bılay

$$\text{eger sheksiz kishi shama tolıq differentsial bolsa, onda sa'ykes funksiya hal funksi-} \\ \text{yası bolıp tabıladi}$$

degen anıqlamanı basshılıqqa alamız. V , p ha'm T shamaları sistemanın' qa'legen hallarında anıq ma'nislerge iye boladı ha'm bul haldı ta'ripleydi. Sonlıqtan dV , dp ha'm dT lar tolıq differentsiallar bolıp tabıladi.

Turaqlı ko'lemdegi jıllılıq 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'ınlg'ının bildiredi.

Ko'lem turaqlı bolg'anda termodinamikanın' birinshi baslaması $\delta Q = dU + pdV$ bılay jazıladı:

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

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

$$C_V = \left(\frac{dU}{dT} \right)_V. \quad (17-4)$$

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

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

$$(\delta Q)_p = dU + (pdV)_p = d(U + pdV). \quad (17-5)$$

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

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

hal funksiyası bolıp tabıladi. (17-5) ke kiriwshi

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

funksiyası *entalpiya* dep ataladı. Entalpiya da hal funksiyası bolıp tabıladi. Sonlıqtan (17-6) dag'ı C_p 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 p , V ha'm T menen ta'riplenedi. Olar bir birinen g'a'rezsiz ha'm hal *ten'lemeleri ja'rdeminde* baylanısqa. İdeal gaz ushın hal ten'lemesi $pV_m = RT$ ten'ligi menen beriledi. İqtıyarlı gaz ushın bul shamalar arasındag'ı baylanıs tu'ri belgili emes. Sonlıqtan da usı u'sh shamalar bir biri menen funktsionallılıq baylanısta boladı dep jaza alamız:

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

Sonın' menen birge qaysı o'zgermeli g'a'rezsiz sıpatında qaralıwına baylanıslı $T = T(p, V)$, $V = V(p, T)$ dep jaza alamız. Eger g'a'rezsiz shamalar retinde V menen T saylap alıng'an bolsa ishki energiya da sol shamalardan g'a'rezli boladı, yag'nıy $U = U(T, V)$. Toliq differentsial ushın

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V dT + \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T dV \quad (17-10)$$

an'latpasın $\delta Q = dU + p dV$ 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'ликтin' on' ta'repindegi dV/dT shaması protsesstin' xarakterine baylanıslı. $V = \text{const}$ bolg'anda bul shama nolge ten' ha'm (17-12) C_V ushın (17-4) ke aylanadı. $r = \text{const}$ jag'dayında turaqlı basımdag'ı jıllılıq sıyımlılıg'ı an'latpasın alamız:

$$C_p = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V + \left[p + \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T \right] \left(\frac{dV}{dT} \right)_p = C_V + \left[p + \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T \right] \left(\frac{dV}{dT} \right)_p. \quad (7-13)$$

Demek δQ ushın jazılğ'an (17-11) bılay jazılıwı mu'mkin:

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

İdeal gazdin' 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:

$$V = \frac{RT}{p}. \quad (17-15)$$

Sonlıqtan

$$\left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_T = 0; \quad \left(\frac{dV}{dT}\right)_p = \frac{R}{p}. \quad (17-16)$$

(17-16) ni (17-13) ke qoyip

$$C_p = C_v + R. \quad (17-17a)$$

(17-17a) **Mayer ten'lemesi** dep ataladi. Bul ten'lemenin' eki ta'repin de gazdin' mollik massasi M ga bo'lsek

$$c_p = c_v + R_0. \quad (17-17b)$$

Bul jerde $c_p = C_p / M$, $c_v = C_v / M$, $R_0 = R / M$ = salistirmali gaz turaqlisi.

İdeal gazdin' jillihq siyimlilg'i. Meyli ideal gazdin' ha'r bir bo'lekshesi i erkinlik da'rejesine iye bolsin. Onda bir bo'lekshenin' ortasha energiyasi $\frac{i}{2}kT$ g'a ten' boladi. 1 molde N_A bo'lekshe bar. Demek ideal gazdin' bir molinin' ishki energiyasi

$$U = \frac{i}{2} N_A kT = \frac{i}{2} RT. \quad (17-18)$$

Usig'an baylanisli (17-4) ha'm (17-17a) formulalarinan

$$C_v = \frac{i}{2} R, \quad C_p = \frac{i+2}{2} R. \quad (17-19)$$

**Tiykarg'i
juwmaqlar:**

Jillihq siyimlilg'i uliwma jag'daylarda denenin' qa'siyetin ta'riplemeydi. Ol dene menen usi denenin' temperaturasiyin' o'zgeretug'in sharayatlarinin' ta'riplemesi bolip tabiladi. Sonliqtan jillihq siyimlilg'i aniq ma'niske iye bolmaydi. Eger denenin' temperaturasiyin' o'zgeriw sharayatlari aniqalanip alinsa jillihq siyimlilg'i denenin' qa'siyetinin' ta'riplemesine aylanadi ha'm aniq sanliq ma'niske iye boladi. Usunday jillihq siyimlilqlarinin' ma'nisleri kestelerde keltiriledi. Usi jillihq siyimlilqlarinin' en' a'hmiyetlileri turaqli basim menen turaqli ko'lemde aling'an jillihq siyimlilqlari bolip tabiladi. Jillihq siyimlilg'i protsesstin' xarakterine baylanisli ha'm shamasi sheksiz u'lken teris ma'nisten sheksiz u'lken on' ma'niske shekem o'zgeriwi mu'mkin.

Turaqli basimdag'i ha'm turaqli ko'lemdegi jillihq siyimlilg'i hal funktsiyasi bolip tabiladi.

Gazdin' jillihq siyimlilg'iyin' temperaturadan g'a'rezsizligi ta'jiriybede tustiyqlanbaydi. Bug'an molekulliq vodorod penen o'tkerilgen ta'jiriybeler da'lil bola aladi.

İdeal gaz jillihq siyimlilg'i teoriyasinin' eksperiment na'tiyjeleri menen sa'ykes kelmewi. A'piwayi $C_v = \frac{i}{2} R$ ha'm $C_p = \frac{i+2}{2} R$ formulalari eksperiment penen bir atomli ha'm ko'p atomli

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 C_v ya $\frac{5}{2}R$ ge yaki $\frac{7}{2}R$ ge ten' bolıwı kerek).

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

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 atomlı gaz ushın joqarıda aytilg'anday C_v nın' shaması $\frac{5}{2}R$ ge yaki $\frac{7}{2}R$ ge ten' ha'm temperaturadan g'a'rezsiz bolıwı kerek. Al

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 qosıl'gan, temperaturanın' joqarılawı menen aylanbalı erkinlik da'rejeleri, al keyin terbelmeli erkinlik da'rejeleri qozadı** («iske qosıladı» ha'm «qozadı» so'zleri bir ma'niste qollanıl'gan, 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 tutılmaqta) belgili bir temperaturalarda birden keskin tu'rde a'melge aspaydı. Bunday o'tiw temperaturanın' bazı bir intervallarında ju'zege keledi. Belgili bir temperaturalarda tek g'ana 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'rezliligin sapalıq jaqtan tu'sindiriw. İye bolatug'ın energiyaların' diskretliligi mikrobo'lekshelerdin' qozg'alısının' tiykarg'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 kishireyedi. Jetkilikli da'rejedegi u'lken ko'lemelerde qozg'alıwshı bo'lekshelerdin' energiya spektrin u'zliksiz dep esaplaw mu'mkin (biraq bunday jag'daylarda da diskretlilik saqlanadı). Spektr 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' energiyasınin' diskret spektri kvant mexanikasınin' qozg'alıs ten'lemelerin sheshiw arqalı alınadı.

Biz ha'zir vodorodtın' eki atomlı molekulası ushın sheshimnin' na'tiyjesin qaraymız.

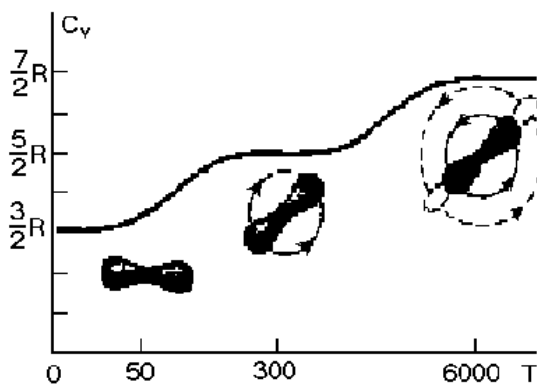
Molekulanın ilgerilemeli qozg'alisına sa'ykes keliwshi energiya u'zliksiz o'zgeredi dep esaplaymız. Sebebi siyrekletilgen gazdın moli ushın qozg'alis aymag'ı jetkilikli da'rejede u'lken. Aylanbalı ha'm terbelmeli qozg'alis energiyaları kvantlang'an, yag'nıy bunday qozg'alislar energiyaları qa'legen ma'niske iye bolmay, tek energıyanın 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. $E_0 = \frac{1}{2}\hbar\omega$ energıyası energıyanın en' kishi ma'nisine ten', yag'nıy bo'lekshe tınıshlıqta tura almaytug'ınday qozg'alis nızamı orın aladı. Nolinshi qa'ddinin u'stinde bir birinen $\partial\omega$ qashıqlıqta turg'an molekulanın energiya qa'ddileri jaylasadı.

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

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



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

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

Quramındag'ı yadrolardın (vodorod atomının yadrosının bir protonnan turatug'ınıg'ın eske tu'siremisiz) menshikli momentlerinin (spininin) 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 (yadrolardın menshikli momentleri o'z-ara parallel) $n = 2, 3, 5, \dots$. Vodorod gazindegi paravodorod molekulalarının sanı ulıwma molekulalar sanının $1/4$ in, al ortovodorodtın molekulalarının sanı $3/4$ in quraydı.

Energıyanın 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 energiyaları arasında energiya almasıwı orın aladı. To'men temperaturalarda (yag'nıy $kT \ll 5q_1$) aylanıw ha'm terbeliw erkinlik da'rejeleri qoza almaydı. Bunday jag'daylarda molekula en' minimallıq terbelis energiyası (terbelistin' nollik energiyası) ha'm en' kishi aylanıs energiyası menen qozg'aladı (paravodorod ushın aylanıw minimallıq aylanıw energiyası $E_0=0$, al ortovodorod ushın $E_1=2q_1$). Molekulalar ishki qurılısqa 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 energiyası 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

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

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

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

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

Aling'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 aling'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

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

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 molekulaların' 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. İdeal gazlerdegi protsessler

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

İzobaralıq protsess. Turaqlı basımda ju'retug'ın protsess izobaralıq protsess dep ataladı. (p_1, V_1) ha'm (p_2, V_2) noqatlarındag'ı temperaturalar hal ten'lemesi ja'rdeminde esaplanadı ha'm sa'ykes $T_1 = p_1 V_1/R$, $T_2 = p_2 V_2/R$. Bunday jag'dayda ko'lemnin' u'lkeyiwi menen basımın' turaqlı bolıp qalıwı ushin sistemag'a jıllılıq berip turıw za'ru'r. Jumıs

$$A = \int_{(1)}^{(2)} p_1 dV = p_1 (V_2 - V_1). \quad (18-1)$$

Jumıstın' bul ma'nisi a) su'wrette ko'rsetilgen. p, T koordinatalarında da bul protsess tuwrı sızıqlar menen ko'rsetiledi. Bul o'zgeriwshilerde jumıstın' an'latpası to'mendegidey bolıp jazıladı:

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

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

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

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

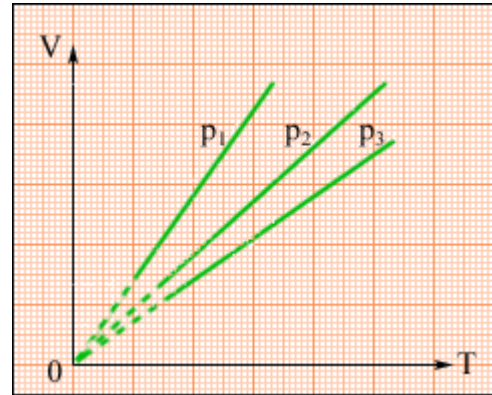
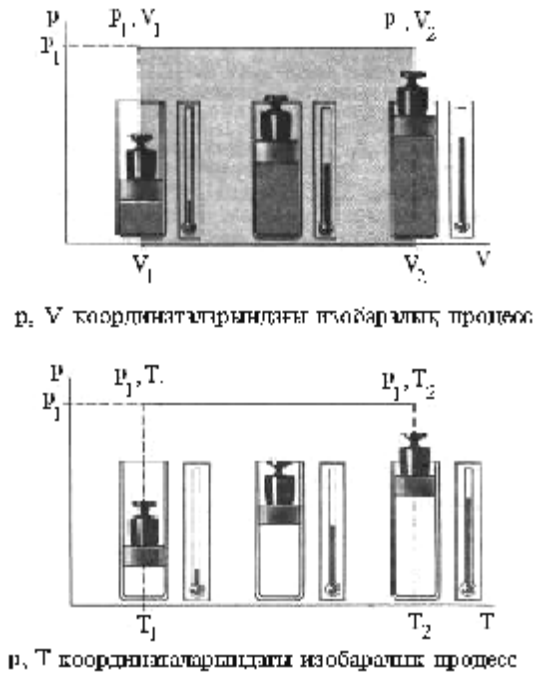
Bul formulada V_t gazdin' t temperaturadag'ı ko'lemi, V_0 gazdin' temperatura 0°C bolg'andag'ı ko'lemnin' ma'nisi, α_v proporsionallıq koeffitsient. Eksperimentler eger suwdın' eriw temperaturasın 0° , al qaynaw temperaturasın 100° dep alsaq $\alpha_v = 1/273.13^\circ = 0.0036613 \text{ grad}^{-1}$ ge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

Gey-Lyussak nızamı boyınsha $t = -273.13^\circ\text{C}$ temperaturada gazdin' ko'lemi tolıq jog'alıwı kerek. Bul gazdin' o'zinin' jog'alıwına sa'ykes keledi. Bul jag'daydın' o'zi de Gey-Lyussak nızamının' barlıq temperaturalar da orın almaytug'inlig'inan derek beredi. Haqıyqatında da $t = -273.13^\circ\text{C}$ temperaturag'a shekem salqınlatılğ'anda barlıq gazler da'slep suyıqlıqqa, al keyin qattı denegge aylanıp ketedi ha'm bunday haldag'ı zatlar ushin Gey-Lyussak nızamı orınlanbaydı.

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

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

İdeal gazlerde ko'lem turaqlı bolg'anda basım temperaturag'a tuwrı proporsional (SHarl nızamı). İdeal emes gazler ushin SHarl nızamı da'l orınlanbaydı. Sebebi bul jag'dayda gazge barılgen energiyanın' bir bo'legi molekulalar arasındag'ı ta'sirlesiw energiyasın o'zgetiw ushin jumsaladı.



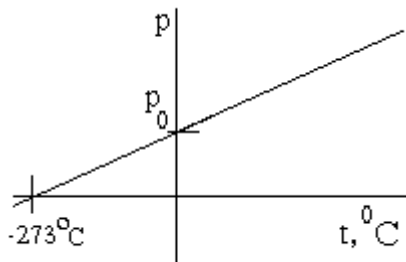
Изобаралардың (V,T) тегісіндегі қасиеттері
($p_3 > p_2 > p_1$).

2-14 су'wret.

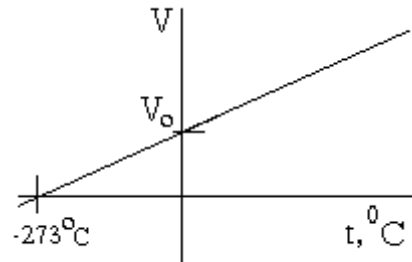
SHarl nızamı bılay jazıladı:

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

Bul formuladag'ı p_t gazdın' t temperaturadag'ı basımı, p_0 temperatura nolge ten' bolg'andag'ı basımı, α_p turaqlı koeffitsient. Eger suwdın' eriw temperaturasın 0° , al qaynaw temperaturasın 100° dep alsaq $\alpha_p = 1/273.13^\circ = 0.0036613 \text{ grad}^{-1}$ ge ten' boladı.



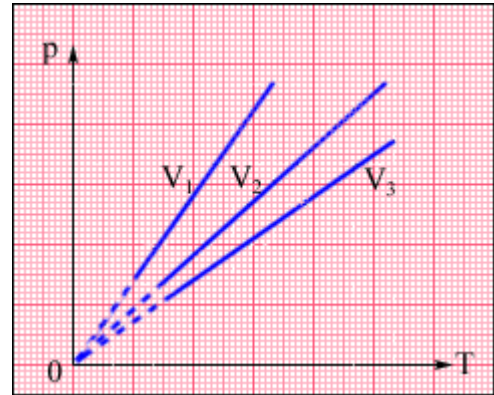
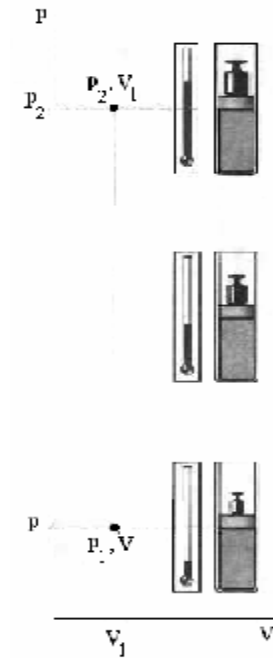
2-15 su'wret. SHarl nızamı grafigi



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

SHarl nızamı boyınsha $t = -273.13^\circ\text{C}$ temperaturada gazdın' basımının' tolıq jog'alıwı kerek. Bul gazdın' 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 $t = -273.13^\circ\text{C}$ temperaturag'a shekem salqınlatılğ'anda barlıq gazler da'slep suyıqlıqqa, al keyin qattı deneg'e aylanıp ketedi ha'm bunday haldag'ı zatlar ushın SHarl nızamı orınlanbaydı.

Joqarıda keltirilgen eki nızamda da eger suwdın' eriw temperaturasın 0° , al qaynaw temperaturasın 100° dep alıng'an temperaturalar shkalasında $\alpha_v = \alpha_p = 1/273.13^\circ = 0.0036613 \text{ grad}^{-1}$ ekenligi ko'rinip tur. Al to'mende TSelsiya shkalası menen temperaturalardıq absolyut termodinamikalıq shkalası arasında $0 \text{ K} = 273.13^\circ\text{C}$ baylanısınin' bar ekenligi da'lillenedi.



(p,T) tegisligindagi izoxoralardın' qa'siyetleri
($V_3 > V_2 > V_1$).

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

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

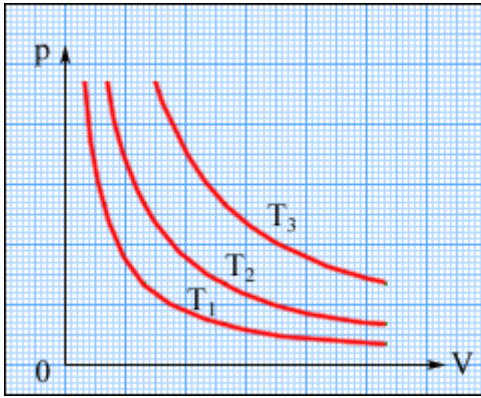
$$A = \int_{(1)}^{(2)} p dV = RT \int_{(1)}^{(2)} \frac{dV}{V} = RT \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right). \quad (18-4)$$

Temperatura o'zgermegenlikten bul protseste ideal gazdin' ishki energiyası o'zgermeydi. Snalıqtan izotermalıq protseste sistemag'a berilgen jıllılıq tolıg'ı menen jumıs islewge jumсалadı.

Temperatura turaqlı bolg'anda gazdin' berilgen massasınun' basımı onun' ko'lemine keri proportional. Bul Boyle-Mariott nızamı dep ataladı. YAg'nıy

$$pV = \text{const.}$$

Temperatura turaqlı bolg'anda gazdin' berilgen m massası menen r basımı menen V ko'lemi arasındag'ı g'a'rezlilik grafik tu'rında ten' qaptallı giperbola menen su'wretlenedi (su'wrette ko'rsetilgen). Bul sıyıqtı **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 awıttıw 2 esege barabar boladı.



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

Adiabatalı 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 gazdın' ishki energiyası esabınan islenedi, gaz qısılg'anda gaz u'stinen islengen jumıs gazdın' ishki energiyasın arttırıw ushın jumsaladı.

Adiabata ten'lemesi dep adiabatalıq protsestege parametrlerdi baylanıstıratug'ın ten'leme bolıp tabıladı. Usı ten'lemeni keltirip shıg'aramız.

İdeal gaz ushın ten'lemeden T ushın to'mendegidey an'latpa shıg'arıladı:

$$T = \frac{pV}{C_p - C_V}. \quad (18-6)$$

Bul jerde Meyer ten'lemesi $R = C_p - C_V$ paydalanılğ'an.

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

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

Bul ten'lemeni integrallap ha'm potentsiallap tabamız:

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

ha'm V o'zgeriwshillerine o'tiw ushın (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 aling'an.

Sonın' menen birge $\left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} = \frac{T_2}{T_1}$ ekenliginen (18-10) dı bılay tu'rlandiremiz:

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

Politroplıq protsess. Joqarıda keltirilgen barlıq protsessler ulıwmalıq ayırmashılıqqa iye - olardıń barlıg'ında da jıllılıq sıyımlılıg'ı turaqlı bolıp qaladı. İzoxoralıq ha'm izobaralıq protsesler jıllılıq sıyımlılıqları sa'ykes C_V ha'm C_P g'a ten'. İzotermalıq protseste ($dT = 0$) jıllılıq sıyımlılıg'ı $\pm\infty$ ge ten'. Al adiabatlıq protseste jıllılıq sıyımlılıg'ı nolge ten'.

Jıllılıq sıyımlılıg'ı turaqlı bolıp qalatug'ın protsess **politrop protsess** dep ataladı. İzobaralıq, izoxoralıq, izotermalıq ha'm adiabatlıq 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 nı 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 salqınladı. Haqıyqatında da (18-14) den $n > 1$ de ko'lem kishireygende T nın' artatug'inlıg'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'inlıg'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 $p_0 = 5 \cdot 10^6$ Pa dan $p = 2 \cdot 10^5$ Pa g'a shekem kishireydi. Geliydin' aqırg'ı ko'lemi menen temperaturasın anıqlan'ız.

Adiabatlıq ken'eyiw ushın mınag'an iyemiz:

$$pV^\gamma = p_0V_0^\gamma.$$

Bul jerde geliy ushın $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = 5/3 = 1,66$. Bunnan aqırg'ı ko'lem bılayınsha anıqlanadı:

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

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

$$p_0 V_0 = \nu RT, \quad p V = \nu RT$$

ekenligine iye bolamız. Bul ten'lemelerdin' shep ha'm on' ta'replerin ag'zama-ag'za bo'lip

$$T = \frac{pV}{p_0 V_0} T_0 = \frac{2 * 69}{50 * 10} 400 \text{ K} = 110,4 \text{ K}$$

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' jutılğ'an jıllılıqtın' mug'darına qatnasın tabamız.

S nı s_v arqalı an'latıw arqalı $c_p/c_v = \gamma$, $n = (c - c_p)/(c - c_v)$, sonlıqtan $\gamma = 1.4$ ekenligin esapqa alıp

$$c(n)/c_v = (n - \gamma)/(n - 1)$$

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

$$c/c_v = -1/R.$$

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

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

ekenligine iye bolamız.

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

w. Endi gazlerdegi sestin' tezligin anıqlayıq.

Mexanikada gazlerdegi ses tolqınlarınń 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 bolǵ'anlıqtan $\frac{dP}{d\rho}$ tuwındısıń qanday ma'niste tu'siniwimiz kerek degen soraw kelip shıǵ'adı. Nyuton basım tıǵ'ızlıq penen Boyl-Mariot nızamı boyınsha $P/\rho = \text{const}$ tu'rinde baylanısqa dep esapladı. Demek ses tolqınındag'ı qısılǵ'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. c_N degi N indeksi sestin' tezliginiń Nyuton formulası menen anıqlang'anlıǵ'ın bildiredi. Hawa ushın $\mu = 28.8$, $T = 273$ K bolǵ'anda $c_N = 280$ m/s, al ta'jiriybe bolsa $c = 330$ m/s ekenligin beredi.

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

$$\gamma PdP - \rho dP = 0.$$

Bunnan adiabatalıq protsess ushın

$$\frac{dP}{d\rho} = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_{ad} = \frac{\gamma P}{\rho} = \gamma \left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_T.$$

Sonlıqtan Nyuton formulası ornına Laplas formulası alınadı:

$$c_1 = \sqrt{\gamma \frac{P}{\rho}} = c_N \sqrt{\gamma}.$$

Hawa ushın $\gamma = 1.4$ ekenligin bilemiz. Sonlıqtan $T = 273$ K temperaturada

$$c_1 = 280\sqrt{1.4} \text{ m/s} = 330 \text{ m/s}$$

ha'm bul shama ta'jiriybede aling'an shama'ga sa'ykes keledi.

c_1 din' c_N ge qatnasının' $\sqrt{\gamma}$ g'a ten' ekenligi joqarıda ko'rinip tur. Sonlıqtan

$$\gamma = (c/c_N)^2 = (c_1/c_N)^2.$$

Bul formula γ nı eksperimentte anıqlaw ushın tiykar bola aladı.

Gazdegi protsesslerdin' ju'riwi sa'ykes sırtqı sharayatlardın' jaratılıwı menen ta'miyinlenedi. Bunday jag'dayda gazdı ten'salmaqlıq hallar arqalı izbe-iz o'tiwge ma'jbu'rleyemiz dep ayta alamız. O'z-o'zine qoyıl'gan ideal gaz tek g'ana sheksiz u'lken ken'islikte tarqap ketiwden basqa qa'biletlikke iye emes. Al real gazde jag'day basqasha boladı. Bunday gaz ko'p na'rsege qa'biletli. Mısalı rawajlanıwının' belgili etapında A'lem tolg'ı menen gaz ta'rizli zat penen tolg'an bolsa kerek.

§ 2-19. İdeal gaz entropiyası

İdeal gaz entropiyası. Entropiyanın' fizikalıq ma'nisi. İdeal gazler protseslerindeki entropiyanın' o'zgerisin esaplaw.

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

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

$dT/T = d \ln T$, $dV/V = d \ln V$ 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 torlıq differentsial. Demek shep ta'repi $\frac{\delta Q}{T}$ de tolıq differentsial bolıp tabıladı. Differentsialı $\frac{\delta Q}{T}$ bolıp tabılatug'ın hal funktsiyası entropiya dep ataladı ha'm S belgisi menen belgilenedi. Solay etip

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

Ten' salmaqlı emes, qayımsız protsessler ushın dS ti dQ ha'm T arqalı an'latıw durıs bolmaydı.

(19-3) entropiyanın' absolyut ma'nisin emes, al onın' o'zgerisin beredi. Bul formulanın' ja'rdeminde sistema bir haldan ekinshi halg'a o'tkende entropiyanın' qanshag'a o'zgeretug'inlig'ı esaplawg'a boladı. Sonlıqtan da entropiyanı iqtıyarlı additiv turaqlı da'llikke shekem anıqlang'an dep esaplaymız. Usıg'an baylanıslı entropiyanı anıqlawdag'ı jag'day energiyanı anıqlawdag'ı jag'dayg'a sa'ykes keledi. Fizikalıq ma'niske entropiyanın' o'zi emes, al *entropiyalardıń ayırması* iye boladı. Ayırım hallardag'ı entropiyanın' ma'nisin sha'rtli tu'rde nolge ten' dep alıw qabıl etilgen. Bunday jag'dayda entropiya an'latpasın integrallawdan kelip shıg'atug'ın iqtıyarlı turaqlınnın' ma'nisin anıqlap alıw mu'mkin.

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

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

Sistema ta'repinen kvazistatikalıq jol menen alıng'an *keltirilgen jıllılıq mug'darı* o'tiw sistemanın' bir haldan ekinshi halg'a o'tiw jolınan g'a'rezsiz bolıp, tek g'ana sistemanın' da'slepki ha'm keyingi halları boyınsha anıqlanadı.

Demek sistemanın' entropiyası iqtıyarlı turaqlı da'lliginde anıqlang'an hal funktsiyası bolıp tabıladı. Anıqlama boyınsha ten' salmaqlı bolg'an eki 1 ha'm 2 hallarındag'ı entropiyalardıń ayırması sistemanı 1-haldan 2-halg'a o'tkeriw ushın kerekli bolg'an keltirilgen jıllılıq mug'darına ten'. Solay etip 1- ha'm 2-hallarda entropiyalar S_1 ha'm S_2 arqalı belgilenip anıqlama boyınsha

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

Solay etip anıqlama boyınsha

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

Bul jerde integral sistemanı sha'rtli tu'rde da'slepki hal dep atalatug'ın haldan biz qarap atrıg'an halg'a o'tkeretug'ın iqtıyarlı kvazistatikalıq protsess ushın alınadı. S tin' differentsialı ushın

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

an'latpasına iye bolamız. δl 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' entropiyasın esaplaymız.

İdeal gaz qatnasatug'ın sheksiz kishi kvazistatikalıq protsess ushın

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

an'latpasın jazamız.

Bunnan

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

$$S = \int C_V(T) \frac{dT}{T} + R \ln V.$$

Eger jıllılıq sıyımlılıg'ı C_V temperaturadan g'a'rezsiz bolsa an'latpa jen'il integrallanadı:

$$S = C_V \ln T + R \ln V + \text{const.}$$

Eger gazdin' v moli bolsa

$$S = v C_V \ln T + v R \ln V + \text{const.}$$

Bul an'latpa alıng'anda gazdegi molekularlar 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:

$$S = v [C_V \ln T + R \ln (V/v) + \text{const}]$$

yamasa

$$S = \frac{N}{N_{AB}} [C_V \ln T + R \ln (V/N) + \text{const}].$$

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 tabılaturg'ın bolsa $\delta Q = 0$, sog'an sa'ykes $dS = 0$, $S = \text{const}$. Demek kvazistatikalıq adiabatlıq protsess turaqlı entropiyada ju'retug'ın protsess bolıp tabıladi. Solıqtan bunday protsessti **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

$$\int_{(1)}^{(2)} dS = R \int_{(1)}^{(2)} d \ln V. \quad (19-5)$$

İntegrallawdan 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'rlendiriw ushın ten' salmaqlıq haldag'ı gaz iyelep turg'an ko'lem menen ken'isliktegi mikrohollar sanı arasındag'ı baylanıstı 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:

$$\Gamma_{01} = N_1!/(N_1 - N_A)!, \quad \Gamma_{02} = N_2!/(N_2 - N_A)!. \quad (19-7)$$

Bul jerde $N_1 = V_1/l^3$, $N_2 = V_2/l^3$, $l = 10^{-10}$ m. Sonlıqtan (5-11) Stirling formulasın paydalanıp iye bolamız:

$$\Gamma_{02}/\Gamma_{01} = \frac{N_2!(N_1 - N_A)!}{N_1!(N_2 - N_A)!} * \frac{(N_2/e)^{N_2} [(N_1 - N_A)/e]^{N_1 - N_A}}{(N_1/e)^{N_1} [(N_2 - N_A)/e]^{N_2 - N_A}}. \quad (19-8)$$

Ku'shli qısılmag'an gaz izertlenedi. Onda $N_1 \gg N_A$, $N_2 \gg N_A$. Sonlıqtan da'rejede N_1 menen N_2 ge salıstırg'anda N_A nı esapqa almawg'a boladı. (19-8) din' ornına alamız:

$$\Gamma_{02}/\Gamma_{01} * \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^{N_A} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{N_A}. \quad (19-9)$$

(19-9) dı logarifmlese

$$\ln(V_2/V_1) = (R/N_A) \ln(\Gamma_{02}/\Gamma_{01}). \quad (19-10)$$

Bul an'latpanı (18-6) g'a qoysaq

$$S_2 - S_1 = (R/N_A) \ln(\Gamma_{02}/\Gamma_{01}) = k \ln \Gamma_{02} - k \ln \Gamma_{01}, \quad (19-11)$$

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 mikrohollar sanının' logarifmi menen anıqlanadı:

$$S = k \ln \Gamma. \quad (19-12)$$

Bul ten'lik Boltsman formulası dep ataladı.

Joqarıda keltirilgen talqılawlar Boltsman formulasının' da'lili bolıp tabılmaydı. Bul formula: 1) ideal gaz ha'm ken'isliktegi mikrohollar; 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 mikrohollar 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 qoyilg'an sistema ten' salmaqlıq halına qaray qozg'aladı, yag'nıy o'z-o'zine qoyilg'an sistemada entropiyanın' ma'nisi kemeymeydi. Bul termodinamikanın' ekinshi baslamasının' anıqlamaların' biri bolıp tabıladı.

Entropiya menen sistemadag'ı ta'rtipsizliktin' baylanısı haqqında birqansha misallar keltiremiz.

Mexanikalıq energiyani jıllılıq energiyasına aylandırıw ta'rtpıli qozg'alıs energiyasın ta'rtipsiz qozalıs energiyasına aylandırıw bolıp tabıladı. Bir birine qarama-qarsı bolg'an bul eki protsesstin' ten'dey huqıqqa iye emes ekenligin an'sat tu'siniwge boladı. Ta'rtpıli qozg'alıs energiyasın ta'rtipsiz qozg'alıs energiyasına aylandırıw ta'rtipsiz qozg'alıs energiyasın ta'rtpıli ozg'alıs energiyasına aylandırıwdan sahistirmas da'rejede jen'il.



a)

2-18 su'wret. Ta'rtpı penen ta'rtipsizlik arasındag'ı

qaytımsızlıqtı sa'wlelendiretug'in su'wret.



b)

Kelesi misal bul jag'daydı an'sat tu'sindiredi. Qara ha'm aq sharikler saling'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 silkse sharikler aralasıp ketedi. Qutını a'ıwayı sikiw shariklerdi tolıq ta'rtipsizlikke alıp keldi. Biraq usınday silkiw menen shariklerdin' jayg'asıwlarındag'ı ta'rtpıti qayta tikley almaymız.

Bunday o'zine ta'n qaytımsızlıq qa'legen molekullıq sistemada anıq ko'rinedi.

Usı qubılıs penen jıllılıq protsesslerdin' qaytımsızlıg'ı baylanısı: bunday protsessler ta'rtipsizliklerdin' artıwı bag'ıtında ju'redi. Demek jıllılıq protsesslerinin' qaytımsızlıg'ı ta'rtpı penen ta'rtipsizliktin' qaytımsızlıg'ı menen tikkeley baylanısı eken dep juwmaq shıg'aramız.

İdeal gaz protseslerindeki entropiyanın' o'zgeriwin esaplaw. Esaplaw (19-3) ti esapqa alıw menen (19-2) tiykarında ju'rgiziledi:

$$dS = d(C_V \ln T + R \ln V). \quad (19-13)$$

İzotermalıq protseste entropiyanın' o'zgerisi (19-6) formulası ja'rdeminde a'melge asırıladı. Ko'lem u'lkeygende entropiya o'sedi, kishireygende - kemeyedi. Bul na'tiyjeni an'sat tu'siniwge boladı: ko'lem u'lkeygende bo'leksheler ushın orınlar, demek mikrohalla sanı ko'beyedi.

İzoxoralı protseste ($dV=0$)

$$S_2 - S_1 = C_V \ln(T_2/T_1) \quad (19-14)$$

temperaturanın' o'siwi menen entropiya u'lkeyedi. Bul na'tiyje bılayınsha tu'sindiriledi: temperatura ko'terilgende bo'lekshelerdin' ortasha energiyası o'sedi, sonlıqtan mu'mkin bolg'an energiyalıq hallar sanı artadı.

Adiabatalıq protseste (19-13) ten alamız

$$S_2 - S_1 = C_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1}. \quad (19-15)$$

Sonın' menen birge

$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1}, \quad \gamma = \frac{C_p}{C_v}.$$

Sonlıqtan $\ln \frac{T_2}{T_1} = (\gamma-1) \ln \frac{V_1}{V_2} = -(\gamma-1) \ln \frac{V_2}{V_1}$. Onda (19-15) mına tu'rge keledi
($-C_p + C_v + R = 0$ ekenligi esapqa alınadı):

$$S_2 - S_1 = \left[-C_v \left(\frac{C_p}{C_v} - 1 \right) + R \right] \ln \frac{V_2}{V_1} = 0. \quad (19-6)$$

Demek adiabatalıq qaytımlı protseste entropiya o'zgermeydi.

Gazdin' adiabatalıq ken'eyiwinde ko'lemnin' u'lkeyiwine baylanıslı entropiya o'sedi, biraq usının' menen qatar baqlanatug'in temperaturanı to'menlewi saldarınan entropiya kemeyedi ha'm usı eki tendentsiya bir birin tolıg'ı menen ten'lestiredi.

Eger sistema entropiyaları S_1 ha'm S_2 bolg'an eki sistemadan turatug'in bolsa onda bunday sistemanın' entropiyası

$$S = S_1 + S_2.$$

Demek entropiya additiv hal funktsiyası bolıp tabıladı. Sistemanın' entropiyası usı sistemanı qurawshı sistemalardın' entropiyaların' qosındısına ten'.

Sistemanın' entropiyası qanday da bir qaytımlı protsesste sistemag'a ta'sir etiwshi sırtqı sharayatlardın' ta'sirinde o'zgeredi. Sırtqı sharayatlardın' 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 sharayatlardın' o'zgeriwi menen o'zgeriske ushıraydı ha'm sırtqı sharayatlarg'a sa'ykes keliwshi maksimum ma'nisine jetedi.

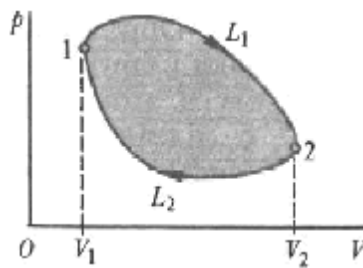
Entropiya berilgen makrohalg'a sa'ykes keliwshi mikrohاللar sanının' logarifmi menen anıqlanadı.

Ten'salmaqlıq halda entropiya maksimal ma'nisine jetedi. Sebebi ten'salmaqlıq halda termodinamikalıq itimallıq maksimal ma'niske iye. Bunnan o'z-o'zine qoyılg'a izolyatsiyalang'an sistemanın' entropiyası sırtqı sharayatlarg'a sa'ykes keliwshi maksimum ma'nisine jetkenshe o'sedi.

§ 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 baslamasının' usınılıwı. Klauzius ta'repinen termodinamikanın' ekinshi baslamasının' usınılıwı. Salqınlatıw mashinası ha'm qızdırg'ısh. Birdey jılılıq bergish ha'm jılılıq qabıl etiwshilerge iye Karno tsikli boyınsha islewshi mashinalardıń paydalı ta'sir koeffitsienti. Temperaturalıdıq absolyut termodinamikalıq shkalası.

Anıqlaması: Sistema o'zinin' da'slepki halına qaytıp keletug'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 1_1 menen 1_2 sızıqları 1- ha'm 2-hallardı 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 $V_1, V_2, 2, L_1$ sızıg'ı 1 noqatı ha'm V_1 menen qorshalg'an maydang'a ten'. Al ekinshi integral bolsa $V_1, V_2, 2, L_2$ sızıg'ı 1 noqatı, V_1 menen qorshalg'an maydang'a ten' ha'm belgisi teris. Sonlıqtan A jumısının' ma'nisi L_1 ha'm L_2 cızıqları menen shegaralang'an maydang'a ten'.

Bul paragraftag'ı tsiklg'a berilgen anıqlama, jumıstın' shaması tek g'ana ideal gazge tiyisli bolıp qalmay, barlıq jag'daylardı da o'z ishine qamtıydı. Eger termodinamikanıq birinshi baslamasının' an'latpasının' eki ta'repin de qarap atırg'an tsikl boyınsha integrallasaq

$$\oint \delta Q = \oint dU + \oint p dV. \quad (20-2)$$

İntegral tuyıq kontur boyınsha alınadı. Tolıq 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'latpanin' ma'nisi:

Tsikldag'ı islangen barlıq jumıs sistemag'a berilgen jıllılıq esabınan orınlanadı. Tsikldın' bir bo'liminde jıllılıq sistemag'a beriledi, ekinshi bo'liminde sistemadan alınadı. Tsikldı saat tilinin' qozg'alısı bag'ıtında sho'lkemlestirse, sistemag'a berilgen jıllılıq mug'darı sistemadan aling'an jıllılıq mug'darınan artıq boladı. Bul jag'dayda sistema on' jumıs isleydi.

Al tsikldi saat tili qozg'alısı bag'ıtına qarama-qarsı bag'ıtta 1-noqattan 2-noqatqa qaray da'slep 1_2 sıızıg'ı menen ju'rip, 1_1 sıızıg'ı menen qaytıp keliw menen sho'lkemlestirse islangen 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'miynlenedi. Sonlıqtan sistema ta'repinen tsikldın' payda etiliwi ushin 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'zilisler haqqında aytıwg'a mu'mkinshilik boladı.

Tsikldın' qaysı noqatında sistema jıllılıq alatug'inlig'ı, qaysısında jıllılıq beretug'inlig'ın aytıw qıyın. Printsipinde a'piwayı juwap beriwge boladı: sistema termostatqa $\delta Q < 0$ bolg'an noqatlarda jıllılıq qabıllag'ıshqa jıllılıq beredi, al $\delta Q > 0$ noqatlarda jıllılıq beriwshi du'zilisten jıllılıq aladı. YAg'nıy $dU + pdV < 0$ bolg'an jag'dayda sistema jıllılıq beredi, $dU + pdV > 0$ bolg'anda jıllılıq aladı.

Tsikldag'ı sistemanın' jıllılıq beretug'in noqatları menen jıllılıq alatug'in noqatların ayırıp turatug'in noqat $dU + pdV = 0$ ten'lemesin sheshiw arqalı anıqlanadı. Bul sheshim tsikldın' tu'rine, hal ten'lemesine g'a'rezli bolıp an'satlıq penen alınıbaydı. To'mende bul noqatlardı grafikalıq jol menen alıwg'a tırısamız.

Paydalı ta'sir koeffitsienti. Tsikllıq protsesti orınlawshı sistema o'zinin' a'hmiyeti boyınsha termostattan alatug'in jıllılıqtı jumısqa aylandırıwshı mashina bolıp tabıladi. Termostattan aling'an jıllılıqtın' jumısqa aylang'an bo'limi qanshama ko'p bolsa mashina sonshama *effektivli* boladı. Mashinanın' effektivligi bir tsiklda islangen jumıs A nın' termostattan aling'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:

$$\eta = \frac{Q^{(+)} + Q^{(-)}}{Q^{(+)}} = 1 + \frac{Q^{(-)}}{Q^{(+)}}. \quad (20-7)$$

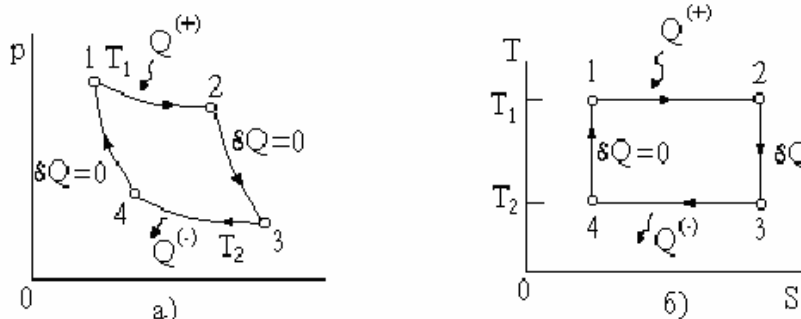
Bul shama barlıq waqıtta da 1 den kishi, sebebi $Q^{(-)}$ teris belgige iye.

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.

İdeal gaz jag'dayında $Q^{(+)}$ ha'm $Q^{(-)}$ lerdi an'sat esaplawg'a boladı. 1-2 ushastkasındag'ı jıllılıq beriwshi du'zilisten alıng'an jıllılıq

$$Q^{(+)} = \int_{(1)}^{(2)} \delta Q = \int_{(1)}^{(2)} dU + \int_{(1)}^{(2)} p dV = R T_1 \ln(V_1/V_2). \quad (20-8)$$

İzotermalıq 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.

$$Q^{(-)} = \int_{(3)}^{(4)} \delta Q = R T_2 \ln(V_4/V_3). \quad (20-9)$$

$TV^{\gamma-1} = \text{const}$ 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) formulasi (20-8), (20-9) ha'm (20-12) lardi esapqa alg'anda bilay jaziladi:

$$\eta = 1 + \frac{T_2}{T_1}. \quad (20-13)$$

Bul formula qaytımli Karno tsikli ushin duris.

Paydali ta'sir koeffitsientin entropiya ja'rdeminde esaplaw. Entropiyanın' anıqlaması boyınsha

$$\delta Q = T dS. \quad (20-14)$$

Sonliqtan

$$Q^{(+)} = \int_{(1)}^{(2)} \delta Q = T_1 \int_{(1)}^{(2)} dS = T_1(S_2 - S_1), \quad Q^{(-)} = \int_{(3)}^{(4)} \delta Q = T_2 \int_{(3)}^{(4)} dS = T_2(S_4 - S_3). \quad (20-15)$$

Adiabatalıq qaytımlı protseste entropiyanın' o'zgermeytug'inlig'inin esapqa alıp $S_2 = S_3$, $S_1 = S_4$ ek-enligine iye bolamız ha'm sonliqtan:

$$\eta = 1 + [T_2(S_4 - S_3)]/[T_1(S_2 - S_1)] = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (20-16)$$

Bul formula (19-13) penen sa'ykes keledi.

Sistemag'a berilgen jıllılıq tolıg'ı menen islangen jumıs ushin jumsalatug'ın ko'p sanlı protsessler bar. Biraq bunday protsessler tsikllıq emes ha'm sonliqtan olar haqqında ga'p etilgen joq.

Tsikldag'ı entropiyanın' tolıq o'zgerisi nolge ten' bolg'anlıqtan sistemag'a kelip tu'siwshi entropiya sistemadan shıg'ıp ketken entropiyag'a ten' bolıwı kerek. Bul sistemag'a tek jıllılıq kelip tu'setug'ın, al jıllılıq shıg'ıp ketpeytug'ın tsikldın' bolmaytug'ınlig'ın bildiredi. Sonliqtan mashinanın' paydali ta'sir koeffitsienti barlıq waqıtta birden kishi.

Tsiklda orınlang'an barlıq jumıs sistemag'a berilgen jıllılıqtın' esabınan orınlanağı.

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 ay-tılıwı).

Birden bir na'tiyjesi to'men qızdırılğ'an deneden joqarı qızdırılğ'an deneg'e jıllılıqtın' o'tiwi bolıp tabılátug'ın tsikllıq protsesstin' ju'zege keliwi mu'mkin emes (termodinamikanın' ekinshi baslamasının' Klauzius ta'repinen ay-tılıwı).

§ 2-21. Temperaturalardın' absolyut termodinamikalıq shkalası

Birday jıllılıq beriwshi ha'm jıllılıq qabıllawshılarg'a iye Karno tsiklı menen isleytug'ın qaytımlı mashinalardıń paydalı ta'sir koeffitsienti.

Karnonın' birinshi teoremasının' mazmunı to'mendegiden ibarat:

Karno tsiklında islewshi barlıq mashinalar birdey paydalı ta'sir koeffitsientine iye boladı.

Bul jerde qa'teliklerge jol qoymaslıq ushın biz mına jag'daydı atap o'temiz: Barlıq qaytımlı mashinalar birdey paydalı ta'sir koeffitsientine iye degen ga'p ayılıp atırg'an joq, al Karno tsiklı menen isleytug'ın berilgen jıllılıq beriwshi ha'm berilgen jıllılıq alıwshılarg'a iye barlıq qaytımlı mashinalardıń paydalı ta'sir koeffitsientleri birdey dep tastıyıqlanıp atır. Iqıtyarlı qaytımlı tsiklda eki temperaturag'a iye termostat penen shekleńiwge boladı ha'm joqarıda keltirilgen tastıyıqlaw bunday tsikllerge tiyisli bolmaydı.

Basqa so'z benen aytqanda Karnonın' birinshi teoreması bılayınsha da ayıladı:

Karno tsiklinin' paydalı ta'sir koeffitsienti tsikldi ju'zege keltiriwshi du'ziliske ha'm paydalanılatug'ın zattın' ta'biyatına baylanışlı emes.

Solay etip endi $\oint \delta Q = \oint p dV = A$ formulasının' ja'rdeminde mınanı tastıyın'laymız: Karno tsiklinin' paydalı ta'sir koeffitsienti tsikldi ju'zege keltiriwshi du'ziliske ha'm paydalanılatug'ın zattın' ta'biyatına baylanışlı emes, al jıllılıq beriwshi menen jıllılıq qabıl etiwshi du'zilislerdin' temperaturaların' qatnasına g'a'rezli. Paydalı ta'sir koeffitsienti barlıq waqıtta da birden kishi shama ha'm birge jıllılıq qabıllawshi du'zilistın' temperaturası nolge umılǵ'anda jaqınlasadı.

Paydalı ta'sir koeffitsientinin'

$$\eta = \frac{Q^{(+)} + Q^{(-)}}{Q^{(+)}} = 1 + \frac{Q^{(-)}}{Q^{(+)}} \quad (21-1)$$

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'ınlıǵ'ı da'llillengen edi.

Sonlıqtan $\frac{Q^{(-)}}{Q^{(+)}}$ qatnası tek g'ana T_1 ha'm T_2 temperaturaların' funktsiyası boladı. Demek

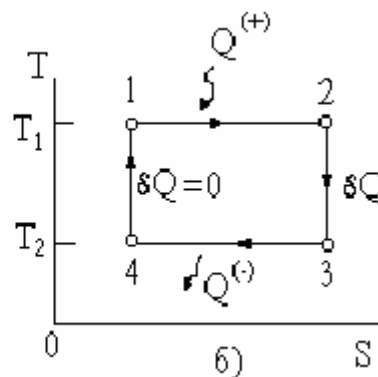
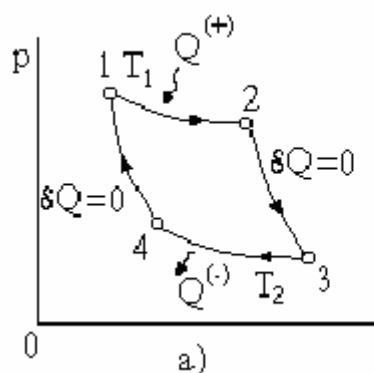
$$\frac{Q^{(-)}}{Q^{(+)}} = f(T_2, T_1). \quad (21-2)$$

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 salıstırg'anda jıllılıq beriwshi, al T_1 temperaturasına salıstırg'anda jıllılıq qabıllag'ısh bolıp xızmet etiwı mu'mkin. Bul deneni su'wrette ko'rsetilgendey etip qollanamız. a ha'm b mashinaları qaytımlı mashinalar bolıp tabıladı.

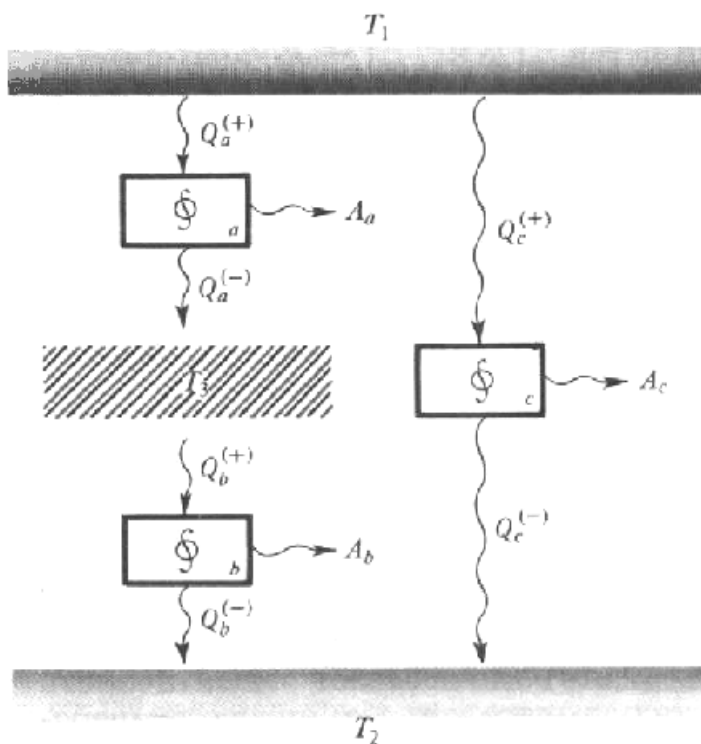
a ha'm b qaytımlı mashinalar paydalı ta'sir koeffitsienti mashinanın' paydalı ta'sir koeffitsientine ten' bir qaytımlı mashinanı payda etedi. Bul

$$Q_a^{(+)} = Q_s^{(+)}, \quad Q_b^{(-)} = Q_s^{(-)}, \quad Q_a^{(-)} = -Q_b^{(+)}, \quad A_a + A_b = A_s. \quad (21-3)$$



(21-2)-an'latpa bul mashinalar ushın mınaday tu'rge iye boladı:

$$Q_s^{(-)}/Q_s^{(+)} = f(T_2, T_1), \quad Q_a^{(-)}/Q_a^{(+)} = f(T_3, T_1), \quad Q_b^{(-)}/Q_b^{(+)} = f(T_2, T_3). \quad (21-4)$$



2-21 su'wret. Temperaturaların' termodinamikalıq shkalasın anıqlaw ushın arnalg'an sıızılma.

Bunnan (21-3) ti esapqa alıp

$$f(T_2, T_1) = Q_s^{(-)}/Q_s^{(+)} = Q_b^{(-)}/Q_b^{(+)} = -(Q_b^{(-)}/Q_b^{(+)})/Q_a^{(-)}/Q_a^{(+)} = f(T_2, T_3) f(T_3, T_1). \quad (21-5)$$

Bul ten'likтин' on' ta'repi T_3 ke baylanıssız. Sonlıqtan (21-5) tegi T_3 qısqaratug'ınday funktsiya bolıwı kerek. Bul

$$f(T_2, T_1) = -\varphi(T_2)/\varphi(T_1) \quad (21-6)$$

ten'liginin' orınlanıwının' kerek ekenligin ko'rsetedi. φ - jan'a funktsiya. Solay etip Karno tsiklındag'ı jıllılıq mug'darların' qatnası

$$\frac{Q^{(-)}}{Q^{(+)}} = -\varphi(T_2)/\varphi(T_1) \quad (21-7)$$

tu'rinde bolatug'inlig'in 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' qatnasınday etip alıwdı usındı, yag'nıy</p> |
|--|

$$\varphi(T_2)/\varphi(T_1) = \frac{T_2}{T_1}. \quad (21-8)$$

(21-8) boyınsha alıng'an temperaturalar shkalası **absolyut termodinamikalıq shkala**, al 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'in mashinanın' paydalı ta'sir koeffitsienti (21-1) bılay jazılardı

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (21-9)$$

(20-13) tegi T temperaturası ideal gaz termometri boyınsha anıqlang'an edi. Sonlıqtan (20-13) ha'm (21-9) 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 tabılardı.

Teris temperaturalar. Anıqlama boyınsha temperatura bo'lekshenin' ortasha kinetikalıq energiyasına proporsional bolıwı kerek. O'z gezeginde teris ma'nisli kinetikalıq energıyanın' bolmaytug'inlig'ına baylanisli teris ma'nisli temperaturanın' da bolıwı mu'mkin emes. Bo'lekshelerinin' qozg'alısınin' tek kinetikalıq energıyasın o'z ishine alatug'in 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'in shama ekenligin de ko'rdik. Mısalı Boltsman bo'listiriliwi formulasın bılayınsha jaza alamız

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{U}{kT}\right)$$

Bul formula jıllılıq ten'salmaqlıg'ı jag'dayında energıyası U bolg'an bo'lekshelerdin' salıstırmalı sanın (n/n_0) beredi. Bul san tek g'ana temperaturag'a baylanisli bolıp tur.

Boltsman formulası $n = n_0 \exp\left(-\frac{U}{kT}\right)$ temperaturag'a teris ma'niske iye bolıwg'a G'mu'mkinshilik berediG'. Eger $U = kT$ bolsa n n_0 den e ma'rte kishi boladı ($n = n_0 e^{-1}$ ha'm $n_0 = en$).

Joqarıdagı formulanı logarifmlep $\ln \frac{n}{n_0} = -\frac{U}{kT}$ an'latpası alamız. Sonlıqtan

$$T = -\frac{U}{k \cdot \ln(n/n_0)}.$$

Bul an'latpadan $n < n_0$ bolg'anda $T > 0$ ekenligi ko'riniptur.

Eger de $n > n_0$ ten'sizligi orın alatug'in sistema payda ete alsaq, bunday sistemadag'ı temperaturanın ma'nisi teris bolg'an bolar edi.

Klassikalıq nızamlarg'a bag'ınatug'in 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'in 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 jıllılıq beriwshi ha'm jıllılıq qabıl etiwshi du'zilisleri bar qaytımlı mashinanın paydalı ta'sir koeffitsientinen barlıq waqıtta kem bolatug'ınlıg'ın an'sat da'lillewge boladı. Bul jag'dayda birdey Karno tsikli boyınsha isleytug'in qaytımlı ha'm qaytımsız mashinalardı paydalı ta'sir koeffitsientlerin salıstırıw haqqında ga'ptin ketip atırg'anlıg'ın esletip o'temiz. Sonın menen birge paydalı ta'sir koeffitsienti qaytımlı bolg'an jag'dayda qaytımsız bolg'an jag'daydag'ıdan kem bolg'an basqa tsiklde islewshi ko'p sandag'ı mashinalardı bar ekenligine diqqat 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'llilleyimiz. Bul ushın T ha'm S o'zgeriwshilerindegi tsikllardı su'wretinen paydalanamız. Karno tsiklinen basqa tsikl iymekligi $A_1A_2A_3A_4$ tuwrı mu'yeshligi ishine sızılğan. $\delta Q = TdS = dU + dA$ 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 ushin iye bolamız:

$$A_K = \oint T dS = T_1 \int_{A_1}^{A_2} dS + T_2 \int_{A_3}^{A_4} dS = T_1(S_2 - S_1) + T_2(S_1 - S_2) = (T_1 - T_2)(S_2 - S_1).$$

Jumalg'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'yeshliklin' ishindegı basqa mashinanın' tsikli ushin alamız:

$$A = \oint T dS = \sigma = (T_1 - T_2)(S_1 - S_2) - \sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3 - \sigma_4 = A_K - \Delta_{1234},$$

$$\Delta_{1234} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4.$$

Usı mashina ta'repinen alıng'an jıllılıq

$$Q^{(+)} = \int T dS = T_1(S_2 - S_2) - \sigma_1 - \sigma_4 = Q_K^{(+)} - \Delta_{14}. \quad \Delta_{14} = \sigma_1 + \sigma_4.$$

Sonlıqtan

$$\eta = A / Q^{(+)} = \{A_K - \Delta_{1234}\} / \{Q_K^{(+)} - \Delta_{14}\}$$

$A_K = \eta_K Q_K^{(+)}$ ekenligi esapqa alıp bul ten'likti tu'rlendiremiz:

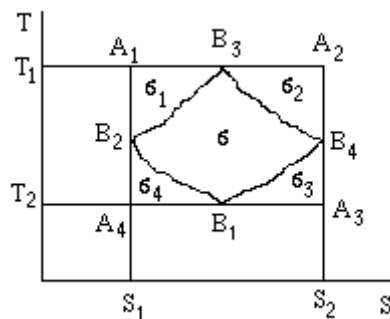
$$\begin{aligned} \eta &= \{\eta_K Q_K^{(+)} - \Delta_{14} - \Delta_{23}\} / \{Q_K^{(+)} - \Delta_{14}\} = \\ &= \{\eta_K (Q_K^{(+)} - \Delta_{14}) + \eta_K \Delta_{14} - \Delta_{14} - \Delta_{23}\} / \{Q_K^{(+)} - \Delta_{14}\} = \\ &= \eta_K - \Delta_{14}(1 - \eta_K) / \{Q_K^{(+)} - \Delta_{14}\} - \Delta_{23} / \{Q_K^{(+)} - \Delta_{14}\}. \end{aligned}$$

$\Delta_{23} = \sigma_2 - \sigma_3$. Demek $\eta \leq \eta_K$.

$\eta = \eta_K$ ten'ligi $\Delta_4 = 0$ ha'm $\Delta_{23} = 0$ bolg'anda orınlanadı. Bul jag'dayda tsikl Karno tsikli bolıp tabıladı. Teorema da'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' maksimallıg'ın tu'sindiriw ushın arnalg'an su'wret.

$$\eta = [Q^{(+)} + Q^{(-)}] / Q^{(+)} = 1 + \frac{Q^{(-)}}{Q^{(+)}}$$

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:

$$1 + \frac{Q^{(-)}}{Q^{(+)}} \leq 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (22-1)$$

Qaytadan o'zgartin'kirep jazsaq

$$\frac{Q^{(-)}}{Q^{(+)}} \leq - \frac{T_2}{T_1}. \quad (22-2)$$

«-» belgisi $Q^{(-)}$ menen $Q^{(+)}$ nin' belgilerinin' ha'r qıylılıg'ına baylanışlı.

$$Q^{(+)} / T_1 + Q^{(-)} / T_2 \leq 0 \quad (22-3)$$

tu'rinde ko'shirip jazılğ'an (23-2) Karno tsikli ushın **Klauzius ten'sizligi** dep ataladı. **Ten'lik belgisi qaytımlı protseske qoyıladı.** Bul ten'sizlikti ıqtıyarlı tsikl ushın ulıwmalastırıwğ'a ha'm ten'lik belgisinin' tek g'ana qaytımlı protsessler ushın qoyıwğ'a bolatug'ınlǵ'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.

İzolyatsiyalang'an sistemalardag'ı protsesslerde entropiya kishirey-meydi. İzolyatsiya etilmegen sistemalarda protsesslerdin' xarakterine baylanışlı 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

baylanışlı emes, al sistemag'a jıllılıq tek bir maksimallıq temperaturada berilip, tek bir minimallıq temperaturada sistemadan alınatug'ınlg'ına da baylanışlı.

İzolyatsiyalang'an sistemadag'ı entropiyanın' kemeymewi aqırg'ı esapta sistemanı en' itimal halg'a alıp keletug'ın onn' mikrohollarının' ten'dey itimallıqqa iye ekenliginde.

Joqarıda keltirilip shıg'arılğ'an ten'sizlikti ıqtıyarlı tsiklge ulıwmalastıramız ha'm ten'lik belgisinin' tek qaytımlı tsikl ushın qoyılatus'ınlg'ın da'lilleymiz.

Klauzius ten'sizligi. Sxeması su'wrette ko'rsetilgendey jumıs isleytug'ın qurılıstı qaraymız. T_1 rezervuarı turaqlı temperaturag'a iye boladı. Bul rezervuardan alınatus'ın $\delta Q^{(+)}$ jıllılıg'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 jıllılıg'ın 2 arqalı belgilengen tsikllıq mashinasına bersin. Bul qaytımlı yamasa qaytımsız qa'legen tsikllıq mashina bolsın ha'm bir tsikl islesin. Ulıwma tu'rde aytqanda temperatura T turaqlı bolıp qalmaydı ha'm 2 sanı menen belgilengen mashina menen qorshag'an ortalıqtat'ı bolatus'ın protsesslerge baylanışlı. 2 arqalı belgilengen mashina o'z tsikli dawamında A_2 jumısın islesin. 1 arqalı belgilengen mashinanın' tsikli orınlanatus'ıtsn waqt 2 arqalı belgilengen mashinanın' tsikli orınlanatus'ın waqıttan salıstırmas ese kishi (bunnan bılay qısqaqlıq ushın 1 mashina ha'm 2 mashina dep belgileymiz). Sonlıqtan 1 mashinanın' bir tsikli dawamında T temperaturasın turaqlı dep esaplaw mu'mkin.

1 mashina o'zinin' parametrleri boyınsha 2 mashinanın' jumıs islewin ta'miyinley alatug'ın bolıwı sha'rt.

1 mashinanın' bir tsikl barısında islegen jumısı

$$\delta A_1 = \delta Q^{(+)} \left(1 + \frac{T}{T_1}\right) = \delta Q^{(+)} \frac{T}{T_1} \left(\frac{T_1}{T} - 1\right) = \delta Q^{(+)} \left(\frac{T_1}{T} - 1\right) = \delta Q \left(\frac{T_1}{T} - 1\right). \quad (22-4)$$

Bul jerde (22-2) formulası esapqa aling'an. Bul formulada 1 qaytımlı mashina ushın ten'lik belgisi aling'an. Eger 2 mashinag'a kelip tu'setug'ın bolsa δQ jıllılıg'ının' belgisi on' ma'niske iye boladı.

2 mashinanın' bir tsiklde islegen jumısı A_2 ulıwmalıq bolg'an (22-3) formula tiykarında bılayınsha beriledi:

$$A_2 = \oint \delta Q. \quad (22-5)$$

2 mashinanın' tolıq bir tsiklinde islegen jumıs

$$A = \oint \delta Q_1 + A_2 = \oint (\delta A_1 + \delta Q) = T_1 \oint \frac{\delta Q}{T}. \quad (22-6)$$

Bul ten'likti tolıg'ıraq tu'sindiriw kerek. $\oint \delta Q_1$ integralında 2 mashinanın' 1 tsikli dawamında a'melge asatug'ın 1 mashinanın' ko'p tsikli boyınsha integrallaw na'zerde tutılğ'an. Al $\oint (\delta A_1 + \delta Q)$ integralında 2 mashinanın' bir tsikli boyınsha integrallaw na'zerde tutılğ'an.

Kelvin printsipi boyınsha eki mashinadan turatus'ın sistema tsikldin' birden bir na'tiyjesi bolg'an jumıs isley almaydı. Bul tsiklda sistemadan jıllılıqtın' shıg'ıwı joq (shtrixlang'an sızıq penen usı eki mashina da, usı eki mashinanın' jumıs islewi menen baylanışlı bolg'an barlıq du'zilisler qorshalg'an, demek anqlama boyınsha shtrixlang'an sızıqtan jıllılıqtın' shıg'ıwı orın almaydı). Demek

bunday sistemanın' jumıs islewinin' birden bir mu'mkinshiligi sistemag'a jıllılıqtın' kelip tu'siwi bolıp tabıladı yamasa en' aqırg'ı esapta sistema ta'repinen islengen jumıstın' nolge ten' bolıwı orın aladı: $A \leq 0$.

(22-6) tiykarında ha'm $T_1 = \text{const} > 0$ bolg'anlıqtan bul ten'sizlik

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0 \quad (22-7)$$

tu'rine iye boladı. Bul 2 mashına ta'repinen orınlang'an ıqtıyarlı tsiklge tiyisli bolıp **Klauzius ten'sizligi** dep ataladı ha'm qa'legen tsikl ushın orınlanadı.

Qaytımlı mashınalar ushın (22-7) de ten'lik belgisin alıw kerekligin, al qaytımsız mashınalar ushın eki belginin' de orın alatug'ınlıg'ın da'lillewge boladı. Solay etip

Qaytımlı protsessler ushın (22-7) Klauzius ten'sizligindegi ten'lik belgisi, al qaytımsız protsessler ushın eki belgi de orın aladı.

(22-7) 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'biletılıligi sıpatında «entropiya» termini endirildi.

Qaytımlı protsessler ushın (22-7) mınaday tu'rge iye:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0. \quad (22-8)$$

Demek bul jerde integral astında $\oint \frac{\delta Q}{T}$ tolıq differentsialı tur:

$$\frac{\delta Q}{T} = dS. \quad (22-9)$$

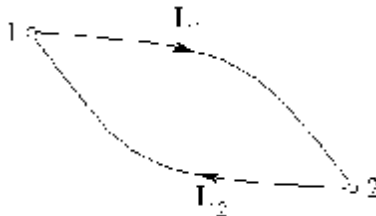
Bul jerde S arqalı entropiya belgilengen.

Demek joqarıda keltirilip shıg'arılğ'an ideal gaz ushın entropiya tu'sinigi ıqtıyarlı jag'daylar ushın da durıs boladı eken. Entropiya ushın 2-19 paragrafta da ideal gaz ushın aytlıg'anlardın' barlıg'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'ın bolsın. Qaytımlı protsess ja'rdeminde sistemanı 2 halınan 1 halına qaytaramız. Bul ushın sistemanın' izolyatsiyalang'anlıg'ın joq qılıwımız kerek. 1 halına qayıtıp keliw na'tiyjesinde Klauzius ten'sizligin qollanıw mu'mkin bolg'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 δl 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'ınlıg'ın da'lillew ushın arnalg'an su'wret

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \int_{L_1}^{(2)} \frac{\delta Q}{T} + \int_{L_2}^{(1)} \frac{\delta Q}{T} \leq 0. \quad (22-10)$$

yamasa

$$S_2 \leq S_1.$$

Demek

Tuyıqlang'an sistema entropiyası S_1 ge ten' bolg'an 1 halınan entropiyası S_2 bolg'an 2 halına o'tkende entropiya o'sedi yamasa o'zgermey qaladı. Bul jag'day $\frac{\delta Q}{T} = dS$ formulası menen an'latılatur'ın entropiyanı bar boladı dep tastıyıqlaw menen birdey bolg'an termodinamikanın' ekinshi baslamasının' mazmunın quraydı.

Qısqaraq tu'rde termodinamikanın' ekinshi baslaması bılayınsha aytıladı:

Tuyıqlang'an sistemalardag'ı protsesslerde entropiya kemeymeydi. Bul tastıyıqlaw tek g'ana izolyatsiyalang'an sistemalar ushın durıs. Protsestin' xarakterine baylanıslı izolyatsiyalanbag'an sistemalarda entropiyanın' o'siwi de, o'zgermey qalıwı da, kemeyiwi de mu'mkin.

İzolyatsiyalang'an sistemalarda entropiya tek qayıtlı protsesslerde o'zgermey qaladı. Qayıtsız protsesslerde entropiya kemeymeydi. O'z o'zine qoyılğ'an izolyatsiyalang'an sistemalarda protsessler qayıtsız ju'retug'ınlıg'ı

izolyatsiyalang'an sistema entropiyasının' barlıq waqıtta o'setug'ınlıg'ın, al entropiyanın' o'siwi sistemanın' termodinamikalıq ten' salmaqlıqqa jaqınlag'anlıg'ın bildiredi. Sistemanın' ten'salmaqlıq halg'a jaqınlawının' en' itimal halg'a jaqınlaw ekenligin eske tu'sireviz.

§ 2-23. Termodinamikanın' ekinshi baslamasına berilgen anıqlamalar

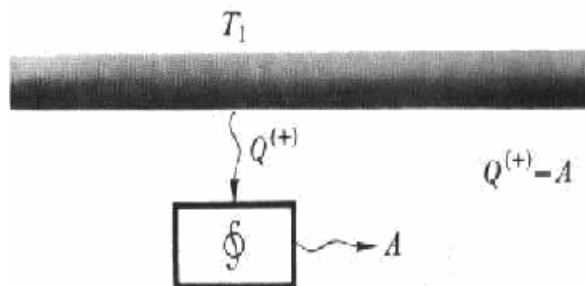
Biz da'slep termodinamikanın' birinshi ha'm ekinshi baslamaları haqqında ulıwma tu'rde talqılaw beremiz.

Termodinamikanın' birinshi baslaması ta'biyatta protsesslerdin' bag'ıtı haqqında heshqanday mag'lıwmat bermeydi. İzolyatsiyalang'an sistema ushın birinshi baslama barlıq protsesslerde usı sistemanın' energiyasının' turaqlı bolıp qalıwın talap etedi. Eger sistemanın' eki halın 1- ha'm 2-hallar dep belgilesek birinshi baslama sistemanın' 1-haldan 2-ge yamasa 2-haldın' 1-halg'a o'tiwi haqqında ayta almaydı. Ulıwma alg'anda birinshi baslamanın' ja'rdeminde izolyatsiyalang'an sistemada qanday da bir protsesstin' bolatug'ınılg'ı yamasa bolmaytug'ınılg'ı haqqında hesh na'rse aytıw mu'mkin emes.

Meyli adiabatlıq izolyatsiyalang'an sistema bir biri menen ta'sirlesetug'in, biraq basqa deneler menen ta'sir etise almaytug'in eki deneden turatug'in bolsın. Bunday jag'dayda usı eki dene arasındag'ı jıllılıq almasıwı $Q_1 = -Q_2$ sha'rtine bag'ınadı. Bir dene ta'repinen aling'an Q_1 jıllılıg'ı ekinshi dene ta'repinen berilgen $-Q_2$ jıllılıg'ına ten'. Jıllılıqtın' qay bag'ıtta o'tetug'ınılg'ın termodinamikanın' birinshi baslaması ayta almaydı. Jıllılıqtın' to'men qızdırılğ'an deneden joqarı qızdırılğ'an deneg'e o'tiwi birinshi baslamag'a qayshı kelmes edi. Temperaturanın' sanlıq ta'repi termodinamikanın' birinshi baslaması ushın jat ma'sele bolıp tabıladı. Sonlıqtan birinshi baslama temperaturanın' ratsional bolg'an shkalaların' bi rewine de alıp kelmedi.

Termodinamikanın' birinshi baslaması bolsa protsesslerdin' bag'ıtı tuwralı aytıwg'a mu'mkinshilik beredi. Biraq ekinshi baslamanın' a'hmiyeti tek usının' menen juwmaqlanbaydı. Ekinshi baslama temperaturanın' sanlıq o'lishemi haqqındag'ı ma'selenin' sheshiliwine ha'm termometrlik dene menen termometrdin' qurılısınan g'a'rezsiz bolg'an ratsional temperaturalıq shkalanı payda etiwge alıp keledi. Ekinshi baslama birinshi baslama menen birgelikte denelerdin' ko'plegen makroskopiyalıq parametrlerleri arasındag'ı da'l sanlıq qatnaslardı ornatadı. Usınday da'l qatnaslardın' barlıg'ı **termodinamikalıq qatnaslar** dep ataladı.

Termodinamikanın' ekinshi baslamasının' tiykarın salıwshı frantsuz injeneri menen fizigi Sodi Karno bolıp tabıladı. Ol jıllılıqtın' jumısqa aylanıw sha'rtlerin izertledi. Biraq ol teplorod ko'z-qarasında turg'anlıqtan termodinamikanın' ekinshi baslamasına da'l anıqlama bere alg'an joq. Anıqlama beriw XIX a'sirdin' ortalarında nemis fizigi Rudolf Klauzius ha'm shotlandiya fizigi Vilyam Tomson (lord Kelvin) ta'repinen bir birinen g'a'rezsiz tu'rde berildi. Olar termodinamikanın' ekinshi baslamasını anıqlaytug'in tiykarg'ı postulattı qa'liplestirdi ha'm bul postulattan baslı na'tiyjelerdi shıg'ardı.



2-24 su'wret. Kelvin formulirovkasındag'ı termodinamikanın' ekinshi baslamasının' sxema tu'rindegi sa'wleleniwi.

Bul su'wrette ko'rsetilgen protsesstin' a'melge asıwı mu'mkin emes.

Termodinamikanın' ekinshi baslamasına V.Tomson (lord Kelvin) 1851-jılı anıqlama tu'rinde berdi. (20-7) formulası paydalı ta'sir koeffitsientinin' 1 den artıq bolmaytug'ınılg'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:

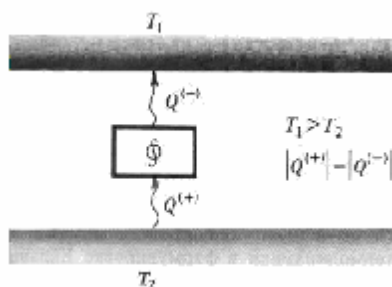
Bir jıllılıq rezervuarı menen jıllılıq almasıw arqalı jumıs atqaratug'ın tsikllıq protsess mu'mkin emes. Bazı bir mug'dardag'ı jıllılıqtın' jumısqa aylanıwı belgili bir mug'dardag'ı jıllılıqtın' qızdırg'ıshtan salqınlatqıshqa beriliwi menen a'melge asadı.

Ja'ne bir anıqlama Klauzius ta'repinen 1850-jılı berilip, to'mendegiden turadı:

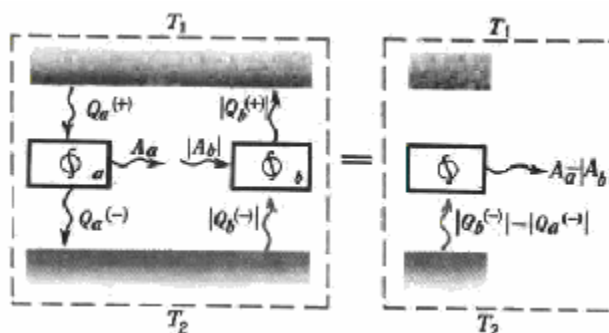
Birden bir na'tiyjesi to'men qızdırılǵ'an deneden joqarı qızdırılǵ'an denegе jıllılıq beriw bolıp tabılatus'ın tsikllıq protsesstin' ju'zege keliwi mu'mkin emes.

Bul anıqlamada termodinamikanın' ekinshi baslamasının' durısılg'ı anıq ko'rinedi. Salqın deneden o'zinen o'zi jıllılıq bo'linip shıǵ'ıp usı jıllılıqtın' temperaturası joqarı bolǵ'an denegе beriliwi mu'mkin emes.

Eki anıqlama da ekvivalent bolıp tabıladı. Ha'tte Kelvinnin' o'z formulirovkasın Klauzius formulirovkasınan tek forması jag'ınan parqlanatıǵ'ınan atap o'tti.



2-25 su'wret. Termodinamikanın' ekinshi baslamasının' Klauzius boyınsha sa'wleleniwi. Bul su'wrette sa'wlelengen protsesstin' a'melge asıwı mu'mkin emes.



2-26 su'wret. Termodinamikanın' birinshi baslamasına Kelvin ha'm Klauzius ta'repinen berilgen anıqlamalardıń ekvivalettiligin da'llillewge qollanılatus'ın su'wret.

§ 2-24. Termodinamikaliq potentsiallar ha'm termodinamikaliq ornıqlılıq sha'rtleri

Matematikanın' bazı bir formaları. Meyli

$$z = z(x, y)$$

formulası menen baylanısqa x, y, z o'zgeriwshileri bar bolsın.

Keltirilgen formula u'sh o'zgeriwshinin' ekewinin' bir birinen g'a'rezsiz ekenligin, al u'shinshi o'zgeriwshinin' ekewinin' funktsiyası ekenligin bildiredi. $z = z(x, y)$ tu'rindagi jazıw g'a'rezsiz o'zgeriwshilerdin' x ha'm y ekenligin, al g'a'rezli o'zgeriwshi shamanın' - funktsiyanın' z ekenligin an'g'artadı. Biraq sol ten'demeni x qa, y ke ha'm z ke qarata da shashiw mu'mkin. Bunday jag'daydı to'mendegidey 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 baylanıslı boladı.

z, x ha'm y lerdin' tolıq differentsialları to'mendegidey tu'rge iye:

$$dz = \frac{\partial z}{\partial x} dx + \frac{\partial z}{\partial y} dy,$$

$$dy = \frac{\partial y}{\partial x} dx + \frac{\partial y}{\partial z} dz, \quad (A-1)$$

$$dx = \frac{\partial x}{\partial y} dy + \frac{\partial x}{\partial z} dz.$$

Termodinamikada bolsa ha'r qıylı hal funktsiyalarının' tolıq differentsialları menen is alıp barıladı. Sonın' menen birge g'a'rezsiz o'zgeriwshiler sıpatında o'zgeriwshilerdin' ha'r qıylı jupları alınıwı mu'mkin. Meyli x, y yamasa x, z shamalarına g'a'rezli bolg'an bazı bir F funktsiyasına iye bolayıq. Bunday jag'daylarda bul funktsiyalardı 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'm bolsaq (A1) an'latpalarınan dara tuwındılar arasındag'ı to'mendegidey qatnaslardı alıw mu'mkin:

$$\left(\frac{\partial x}{\partial y} \right)_z * \left(\frac{\partial y}{\partial z} \right)_x * \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)_y = -1.$$

Eger dF tin' tolıq differentsial ekenligi ha'm

$$d\Phi = Pdx + Qdy$$

tu'rinde jazılatug'ınlıg'ı, sonday-aq P menen Q lardın' x penen u tin' belgili funktsiyaları bolsa anıqlama boyınsha ha'm tolıq differentsiallardın' qa'siyetlerinen

$$P = \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)_y, \quad Q = \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)_x, \quad \boxed{} = \boxed{}.$$

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 funktsiyası da termodinamikalıq hal funktsiyası bolıp tabıladı. Haldı ta'ripleytug'ın p, V, T dan basqa ishki energiya U, entalpiya H ha'm entropiya S dep atalıwshı hal funktsiyaları belgili.

Termomdinamikalıq birdeylik. Termodinamikanın' birinshi baslaması $\delta Q = TdS$ ekenligin esapqa alg'anda bılay jazıladı

$$TdS = dU + pdV. \quad (24-1)$$

Barlıq qaytımlı protseslerde orınlanatug'ın bolg'anlıqtan bul ten'lik termodinamikalıq birdeylik (ten'lik, barabarlıq, tojdestvo) bolıp tabıladı. Termodinamikalıq potentsiallardı tiykarınan usı ten'lik tiykarında alamız.

Erkin energiya yamasa Gelmgolts funktsiyası. Hal funktsiyaların' sanı og'ada ko'p bolsa da, joqarıda ayılıp o'tilgen funktsiyalardan basqa hal funktsiyaların' birazı ma'seleler sheshkende a'hmiyetke iye emes bolıp shıg'adı. Biraq termodinamikalıq hal funktsiyaları arasında ayırıqsha a'hmiyetke 1882-jılı Gelmgolts ta'repinen keltirilip shıg'arılǵ'an erkin energiya « iye boladı. (24-1) di bilay ko'shirip jazamız

$$\delta A = p dV = -dU + T dS.$$

Izotermalıq protsesste ($T = \text{const}$) sistema ta'repinen islengen jumıs bilayınsha jazılıwı mu'mkin:

$$\delta A = -d(U - TS) = -dF. \quad (24-2)$$

Demek izotremalıq protsestege islengen sheksiz kishi jumıs tolıq differentsial, al shaması keri belgi menen alıng'an erkin energiyanın' o'zgerisine ten' eken:

$$F = U - TS. \quad (24-3)$$

(24-3) ke sa'ykes erkin energiya hal funktsiyaların' funktsiyası bolg'anlıqtan bul erkin energiyanın' o'zi de hal funktsiyası bolıp tabıladı.

Izotremalıq protseste erkin energiya potentsial energiyanın' ornın iyeleydi. Teris belgi menen alıng'an onın' o'zgerisi islengen jumısqa ten'. Bul tek izotermalıq protseste orn aladı. Iqtıyarlı protseste jumıs erkin energiyanın' o'zgerisine ten' emes.

Gibbstin' termodinamikalıq funktsiyası. Bul funktsiya

$$G = F + pV = H - TS \quad (24-4)$$

ten'ligi tu'rinde anıqlanadı. Bul jerde

$$H = U + pV$$

U , H , F , G termodinamikalıq funktsiyaların' barlıg'ın da p , V , T , S o'zgeriwshilerinin' ekewinin' funktsiyası sıpatında ko'rsetiw mu'mkin. Basqa so'z benen aytqanda p , V , T , S o'zgeriwshileri eki qatnas - hal ten'lemesi ha'm termodinamikalıq ten'lik penen baylanısqa. Sonlıqtan olardıń ekewi g'ana g'a'rezsiz bolıwı mu'mkin.

Termodinamikalıq funktsiyalardıń tolıq differentsialların esaplaymız. dU tolıq differentsialı

$$dU = T dS - p dV. \quad (24-5)$$

Qalg'anları an'sat esaplanadı:

$$dH = dU + p dV + V dp = T dS + V dp. \quad (24-6)$$

$$dF = -S dT - p dV. \quad (24-7)$$

$$dG = -SdT + Vdp. \quad (24-8)$$

Keyingi to'rt ten'likten

$$\begin{aligned} T &= \left(\frac{\partial U}{\partial S} \right)_V, \quad -p = \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_S, \quad \left(\frac{\partial T}{\partial V} \right)_S = - \left(\frac{\partial p}{\partial S} \right)_V, \\ T &= \left(\frac{\partial H}{\partial S} \right)_p, \quad V = \left(\frac{\partial H}{\partial p} \right)_S, \quad \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_S = - \left(\frac{\partial V}{\partial S} \right)_p, \\ -S &= \left(\frac{\partial F}{\partial T} \right)_V, \quad -p = \left(\frac{\partial F}{\partial V} \right)_T, \quad \left(\frac{\partial S}{\partial V} \right)_T = - \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_V, \\ -S &= \left(\frac{\partial G}{\partial T} \right)_p, \quad V = \left(\frac{\partial G}{\partial p} \right)_T, \quad \left(\frac{\partial S}{\partial p} \right)_T = - \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p. \end{aligned} \quad (24-9)$$

Bul ten'likler **Maksvell qatnaslari** dep ataladi.

Termodinamikaliq potentsiallar. (24-5) 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 sipatında qaralatug'in bolsa T menen r nın' uliwmalastirilg'an ku'shlerdin' ornın iyeleytug'inlig'ı 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 sipatında entropiya S penen ko'lem V aling'anda durıs bolatug'inlig'in esletip o'temiz. G'a'rezsiz o'zgeriwshiler basqasha saylap aling'anda basqa funktsiyalar termodinamikaliq funktsiyalarg'a aylanadı. Joqarida keltirilgen formulalarda (S, p) o'zgeriwshilerine qarata entalpiya H, (T, V) o'zgeriwshilerine qarata erkin energiya F, al (T, p) o'zgeriwshilerine qarata Gibbstın' termodinamikaliq potentsiali G termodinamikaliq potentsial bolıp tabıladı.

Ishki energiyanın', entalpiyanın' ha'm entropiyanın' differentsiallarının' basqa tu'ri. Ha'r qıylı o'zgeriwshilerde dU, dH ha'm dS differentsialların joqarida keltirilgen tu'rlerden basqa tu'rlerde ko'retiwge mu'mkinshilik tuwadı. Mısalı zattın' ishki energiyası tek temperatura ha'm ko'lemnin' funktsiyası, yag'nuy $U = U(T, V)$ dep qabıl etiledi. Sonlıqtan

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V dT + \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T dV = C_V dT + \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T dV.$$

Bul jerde anıqlama boyınsha $C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V$.

Usı aling'an an'latpa ha'm $TdS = dU + pdV$ formulasınan

$$dS = \frac{dU}{T} + \frac{p}{T} dV = C_V \frac{dT}{T} + \left[\frac{1}{T} \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T + \frac{p}{T} \right] dV.$$

Ekinshi ta'repten entropiyanı (T, V) nın' 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 ushın jazılǵ'an an'latpanı bılayınsha ko'rsetiwge mu'mkinshilik beredi:

$$dU = C_V dT + [T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_V - p] dV.$$

Tap usınday esaplawlar entropiya menen entalpiyanın' differentsialları ushın to'mendegidey formulaların' orın alatug'ınlıǵ'ın ko'rsetedi:

$$dS = C_V \frac{dT}{T} + \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_V dV,$$

$$dH = C_p dT + [V - T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p] dp.$$

Keyingi ten'likte anıqlama boyınsha $C_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p$.

Eger g'a'rezsiz o'zgeriwshiler sıpatında T menen p alınsa entropiya differentsialı mınag'an ten':

$$dS = C_p \frac{dT}{T} - \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p dp.$$

Jıllılıq sıyımılıqları ushın formulalar.

$$dS = C_V \frac{dT}{T} + \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_V dV,$$

ha'm

$$dS = C_p \frac{dT}{T} - \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p dp.$$

An'latpaların bir biri menen salıstırıw arqalı alamız:

$$C_v \frac{dT}{T} + \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v dV = C_p \frac{dT}{T} - \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p dp,$$

bunnan

$$C_p - C_v = T \left[\left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v + \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \frac{\partial p}{\partial T} \right].$$

Bul jerde $C_p - C_v$ ayırması $p = \text{sonst bolg'anda ko'lem o'zgergende de, } V = \text{sonst bolg'anda basım o'zgergende de birdey bolıp o'zgeredi. Bul jag'day en' keyingi an'latpadan}$

$$(C_p - C_v)_v = T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v,$$

$$(C_p - C_v)_p = T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p$$

ekenliginen ko'rinip tur. $C_v dT + p dV = 0$ ten'lemesinen

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v = - \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \left(\frac{\partial p}{\partial V} \right)_T.$$

Sonlıqtan $S_p - S_v$ ushın jazılğ'an en' keyingi an'latpa keyingi eki an'latpa tiykarında bılay jazıladı:

$$C_p - C_v = -T \frac{\left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p^2}{\left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T}. \quad (j.c)$$

Zatlardı tolıq termodinamikalıq ta'riplew ushın za'ru'rli bolg'an eksperimentallıq mag'lıwmatlar. Keyingi formula burınıraq dU, dH ha'm dS ushın aling'an an'latpalar menen birgelikte eger p, U, T lardıń ha'mmesi ha'm C_v menen C_p lardıń birewi belgili bolsa U, H, S lerdi printsipinde anıqlawg'a mu'mkinshilik beredi. Ekinshi ta'repten U, H, S ler arqalı an'latılaturg'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 ayılıp atıg'anlıg'ın aytıp o'temiz.

Eger ayqın fazadag'ı taza zattı alıp qarasaq (mısalı puw yamasa suyıqlıq tu'rinde)

bunday zat ushın eksperimentte ko'p sanlı o'lshewler yamasa juwıq tu'rde teoriyalıq esaplawlar ja'rdeminde $p = p(T, V)$ hal ten'lemesi du'ziledi. Bunnan keyin eksperimentte jıllılıq sıyımlılıqları ushın mag'lıwmatlar alıw kerek. Bul mag'lıwmatlar (j.c) formulası menen birlikte zattın' barlıq termodinamikalıq qa'siyetlerin tolıq ta'riplew mu'mkinshiligin beredi.

Tap usınday jollar menen real 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'ınlig'ın bildiredi. Termodinamikanın' ekinshi baslaması bunday hallarg'a o'tiwge tıym saladı. Bul o'z gezeginde *adiabatalıq jaqtan izolyatsiyalang'an sistemanın' halı entropiyanın' maksimum bolg'anında ornıqlı bolatug'ınlig'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 energiyag'ın variatsiyaları bolmaydı yamasa teris ma'niske iye boladı

Variatsiya dep matematikada g'a'rezsiz o'zgeriwshinin' kishi awısıwına aytadı.

Turaqlı ko'lem ha'm entropiyag'a iye sistema ushın ornıqlılıq kriteriyi. (24-7) Klauzius ten'sizligi $\oint \frac{\delta Q}{T}$ (24-10) dı esapqa alg'anda sistemadag'ı sheksiz kishi qaytımsız protsess ushın bilayınsha jazıladı:

$$\delta Q < TdS$$

Bul sha'rtti termodinamikanın' birinshi baslamasın na'zerde tutıp bilayınsha 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 jazılğan (24-2) 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 sistemalardı ornıqlıraq hallarg'a o'tkeretug'ıtn 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 printsipinin' 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 energianın' ma'nisi minimum bolǵ'anda ornıqlı.

Turaqlı basıwǵ'a ha'm entropiyag'a iye sistemanın' halı entalpiyanın' minimumında ornıqlı.

Turaqlı ko'lemge ha'm temperaturag'a iye sistemanın' halı erkin energianın' ma'nisi minimum bolǵ'anda ornıqlı.

Turaqlı temperatura ha'm basıwǵ'a iye sistemanın' halı Gibbstin' termodinamikalıq potentsialı minimum bolǵ'anda ornıqlı.

§ 2-25. Molekulalardagi baylanis ku'shleri

Molekulalardagi baylanis ku'shleri. Ionliq baylanis. Kovalentlik baylanis. Qatti denelerdeg molekulalar arasindagi ku'shler. Suyuqliqlardin' qurilisi. Van-der-Vaals ku'shleri. Molekulalar arasindagi o'z-ara ta'sirlesiw potentsiali. Molekulalar sisteması. Suyiq ha'm gaz ta'rizli hallar.

Molekulalar arasindagi o'z-ara ta'sirlesiw ku'shleri tartisiw ku'shleri, biraq kishi aralıqlarda iyerisiw ku'shleri bolıp tabiladı. O'z-ara ta'sir etisiw na'tiyjesi molekulalardin' ortasha kinetikalıq energiyası menen molekulalar arasindagi ta'sir etisiwge sa'ykes keletug'in ortasha potentsial energiya arasindagi qatnasqa baylanisli. Suyiq hal molekulalardin' ortasha tolıq energiyasının' teris ma'niske shekem kemeygende ju'zege keledi.

Atomdag'i elektronlar yadrolar a'tirapında kulon ku'shleri ta'sirinde uslap turiladı. Tolig'ı menen alg'anda atom elektrlik jaqtan neytral. Molekulalar atomlardan turadı. Molekulalardagi atomlardı uslap turatug'in ku'shler de ta'biyatı boyınsha elektrlik ku'shler bolıp tabiladı. Bul ku'shlerdin' payda bolıwı quramalıraq. Molekulalardagi atomlar arasindagi baylanistın' tiykarınan eki tu'ri bar.

Ionliq baylanis. Geypara jag'daylarda elektrlik jaqtan neytral bolg'an atom basqa sorttag'i atomnın' elektronların o'zine tartıp alıp teris zaryadqa iye iong'a aylanadı. Bir elektrondı tartıp alg'an atom bir valentli iong'a, eki elektrondı tartıp alg'an atom eki valentli iong'a aylanadı. Al elektronnı jog'altqan atom da o'z gezeginde on' zaryadlı iong'a aylanadı.

Zaryadı ha'r qıylı belgige iye ionlar arasindagi o'z-ara tartisiw ku'shi (Kulon ku'shi) elektrlik jaqtan neytral molekulalardin' payda bolıwın ta'miyinleydi.

Usınday molekulalar sıpatında NaCl molekulasın ko'rsetiw mu'mkin. Bul molekulanı ionlar tu'rinde bılay jazıw mu'mkin Na^+Cl^- . Na^+ menen Cl^- ionları arasindagi tartisiw potentsial energiyası (Cl sistemasında)

$$E_p(r) = - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon r_0} . \quad (25-1)$$

r_0 ionlar arasindagi ten' salmaqlıq aralıq. SGS sistemasında bul formula a'piwayı tu'rge iye boladı:

$$E_p(r) = - \frac{e^2}{r_0} . \quad (25-1')$$

Bul energiya menen bir qatarda on' ma'niske iye ionlar arasindagi o'z-ara iyerisiw energiyası da bar (iyerisiw ha'r bir ionnın' belgili bir ko'lemdi iyelewine baylanisli, ion menen iyelengen ko'lemge basqa ionlar kire almaydı). Usı iyerisiw na'tiyjesinde ionlar bir birine kishi aralıqlarg'a jaqınlasa almaydı. İyerisiw ku'shleri kishi qashıqlıqlarda u'lken ma'niske iye bolıp, qashıqlıq u'lkeygende tez kishireyedi. NaCl molekulasının' dissotsiatsiyası ushın (24-1) formulasınan minaday an'latpa alamız:

$$\Delta E = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_0} . \quad (25-2)$$

r_0 din' gaz ta'rizli haldag'ı o'zgerisi ushın $r_0 = 2.5 \cdot 10^{-10}$ m. Demek $\Delta E \approx 9 \cdot 10^{-19}$ Dj. Bul shama eksperimentke 5 protsentlik da'llikte sa'ykes keledi. Usınday usıl menen basqa molekular ushında qanaatlandırılıqtay na'tiyjeler alınadı.




Fizikalıq ko'z-qaras boyınsha ionlıq baylanıs elektronnıń zaryadına eselik zaryadlar almasıw arqalı a'melge asadı.

Eger elektronnıń zaryadına pu'tin san eselenbegen zaryad almasıw bolg'an jag'daylarda kovalentlik baylanıs du'ziledi.

Kovalentlik baylanıs. İonlıq baylanıs ko'p sandag'ı molekular dıń qalay payda bolatug'inlig'ı tu'sindire almaydı. Onday molekular sıpatında, misalı, O_2 , N_2 , N_2 molekuların ko'rsetiwge boladı. Bul molekular dıń quramında atomlar dıń ekewi de ten' huqıqlı. Sonlıqtan olardıń birewi on', ekinshisi teris zaryadlanadı dep ayta almaymız. Usınday molekular dıń atomlar arasındaǵı baylanıs **kovalent baylanıs** dep ataladı.

Kovalent baylanısı tu'siniw tek kvant mexanikası ja'rdeminde a'melge asırıladı. Biraq bul baylanısıń fizikalıq ma'nisi klassikalıq fizika tiykarında da beriliwi mu'mkin.

Eki on' zaryad bir birinen iyteriledi. Usı eki birdey bolg'an zaryadtıń ortasına absolyut ma'nisi boyınsha eki on' zardtıń qosındısına ten' teris zaryadlang'an bo'leksheni jaylastırayıq. Bunday jag'dayda teris zaryad ta'repinen on' zaryadlang'an bo'lekshelerge on' zaryadlang'an bo'leksheler dıń 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 molekulanıń payda bolıwı ushın baylanıs du'ziwshi eki atom sırtqı elektron qabıǵında jaylasqan elektronlardan ortalıqqa elektronların shıǵ'aradı.

| | |
|--|---|
| Birdey belgige iye zaryaq iye bo'leksheler bir biri menen iyterisedi. |  |
| Eger on' zaryadlı bo'leksheler ortasına absolyut shaması on' zaryadtay bolg'an teris zaryadlı bo'leksheler ornatılrsa 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 jaqınlatıwǵa umtıdıratug'ın (tartılıs) ku'shi payda boladı. |  |

Qattı denelerdegi molekular aralıq ku'shler. Qattı haldag'ı molekular arasındaǵı baylanıs energiyası olardıń jıllılıq qozǵalıswın kinetikalıq energiyasınan artıq bolg'an jag'dayda qa'liplesedi. Na'tiyjede erkin energiyanıń minimumına sa'ykes keliwshi kristallıq qurılıs payda boladı.

İonlıq ha'm kovalentlik baylanıslar atomlardı tek molekular dı 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 kremniyge usag'an yarım o'tgizgish kristallar). Baylanıs ionlıq baylanıs tiykarında payda bolg'an kristallardı ionlıq kristallar dep esaplaymız. Kovalent baylanısıń payda bolıw mexanizmi atomlar ta'repinen ortag'a shıǵ'arılǵan elektronlardıń kristallıq pa'njerini payda etiwshi ayqın atom yamasa molekula menen tıǵ'ız baylanıspag'anlıǵın ko'rsetedi. Bul jag'dayda baylanısı payda etiwshi elektronlar ionlar arasında tarqaladı. A'dette bul elektronlar ionlar aralıqlarında baylanıs bag'ıtları dep atalatug'ın bag'ıtlarda kontsentratsiyalang'an boladı. İonlıq kristallarda elektronlıq bult ionlardıń a'tırapında jıylang'an, al ionlar arasında bunday ionlar derlik bolmaydı.

Suyıqlıqlar qurılısı. Gazler menen suyıqlıqlarda molekular bir biri menen statsionar, ornıqlı baylanıs penen baylanıspag'an. Molekular o'zlerinin' salıstırmalı orınların o'zgerte aladı. Gazlerdegi molekular arasındag'ı qashıqlıqlardıń ortasha ma'nisi u'ken ha'm bir birine salıstırg'anda olar o'zlerinin' orınların tez o'zgerte aladı.

Suyıqlıqlarda molekular arasındag'ı qashıqlıq az, molekular 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 molekular birigip molekular assotsiatsiyaların payda ete aladı. Bul molekular o'zinin' qa'siyetleri boyınsha qattı denelerdi eske saladı.

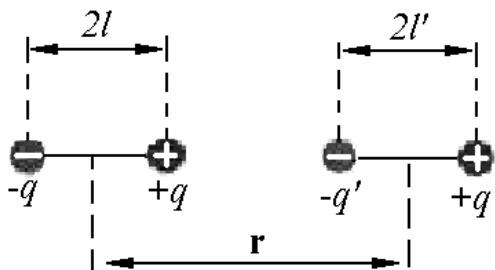
Solay etip suyıqlıqlar o'zinin' qurılısı ha'm molekuları arasındag'ı baylanısları boyınsha gazlerdin' qa'siyetlerine de, qattı denelerdin' qa'siyetlerine de iye boladı. Sonlıqtan suyıqlıqlar teoriyası salıstırma tu'rde quramalı ha'm to'men izertlengen.

Van-der-Vaals ku'shleri. Salıstırmalı u'ken qashıqlıqlarda molekular 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' ($\mathbf{p} = e * \mathbf{d}$). Dipol o'zinin' a'tırapında elektr maydanın payda etedi ha'm sol maydan arqalı basqa dipollar menen ta'sir etisedi.

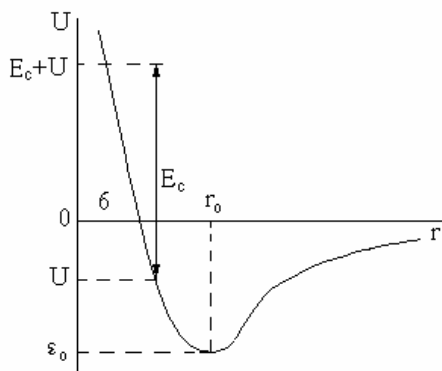
Turaqlı dipol momentine iye molekular boladı. Bunday molekuları polyar molekular dep ataymız. Olar jaqınlasqanda ha'r qıylı zaryadları menen qarap turatug'ınday bolıp bir birine salıstırg'anda burıladı. A'dette polyar molekular o'z-ara tartıladı. Bunday ku'shlerdi **dipollıq-orientatsiyalıq** dep ataymız.



2-27 su'wret. Van-der-Vaals ku'shlerinin' payda bolıwın tu'sindiretug'ın su'wret

Molekular arasındag'ı ta'sir etisiwdin' potentsiali. Kishi qashıqlıqlarda molekular arasında iyterisiw ku'shleri orın aladı. İyterisiw molekuların' belgili bir ko'lem iyeleytug'ınlıg'ının', bul ko'lemge basqa molekuların' kiriwine jol qoyılmaytug'ınlıg'ının' na'tiyjesi bolıp tabıladı. Bul iyterisiw ku'shleri molekuların' o'lsheplerindey aralıqlarda orın aladı.

Potentsial energiyanın' r qashıqlıqqa baylanıslı o'zgerisi su'wrette ko'rsetilgen. $r > r_0$ qashıqlıqlarında molekular arasında tartıslıw ku'shleri ta'sir etedi, al $r < r_0$ qashıqlıqlarda iyterisiw ku'shi orın aladı. $E_n(r)$ ushın da'l ta'ripleme tek g'ana ayqın molekula ushın beriliwi mu'mkin. Barlıq molekular ushın $E_n(r)$ ge universal formula joq. A'dette $E_n(r)$ funktsiyası to'mendegi formula ja'rdeminde approksiyalanadı:



2-28 su'wret. Molekulalıq o'z-ara ta'sirlesiw potentsiali.

$$E_p = \frac{a_1}{r^n} - \frac{a_2}{r^m} \quad (25-3)$$

Bul formuladag'ı a_1 , a_2 , n ha'm m real potentsial ushin saylap alinadi. İzertlewler ko'pshilik jag'daylarda $n = 12$, $m = 6$, ayqın atomlar ushin aling'an a_1 menen a_2 lerde qanaatlandırırılıq na'tiyje alinatug'inlig'in ko'rsetedi, yag'nıy

$$E_p(r) = 4\epsilon_0 \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r^6} \right) \right]. \quad (25-5)$$

Suyıqlıqlar ha'm gazler teoriyasında ken'nen qollanilatug'in bul potentsial **Lennard-Djons potentsiali** dep ataladı.

Van-der-Vaals ku'shi to'mendegi formula menen beriledi:

$$F(r) \sim \frac{1}{r^7}, \quad (25-6)$$

yag'nıy bul ku'sh qashıqlıqqa baylanisli ju'da' tez kemeyedi. Sa'ykes potentsial

$$E_p(r) \sim \frac{1}{r^6}.$$

Demek

Van-der-Vaals ku'shleri zaryad almasıw pu'tkilley bolmaytug'in 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 molekulalarının' kinetikalıq ha'm potentsial energiyalarınin' 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 molekullardın' kinetikalıq energiya menen potentsial energiyalardın' qosındısı teris bolatug'ın jag'day payda boladı. Molekullardın' bunday sisteması o'zinshe u'lken ko'lemde tarqala almaydı.

Bul jag'dayda baylanısqa hal ju'zege keledi. Molekullar u'lken aralıqlarğa kete almaydı, al kerisinshe shekli ko'lemde bir birinıń a'tırıpında toplanadı. Molekullar sistemasın'ı bunday halı suyıq yamasasa qattı hal bolıwı mu'mkin. Ko'binese (barqulla emes, al kritikalıq temperaturalarǵan to'men temperaturalarǵa) gaz qısılg'anda suyıq hal payda boladı.

Qısqa jag'dayda gaz halınan suyıq halǵan payda bolıwı molekullardın' kinetikalıq energiyası ju'da' u'lken bolmag'an jag'dayda a'melge asadı. Belgisi teris bolg'an molekullar arasındag'ı ta'sirlesiw energiyası shekli ma'niske iye boladı. Sonlıqtan jetkilikli da'rejedegi joqarı temperaturalarǵa kinetikalıq energiya menen potentsial energiyalardın' qosındısı hesh waqıtta da teris ma'niske iye bolmaydı. Sonlıqtan belgili bir temperaturadan joqarı temperaturalarǵa tek qısıw jolı menen gazdı suyıqlıqqa aylandırw mu'mkin emes. Temperaturanın' usı belgili ma'nisin **kritikalıq temperatura** dep ataymız.

Basım azayg'anda protsess keri bag'ıtta rawajlanadı - molekullar sisteması suyıq halǵan gaz ta'rizli halg'a o'tedi.

Molekullar arasındag'ı ta'sir etisiwdi ta'ripleytug'ın universal nızam joq. Bunday ta'sirlesiw molekullardın' qa'siyetine, ta'sir etisiw sharayatlarına ha'm basqa da ayqın faktorlarga baylanıslı. Sonlıqtan molekullar 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. Metallıq baylanıs o'zinin' fizikalıq ta'biyatı boyınsha kovalentlik bolıp tabıladı, biraq ko'p elektronlardın' ulıwmalıq elektronlarga aylanıwı menen a'melge asadı.

Eger molekulanın' ortasha kinetikalıq energiyası ortasha potentsial energiyasın' modulinen kishi bolsa (yag'mıy molekulanın' tolıq energiyası teris shama bolg'anda, tolıq energiya = potentsial energiya + kinetikalıq energiya) molekullardın' baylanısqa halı payda boladı. Na'tiyjede suyıqlıq yamasasa qattı dene qa'liplesedi.

Sorawlar:

Qanday fizikalıq faktorlardın' esabınan Van-der-Vaals ku'shinin' shaması aralıqtın' jetinshi da'rejesine kerip proporsional bolıp kemeyedi? Ha'r qıylı 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 baylanıslı 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.

Misal retinde jabıq ıdıstag'ı suw menen onın' u'stindegi hawa menen suw puwlarının' aralaspasın ko'rsetiw mu'mkin. Bul sistema **eki fazalı sistema** dep ataladı. Bul zat eki fazadan turadı: **suyıq** (suw) ha'm **gaz ta'rizli** (hawa menen suw puwlarının' aralaspası). Eger hawa bolmag'anda da sistemada eki faza bolg'an bolar edi: suyıq (suw) ha'm gaz ta'rizli (suw puwları). Suwg'a bir kesek muz taslaymız. Bunday jag'dayda sistema u'sh fazalı sistemag'a aylanadı ha'm qattı (muz), suyıq (suw) ha'm gaz ta'rizli (suw puwları) fazalardan turadı. Suwg'a belgili bir mug'dardag'ı spirt qosamız. Fazalar ayırması o'zgermeydi. Sebebi suw spirt penen qosılıp fizikalıq jaqtan bir tekli suyıqlıq alınadı. Al suwg'a sinap qosılsı sinap suw menen aralaspaydı. Bunday jag'dayda **eki suyıq fazadan** turatug'ın sistema alınadı. Gaz ta'rizli faza burıng'ısınsha hawa, suw puwları ha'm sinap puwlarının' aralaspasınan turatug'ın bir fazadan turadı. *Solay etip sistemada bir waqıtta bir neshe qattı ha'm suyıq fazalardıń bolıwı mu'mkin. Gazler bir biri menen aralasıp ketetug'ın 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'ın na'zerde tutamız. Jıllılıq ten' salmaqlıg'ının' ornawı ushın sistemanın' barlıq fazaları birdey temperaturag'a iye bolıwı kerek. Al fazalar arasındag'ı shegaranın' ha'r ta'repine tu'sken basımlardıń 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. İymek shegaralar jag'dayında bet kerimin esapqa alıwg'a tuwra keledi. Misalı suyıqlıq penen onın' puwı arasındag'ı ayırıp turatug'ın iymek bette $P_2 - P_1 = \sigma K$ ($K = 1/R_1 + 1/R_2$) basımlar ayırması orın aladı.

Basımlar menen temperaturaların' ten'ligi sistemanın' ten' salmaqlıqta turg'anlıg'ın bildirmeydi. Sebebi o'z ara tiyisip turg'an fazalar arasında bir birine o'tiwlerdin' bolıwı mu'mkin. Bunday o'tiwlerdi **fazalıq o'tiwler (fazalıq aylanıslar)** dep ataymız. Fazalıq o'tiwlerdin' na'tiyjesinde bir faza u'lkeyedi, ekinshisi kishireyedi, ha'tte ayırım fazalardıń tolıq jog'alıp ketiwi mu'mkin. Ten' salmaqlıq hal barlıq fazalardıń massalarının' o'zgerissiz qalıwı menen ta'riplenedi. Demek fazalar arasındag'ı ten' salmaqlıqtın' ja'ne bir za'ru'rli sha'rtinin' 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'ın ximiyalıq bir tekli zattan turatug'ın sistemanı qaraymız. m_1 birinshi, al m_2 ekinshi fazalar massaları bolsın. φ_1 ha'm φ_1 arqalı usı fazalardıń salıstırmalı termodinamikalıq potentsialların belgileyik. Barlıq sistemanın' termodinamikalıq potentsialı $\Phi = m_1\varphi_1 + m_2\varphi_2$ ge ten' boladı. Sistemanın' temperaturası menen basımı o'zgerissiz qalsın. Tek g'ana basım menen temperaturag'a g'a'rezli bolg'anlıqtan 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 Φ mu'mkin bolg'an kishi ma'niske iye bolıwa qarata umtıladı. Eger $\varphi_1 > \varphi_2$ bolsa 1-fazanın' 2-fazag'a aylanısı Φ 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

$$\varphi_1(P, T) = \varphi_2(P, T) \quad (26-1)$$

bolg'an jag'dayda g'ana fazalar bir biri menen ten' salmaqlıq halda tura aladı. Sonlıqtan fazalar arasındag'ı ten' salmaqlıq sha'rti olardıń salıstırmalı termodinamikalıq potentsiallarının' ten'liginen ibarat boladı.

Fazalıq o'tiwlerge zatların' agregat halının' o'zgeriwi misal bola aladı. Agregat hal dep zatların' 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 zatların' kondensatsiyalang'an haldan gaz ta'rizli halına o'tiwi dep ataymız. Keri o'tiwdi kondensatsiya dep ataymız. Zattın' qattı haldan birden gaz ta'rizli halını o'tiwin **sublimatsiya** yamasa **vozgonka** dep ataydı. Qattı haldan suyuq halg'a o'tiwdi **eriw**, al keri o'tiwdi **qatıw** dep ataymız.

Zatlardıń 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 $\phi(T, P)$ dın' u'zliksiz bolıp o'zgeretug'ınıg'ı joqarıda ko'rsetilgen edi. Biraq onın' tuwındıları u'ziliske ushırawı mu'mkin.

Termodinamikalıq potentsial $\phi(T, P)$ 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.

$$s = - \left(\frac{\partial \phi}{\partial T} \right)_P, \quad v = \left(\frac{\partial \phi}{\partial P} \right)_T \quad (26-2)$$

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'ınıg'ın bildiredi (mısalı eriw jıllılıg'ı). Massası bir birlikke ten' zattın' 1-fazasın 2-fazag'a kvazistatikalıq jol menen o'tkeriw ushın kerek bolatug'ın jıllılıq mug'darı q bılay esaplanadı:

$$q = T(s_2 - s_1). \quad (26-3)$$

Usı waqıtqa shekem qarap o'tilgen fazalıq o'tiwler (eriw, puwlanıw, qaynaw, vozgonka, kristallanıw) jıllılıqtın' jutılıwı yamasa shıg'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'ınıg'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:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial T^2} = - \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_P = -c_p T,$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial T \partial P} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial P \partial T} = \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P,$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial P^2} = \left(\frac{\partial v}{\partial P} \right)_T.$$

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 c_p ;

2) jıllılıqqa ken'eyiw koeffitsienti $\alpha = \frac{1}{v_0} \boxed{};$

3) zattı izotermalıq qısıw koeffitsienti $\gamma = - \frac{1}{v} \boxed{}.$

Ekinshi a'wlad fazalıq aylanıslarına (o'tiwlerine) misal retinde temirdin', nikeldin', kobaltın' yamasa magnetlik quymalardıń birinin' **ferromagnet** haldan **paramagnet** halg'a o'tiwın ko'rsetiwge boladı. Bunday o'tiw materialdı qızdırg'anda belgili bir temperaturada ju'zege keledi. Temperaturanın' bul ma'nisin **Kyuri noqatı** dep ataymız. Sırtta magnet maydanı bolmag'an jag'dayda zatlardın' to'mengi temperaturalarda (absolyut nolge jaqın temperaturalarda) asa o'tkizgishlik halg'a o'tiwi de ekinshi a'wlad fazalıq o'tiwlerine misal bola aladı.

Endi fazalıq o'tiwlerdi ta'ripleytug'ın bir qansha ma'seleler keltiremiz.

1-ma'sele. Temperaturası 0°S bolg'an jabıq ıdısta bir mol suw bar (18 g). Usı sistemanın' temperaturasın 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 ıdı 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'inlıg'ına baylanıslı jumıs islenbeydi. Sonlıqtan beriletug'ın jıllılıq tolıg'ı menen sistemanın' ishki energiyasın arttırıwıw'a jumsaladı ha'm sistemanı da'slepki haldan keyingi halg'a o'tkeriw usılına g'a'rezli emes. Bul o'tiwdi eki etapta a'melge asıramız

1. Suwdı 0°S dan 100°S g'a shekem puwlanıw bolmaytug'ınday etip qızdıramız. Bul ushın $q_1 = 18 \cdot 100 = 1800$ kal/mol jıllılıg'ın beriwimiz kerek.

2. $t = 100^\circ\text{C}$ turaqlı temperaturasında suwdı puwlandıramız. Bul ushın $q_2 = u_p - u_j$ jıllılıq mug'darın beriwimiz kerek (u_p menen u_j bolsa 100°S da ha'm atmosferalıq basımdıg'ı bir mol puw menen suwdın' ishki energiyaları). $u_p - u_j$ ayırmasın anıqlaw ushın termodinamikanın' birinshi baslamısının' $q = u_p - u_j + A$ formulasın qollanamız. Bul jerde q bir mol ushın puwlanıw jılıwı, $q = 539 \cdot 18 = 9710$ kal/mol, al A bolsa turaqlı sırtqı basımdı jen'iw ushın islengen jumıs ($A = PV_p = RT = 1.98 \cdot 373 = 739$ kal/mol). Solay etip

$$q_2 = u_p - u_j = q - A = 8970 \text{ kal/mol.}$$

$$1 = 1_1 + 1_2 = 1800 + 8970 = 10\,770 \text{ kal/mol.}$$

Endi fazaliq o'tiwlerdin' en' a'piwayilarinin' biri puwlinaw menen kondensatsiyani qaraymiz.

§ 2-27. Gaz halinan suyuq halg'a o'tiw

Gaz halinan suyuq halg'a o'tiw. Eksperimentalliq izotermalar. Kritikalıq hal. Eki fazalı hal oblasti. Toyıng'an puw. Toyıng'an puwdın' tıg'ızlıg'ı. Kritikalıq hal-lardag'ı zatların' qa'siyetleri. Turaqlı ko'lemde temperatura o'zgergende eki fazalı sistemanın' qa'siyeti.

Eksperimentte aniqlang'an izotermalar. Qısıw protsessinde eksperimentte aniqlang'an real gaz-din' izotermaları to'mendegi su'wrette keltirilgen. Usı diagramma boyınsha T temperaturasındag'ı gazdı qısıw protsesin qaraymız. Gazdı V_1 ko'lemine shekem qısqanda onın' basımı p g'a shekem artadı. Ko'lemnin' bunnan bılay kemeyiwinde gazdin' bir bo'limi suyuqlıqqa aylanadı, al basım p turaqlı bolıp qaladı. Demek diagrammadag'ı B dan C g'a shekemgi aralıqta ıdista bir waqıtta gaz de, suyuqlıq ta bo-ladı. Gaz benen suyuqlıqtı ayırıp turatug'ın bet suyuqlıq beti bolıp tabıladı. Fizikalıq jaqtan sistema bo'lingen bir tekli bo'limler fazalar dep ataladı. Demek CB ushastkasında sistema suyuq ha'm gaz fazalardan turadı. B noqatında barlıq ko'lem gaz faza menen toltrılǵ'an. B dan C g'a ju'rgende ko'lemnin' gaz faza menen tolǵ'an bo'legi kemeyedi, al suyuq faza menen tolǵ'an bo'limi u'lkeyedi. C noqatında barlıq ko'lem V_2 suyuqlıq penen toladı. Gazdin' suyuqlıqqa aylanıwı tolıg'ı menen pitedi. Ko'lemnin' bunnan bılay kishireyiwi suyuqlıqtı qısıw menen a'melge asadı. O'z gezeginde suyuqlıq qısıwǵa u'lken tosıqlıq jasaydı. Na'tiyjede basım tez u'lkeyedi.

Kritikalıq hal. Temperatura joqarı bolǵ'anda izotermanın' suyuq ha'm gaz fazalarg'a sa'ykes ke-liwshi ushastkası kishireyedi. T_{kr} temperaturada usı ushastka noqatqa aylanadı.

Usı noqatta gaz benen suyuqlıq arasındag'ı ayırma jog'aladı. Basqa so'z benen aytqında kritikalıq qnoqatta gaz benen suyuqlıq birdey fizikalıq qa'siyetke iye boladı.

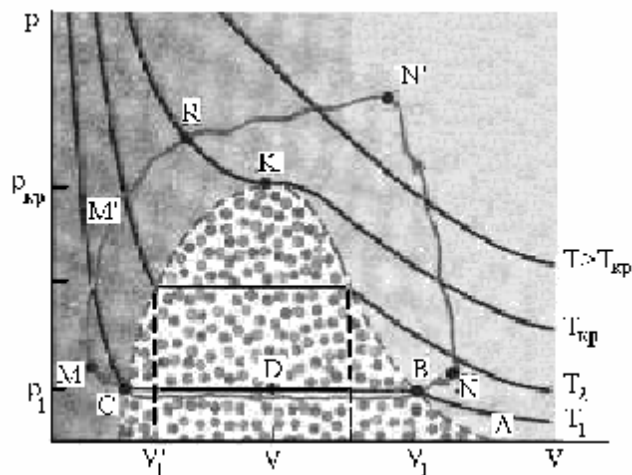
Bunday haldı **kritikalıq hal** dep ataymız. T_{kr} , V_{kr} ha'm p_{kr} shamaların sa'ykes kritikalıq temperatura, ko'lem, basım dep ataymız. Kritikalıq temperaturadan joqarı temperaturalarda gaz basımdı u'lkeytiwdin' saldarınan suyuqlıqqa aylanbaydı.

Eki fazalı hal oblasti. Su'wrette eki fazalı oblast C, K, B, A noqatları arqalı o'tiwshi shtrixlang'an sıziq penen ayırıp ko'rsetilgen. Gaz ta'rizli haldan suyuq halg'a o'tiw eki jol menen asırıladı: NBCM boyınsha eki fazalı oblast yamasa NN'RM'M arqalı. Ekinshi jag'dayda 4 noqatında eki fazalı oblastsız suyuq halg'a o'tiw a'melge asadı. Bul noqatta suyuq ha'm gaz ta'rizli hallar arasındag'ı ayırma jog'aladı. Biraq usı noqatqa qon'ısı bolǵ'an noqatlarda suyuqlıq penen gazdin' qa'siyetleri ha'r qıylı boladı.

Toyıng'an puw. Eki fazalı sistemada suyuqlıq penen puw dinamikalıq ten' salmaqlıqta turadı ha'm bul halg'a anıq basım menen tıg'ızlıq sa'ykes keledi. p basımı T temperaturadag'ı toyıng'an pardın' basımı dep ataladı. Su'wrette temperaturanın' o'siwi menen toyıng'an puw basımının' da ko'teriletug'inlıg'ı ko'rinip tur. Berilgen temperaturada «tıg'ızlaw» mu'mkin bolmag'anlıqtan puw toy-ing'an puw dep ataladı.

Kritikalıq noqatta suyuq fazanın' tıg'ızlıg'ı gaz fazanın' tıg'ızlıg'ına ten' boladı. YAǵ'nıy

$$\rho_{kr} = M/V_{kr}.$$



2-29 su'wret. Real gaz benen suyuqlıqtın' izotermaları

Zatlardıń kritikalıq haldag'ı qa'siyetleri. Kritikalıq noqatta izoterma gorizont boyınsha bag'ıtlang'an. Sonlıqtan $(\partial p / \partial T)_T = 0$, yag'my 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 qubılısınin' payda bolıwına alıp keledi (tıg'ızlıq fluktuatsiyasınin' o'siwinin' na'tiyjesinde kritikalıq halda turg'an zattın' jaqtılıq nurların ku'shli shashıratıwı).

Suyıqlıq halınan gaz halına o'tkende turaqlı temperaturada sistemag'a belgili bir mug'darda jıllılıq beriliwi kerek. Bul jıllılıq zattın' fazalıq halın o'zgertiw 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 jo-qarılag'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 pu-wdın' basımın da o'sedi. Usı eki shama arasındag'ı baylanıs Klapeyron-Klauzius ten'lemesinde berilgen.

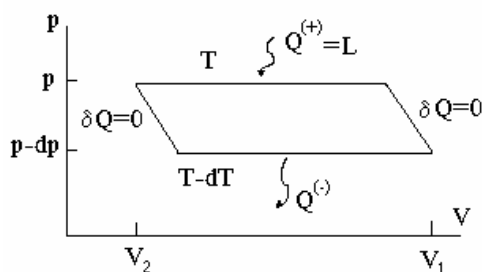
Sheksiz kishi Karno tsiklin qaraymız. Bul tsikldin' izotremaları T ha'm dT temperaturalarındag'ı eki fazalı oblast bolsın. Bul tsikldegi jumıs

$$A = (V_1 - V_2) dp. \quad (28-1)$$

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. Klapayron-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 **Klapayron-Klauzius ten'lemesi** dep ataladı. Bul ten'leme eki fazalı sistema ten' salmaqılıq halda turg'an jag'daydag'ı basım menen temperatura arasındag'ı baylanıstı beredi. Eger jasırın jıl-lılıg'ı 1, V_2 ha'm V_1 ko'lemleleri belgili bolsa (28-4) ten'lemesi basımdı temperaturanın' funksiya sıpatında tabıwg'a boladı.

Molekulalıq ko'z-qarastan suyıqlıqtın' puwlınıwı ushın jıllılıqtın' ne sebepten kerek ekenligin an'sat tu'siniwge boladı. Suyıqlıq molekulaların' tezlikleri Maksvell nızamı boyınsha tarqalg'an. Suyıqlıqtan qorshag'an ortalıqqa tek g'ana ayırım tez qozg'alatug'ın molekulalar uship shıg'ıwı mu'mkin. Tek solar g'ana suyıqlıqtın' beti qatlamındag'ı tartılıs ku'shlerin jen'e aladı. Betlik qatlam arqalı o'tkende molekula-lardıń tezligi kemeyedi ha'm sonın' saldarınan puwdın' temperaturası suyıqlıqtın' temperaturasına ten' boladı. Tez qozg'alatug'ın molekulalar 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.

Klapayron-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:

$$dp/dT = Q_{23}/[T(v_2 - v_3)].$$

Bul an'latpadag'ı Q_{23} eriwdin' salıstırmalı jıllılıg'ı, v_2 ha'm v_3 ler suyıq ha'm qattı fazalardıń salıstırmalı ko'lemleleri, 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 noqatının' 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. 0°C da muz benen suwdın' salıstırmalı ko'lemleleri 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 shama'g'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 almastırıwımız 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' funksiya dep qarasaq, onın' differentsiali ushın to'mendegini jazamız:

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_P dT + \left(\frac{\partial s}{\partial P} \right)_T dP,$$

yamasa

$$\left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_P = \frac{c_p}{T}, \quad \left(\frac{\partial s}{\partial P} \right)_T = - \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P,$$

$$ds = \frac{c_p}{T} dT - \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P dP.$$

Bul qatnastı eki fazanın' ha'r biri ushın jazamız:

$$ds_1 = \frac{c_{1p}}{T} dT - \left(\frac{\partial v_1}{\partial T} \right)_P dP,$$

$$ds_2 = \frac{c_{2p}}{T} dT - \left(\frac{\partial v_2}{\partial T} \right)_P dP.$$

Ten' salmaqlıq iymekliginde (T,P) ha'm (T+dT,P+dP) noqatların alayıq. Bunday jag'dayda dP/dT usı iymektiktin' qıyalıg'ın anıqlıydı. Sonın' menen birge fazalıq o'tiwde ds₁=ds₂ ekenligin esapqa alsaq to'mendegige iye bolamız:

$$(c_{2p} - c_{1p}) (dT/T) = \left[\left(\frac{\partial v_2}{\partial T} \right)_P - \left(\frac{\partial v_1}{\partial T} \right)_P \right] dP,$$

yamasa qısqasha tu'rde

$$\Delta c_p = T \Delta \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P \frac{dP}{dT}. \quad (28-6)$$

Bul an'latpalardag'ı Δc_p menen $\Delta \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$ lar fazalıq o'tiwlerdegi s_R shaması menen $\left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$ shamalarının' sekiriwine ten'. (28-6) an'latpası **Erenfesttin' birinshi qatnası** bolıp tabıladı.

Tap usınday jollar menen Erenfesttin' ekinshi qatnası alınadı. Bul jerde salıstırmalı entropiya s ti temperatura menen salıstırmalı ko'lemnin' funktsiyası dep qaraw kerek. Bul qatnas to'mendegidey tu'rge iye boladı:

$$\Delta c_v = T \Delta \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v \frac{dv}{dT}. \quad (28-7)$$

U'shinshi qatnası alıwda salıstırmalı entropiya s ti v ha'm P shamalarının' funktsiyası dep qaraw kerek. Sonda:

$$\Delta \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = \Delta \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v \frac{dv}{dP}. \quad (28-8)$$

Erenfesttin' keyingi to'rtinshi qatnası salıstırmalı ko'lem v nin' uzliksizliginen ha'm onı P menen T nin' funktsiyası dep qarawdın' na'tiyjesinde alınadı:

$$\Delta \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = - \Delta \left(\frac{\partial v}{\partial P} \right)_T \frac{dP}{dT}. \quad (28-9)$$

(28-7), (28-8) ha'm (28-9) qatnaslarında $\frac{dv}{dT}$, $\frac{dv}{dP}$ ha'm $\frac{dP}{dT}$ tuwındıları ten'salmaqlıqtın' sa'ykes iymeklikleri boyınsha alınadı.

§ 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 iyerisiw ku'shleri ta'sir etedi.*

Qısılg'ıshlıq. Turaqlı temperaturadag'ı ko'lemnin' salıstırmalı o'zgeriwi $\Delta V/V$ menen basımnın' o'zgerisi Δp arasındag'ı χ koeffitsienti **izotermalıq qısılwshılıq koeffitsienti** dep ataladı.

$$\Delta V/V = - \chi \Delta p. \quad (29-1)$$

$$\chi = - \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T. \quad (29-2)$$

İdeal gaz ushın $\left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T = -V/p$ ha'm $\chi = 1/p$. Eksperimentler kishi basımlarda real gazlerdin' qısıwshılıg'ının' ideal gazdin' qısıwshılıg'ınan kem ekenligin, al u'iken basımlarda real gazlerdin' qısıwshılıg'ının' ideal gazlerdin' qısıwshılıg'ınan artıq ekenligin ko'rsetedi.

Suyıqlılarda qısıwshılıq az. Sebebi bul jag'dayda molekular bir birine tug'ız etip jaylasadı. Sonın' ushın suyıqlıqtın' ko'lemin o'zgertiw ushın u'iken ku'sh talap etiledi. Mısalı:

| Suyıqlıq | Qısıwshılıq, 10^{-9} Pa^{-1} |
|-----------|--|
| Suw | 0.47 |
| Benzin | 0.82 |
| Glitserin | 0.22 |
| Atseton | 1.27 |

Bul keste suyıqlılardıń qısılg'ıshlıg'ı gazlerdin' qısılg'ıshlıg'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. Suyıqlılar ha'm real gazler ushın universal hal ten'lemesi joq.

Printsipinde da'l hal ten'lemesi virial hal ten'lemesi tu'rinde ko'rsetiliwi mu'mkin:

$$p V_m = RT + A_1(T)/V_m + A_2(T)/V_m^2 + \dots \quad (29-3)$$

$A_i(T)$ virial koeffitsientler dep ataladı. Bul ten'leme sheksiz ko'p ag'zadan turatug'ın ten'leme bolıp tabıladı. Bul ten'lemenı sheshiw ushın sheksiz ko'p sandag'ı $A_i(T)$ virial koeffitsientlerin biliwdi talap etedi. Bunday ko'z-qaras penen qarag'anda (27-3) tek teoriyalıq a'hmiyetke iye bolıp, a'meliy esaplawlarda u'iken qıyınshılıqlar payda etedi.

Juwıq hal ten'lemeleri arasında Van-der-Vaals ten'lemesi ken' tu'rde belgili.

Van-der-Vaals ten'lemesi. İdeal gaz ten'lemesi bolg'an $pV = \frac{m}{M}RT$ ten'lemesinde 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 molekularların' effektiv ko'lemin mb' arqalı belgileyemiz. Bul ko'lem esapqa aling'anda hal ten'lemesindegi o'zgeriske ushıraytug'ın ko'lem V emes, al onın' bo'limi $V - mb'$ boladı.

Tartısıw ku'shinin' orın alıwı gazge tu'setug'ın qosımsha ishki basımnın' payda bolıwına alıp keledi. Bul qosımsha basımnın' shaması bo'leksheler sanına (kontsentratsiyasına) proporsional bolıwı kerek. O'z gezeginde bul shama m/V^2 salıstırmalı ko'lemge keri proporsional. Qosımsha basım sırtqı basımnın' kishireyiwin a'melge asıradı.

Usı jag'daylardı esapqa alıp **Van-der-Vaals ten'lemesin** jazamız:

$$(p + \frac{m^2 a'}{V^2})(V - mb') = \frac{m}{M} RT. \quad (29-4a)$$

a' ha'm b' ha'r qıylı gazler ushın ha'r qanday ma'niske iye bolatug'ın turaqlılar. Bul shamalar **Van-der-Vaals turaqlıları** dep ataladı.

Ten'lemenin' eki ta'repin de m ge bo'lsek

$$(p + \frac{a'}{v^2})(v - b') = R_0 T \quad (29-4b)$$

ten'lemesin alamız. Bul jerde $v = V/m$ - salıstırmalı ko'lem, $R_0 = R/M$ - salıstırmalı gaz turaqlısı.

Ko'pshilik jag'daylarda $a = a'M^2$ ha'm $b = b'M$ shamaların qollanadı. Bunday jag'dayda $v = m/M$ ekenligin esapqa alıp:

$$(p + \frac{a}{V_m^2})(V - vb) = vRT \quad (29-4v)$$

ten'lemesin alamız. a ha'm b turaqlıları da Van-der-Vaals turaqlıları dep ataladı. Olardı a' ha'm b' turaqlıları menen arjastırmaw kerek. $V_m = V/v$ ekenligi esapqa alıp Van-der-Vaals ten'lemesinin' en' ko'p ushırasatug'ın tu'rin alamız:

$$(p + \frac{a}{V_m^2})(V_m - b) = RT. \quad (29-4g)$$

Virial tu'rde Van-der-Vaals ten'lemesin bılay jazamız:

$$pV_m = RT + \frac{RTb - a}{V_m} + RT \sum_{n=2}^{\infty} \frac{b^n}{V_m^n}. \quad (29-5)$$

İzotermalardı tallaw ushın (29-4g) ten'lemesin basqasha qolaylı etip jazamız. Ten'lemenin' on' ha'm shep ta'replerin V_m^2 qa ko'beytip, qawsırmalardı ashıp iye bolamız:

$$V_m^3 - (b - \frac{RT}{p})V_m^2 + \frac{aV_m}{p} - \frac{ab}{p} = 0. \quad (29-6)$$

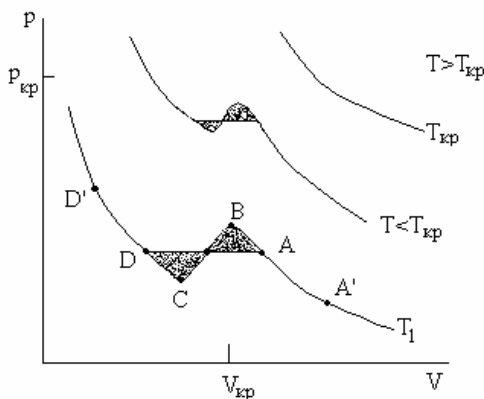
Van-der-Vaals ten'lemesinin' izotremaları. Eger (29-6) nı $T = \text{const}$ sha'rti orınlang'anda sheshetug'ın bolsaq, onda p nın' ha'r qıylı ma'nislerinde V u'sh yamasa bir ma'niske iye bolatug'ınlıg'ın ko'remiz.

Bul ten'lemeni sheshkende alinatug'ın r, V tegisligindegi izotermanın' $p = \text{const}$ tuwrısın bir yamasa u'sh noqatta kesip o'tetug'ınlıg'ın bildiredi.

Sonlıqtan Van-der-Vaals ten'lemesi izotermaları su'wrette ko'rsetilgendey tu'rge iye boladı. T_{kr} shaması $p = \text{const}$ tuwrısın u'sh noqattı kesiwshi monotonlı emes izotermanı bir noqatta kesetug'ın monotonlı izotermalardan ayırıp turadı. T_{kr} izoterması eksperimentte aling'an kritikalıq temperaturadag'ı izoter-

mag'a sa'ykes keledi. $T < T_{kr}$ temperaturalaridagi izotermalar eksperimentte aling'an izotermalardan basqasha tu'rge iye. İzotermadagi A'A ha'm DD' bo'limler gaz ta'rizli ha'm suyuq hallarg'a sa'ykes keledi. AB ha'm CD izotermalarinin' qanday halg'a sa'ykes keletug'inlig'in aniqlaw kerek boladi. Sebebi usi eki ushastkada da $\partial r/\partial V < 0$ ha'm usi bo'limlerdin' payda bolıwı qadag'an etilmeydi. Eksperimentte bolsa izoterma eki fazalı oblast bolg'an $T_1 A' A F D D'$ sızıqları boyınsha ju'redi (2-31 su'wret).

AB ha'm CD ushastkalari asa salqınlatılğ'an puw ha'm asa qızdırılğ'an suyuqlıq oblastına sa'ykes keledi. Asa salqınlatılğ'an puw halı - bul sonday hal, bul halda o'zinin' parametrleri boyınsha sistema suyuq halda bolıwı kerek, biraq qa'siyetleri boyınsha sistema gaz halında qaladı. Al asa qızdırılğ'an suyuqlıq - zat bul halda parametrleri boyınsha gaz halına o'tiwi kerek, biraq qa'siyetleri boyınsha suyuqlıq bolıp qalıwın dawam etedi.



2-31 su'wret. Van-der-Vaals izotermalari

Asa salqınlatılğ'an puw ha'm asa qızdırılğ'an suyuqlıq halları absolyut ornıqlı hallar bolıp tabılmaydı. Ha'lsiz sırtqı ta'sirdin' na'tiyjesinde sistema jaqın turg'an turaqlı halg'a o'tedi. Bunday hal metastabil hal dep ataladı.

Kritikalıq parametrlar. $T > T_{kr}$ temperaturalarında (29-6) tek bir haqıyqıy tu'birge, al $T < T_{kr}$ bolg'anda r nı bazı bir ma'nislerinde u'sh haqıyqıy tu'birge iye boladı. Temperaturanın' joqarılawı menen usı u'sh tu'birdin' ma'nisleri bir birine jaqınlaydı ha'm kritikalıq temperaturada bir ma'niske ten'lesedi. Demek kritikalıq halda (29-6) to'mendegidey tu'rge iye boladı:

$$(V - V_{kr})^3 = V^3 - 3 V_{kr} V^2 + 3 V_{kr}^2 V - V_{kr}^3 = 0. \quad (29-7)$$

(26-6) ha'm (26-7) ten'lemelerin salıstırıw arqalı iye bolamız:

$$V_{kr} = b + R T_{kr} / p_{kr}, \quad 3V_{kr}^2 = a/p_{kr}, \quad 3V_{kr}^3 = ab/p_{kr}. \quad (29-8)$$

(28-8) u'sh belgisizli (V_{kr}, p_{kr}, T_{kr}) u'sh ten'lemeler sisteması bolıp tabıladı. Sistemanın' sheshimi:

$$V_{kr} = 3b; \quad p_{kr} = \frac{a}{27b^2}; \quad T_{kr} = \frac{8a}{27rb}. \quad (29-9a)$$

$RT_{kr}/(p_{kr} V_{kr}) = 8/3$ shaması kritikalıq koeffitsient dep ataladı. Haqıyqatında ha'r qıylı gazler ushın kristikalıq koeffitsientler 8/3 ten o'zgeshe ma'niske iye boladı ha'm olardin' barlıg'ı da 8/3 ten u'lken ma'niske iye boladı.

Usılay etip kritikalıq hal parametrleri Van-der-Vaals ten'lemesindegi a ha'm b turaqlıları menen 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'ın bolsa qanaatlandırıladı.

Bul ten'lemelerdi a, b ha'm r ge qarata sheshsek:

$$a = 3p_{kp} V_{kp}^2, \quad b = V_{kp} / 3, \quad R = 8p_{kp} V_{kp} / (3T_{kp}). \quad (29-9b)$$

Bul ten'lemeler ha'r bir individual gaz 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 kritikalıq 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 kritikalıq hal a'tirapında molekularlardin' komplekslerge birigiwine sa'ykes keledi. Kritikalıq haldan alısta Van-der-Vaals ten'lemesinde gaz turaqlısı sıpatında mollik gaz turaqlısın alıw mu'mkin.

Molekulaları o'z-ara ta'sirlesiw orın alatug'ın ha'r bir gaz 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 molekularlar arasındag'ı o'z-ara ta'sirlesiw sol molekularlardin' o'lishemlerinen a'dewir u'lken bolg'an aralıqlarg'a tarqalatug'ınlıg'ına sa'ykes keledi. Biraq eksperimentler molekulanın' diametrinen bes ese ko'p qashıqlıqlarda tartılıs ku'shlerinin' derlik sezilmeytug'ınlıg'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. İntegrallıq effekt. Van-der-Vaals gazindegi Djoul-Tomson effekti. Gazlerdi suyıltıw.

Djoul-Tomson effektinin' fizikalıq ma'nisi. Ken'eygende gaz jumis 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 jumis islenbese temperatura o'zgermegen bolar edi.

Real gazde ishki energiya o'zine potentsial energiyani da alatug'in bolg'anliqtan jag'day basqasha boladi. Molekulalar barliq waqitta da qozg'alista bolg'anliqtan bo'leksheler arasindagi ortasha qashqliq ha'm ortasha potentsial energiya haqqida aytiwg'a boladi. Ortasha qashqliq tıg'ızlıqqa baylanisli. Tıg'ızlıq qanshama ko'p bolsa ortasha qashqliq sonshama az boladi. Ortasha qashqliq temperaturag'a da baylanisli: temperatura qanshama joqari bolsa ortasha qashqliq sonshama kemeyedi. Temperatura joqari-lag'anda molekulalardin kinetikalıq energiyası o'sedi. Sonliqtan soqlıg'ısıw protsessinde olar bir birine jaqınıraqlı keledi ha'm biraz waqıtta bir birine jaqın aralıqlarda jaylasadı. Usınday jag'daylar orın alg'anda

jıllılıq almasıwsız real gaz ken'eygende onın temperaturasınıń o'zgeretug'inlig'ı tu'sinikli boladı.

Eger gazdin' tıg'ızlıg'ı ha'm temperaturası jetkilikli da'rejede u'lken bolsa molekulalar arasındagi 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 gerek. Eger berilgen basım menen temperaturada ortasha qashqliq 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 adiabatalıq 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 gerek. 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. Sonliqtan energiyanın saqlanıw nızamı tiykarında alamız:

$$\Delta U_1 + p_1 \Delta V_1 = \Delta U_2 + p_2 \Delta V_2. \quad (30-1)$$

(30-1) din' eki ta'repinde turg'an ag'za da qarap atırg'an mug'dardag'ı gazdin' entalpiyası bolıp tabıladı. Sonliqtan (30-1) ten'ligi Djoul-Tomsonnıń effektinin' turaqlı entalpiyada ju'retug'inlig'ın bildiredi. Bul ten'leme gazdin' bazı bir massası ushın to'mendegidey tu'rge iye:

$$H = U + pV = \text{const}. \quad (30-2)$$

G'a'rezsiz o'zgeriwshiler sıpatında T menen p nı qabıl etip (30-2) den alamız:

$$dN = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p dT + \left(\frac{\partial H}{\partial p} \right)_T dp = 0. \quad (30-3)$$

Entalpiyanın' differentsialı to'mendegi tu'rge iye boladı:

$$dH = C_p dT + \left[V + \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \right] dp. \quad (30-4)$$

Bul an'latpanı esapqa alsaq

$$\left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p = C_p, \quad \left(\frac{\partial H}{\partial p} \right)_T = V - T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \quad (30-5)$$

ekenligi alamız ha'm sog'an sa'ykes (28-3) ten alamız

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_H = \frac{1}{C_p} \left[T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p - V\right]. \quad (30-6)$$

Bul formula Djoul-Tomsonnin' differentsial effektin ta'ripleydi.

İdeal gaz ushın $\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p = \frac{R}{p} = \frac{V}{T}$ ha'm, sog'an sa'ykes, $\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_H = 0$, yag'nıy Djoul-Tomson effekti bolmaydı.

İntegrallıq effekt. Djoul-Tomson protsessi kvazistatikalıq Djoul-Tomson effektleri izbe-izligi tu'rinde beriliwi mu'mkin. Ha'r bir kvazistatikalıq effektte basım dr shamasına o'zgeredi. Usınday protsessler izbe-izligi ushın

$$T_2 - T_1 = \int_{p_1}^{p_2} \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_H dp = \int_{p_1}^{p_2} \left[T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p - V\right] dp. \quad (30-7)$$

(30-7) integral Djoul-Tomson effektinin' formulası bolıp tabıladi.

Van-der-Vaals gazindegi Djoul-Tomson effekti. Van-der-Vaals ten'lemesi u'shinshi da'rejeli ten'leme bolg'anlıqtan ulıwma jag'dayda $\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p$ tuwindısın esaplaw quramalı matematikalıq protsedura bolıp tabıladi. Sonlıqtan (30-6) dag'ı a ha'm b larg'a qarata sıziqlı bolg'an ag'zalırdı esapqa alalatuğın jetkilikli da'rejede siyrekletilgen gazdı qaraw menen sheklenemiz.

Van-der-Vaals ten'lemesinin' viriallıq tu'rin jazamız:

$$V = \frac{RT}{p} + \frac{1}{pV} (RTb - a) = \frac{RT}{p} + \frac{1}{RT} (RTb - a) = \frac{RT}{p} + b - \frac{a}{RT}. \quad (30-8)$$

Bul ten'lemeden

$$\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p = \frac{R}{p} + \frac{a}{RT^2} \quad (30-9)$$

ekenligi kelip shıg'adı. Demek differentsial effekt ushın ten'leme to'mendegidey tu'rge iye boladı:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_H = \frac{1}{C_p} \left[\frac{TR}{p} + \frac{Ta}{RT^2} - \frac{RT}{p} - b + \frac{a}{RT}\right] = \frac{1}{C_p} \left[\frac{2a}{RT} - b\right]. \quad (30-10)$$

Bul formuladan jetkilikli to'men temperaturada $\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_H > 0$, yag'nıy gaz ken'eygende salqınlaydı.

Al jetkilikli joqarı temperaturada $\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_H < 0$, yag'nıy gaz ken'eygende qızadı. Gazdin' usınday qa'siyeti

Djoul-Tomson effektinin' fizikalıq ma'nisine tolıq sa'ykes keledi. $\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_H = 0$ ge sa'ykes keliwshi temperatura (usı temperaturada Djoul-Tomson effektinin' belgisi o'zgeredi) *inversiya temperaturası* dep ataladı:

$$T_{inv} = 2a/(Rb). \quad (30-11)$$

Djoul-Tomsonnin' integral effektin esaplaw ushın entalpiyanın' turaqlılıq sha'rti bolg'an $H = U + pV = \text{const}$ an'latpasınan paydalanamız. Meyli ıdıtın' o'tkeline o'tpesten burın gaz V ko'lemine, al o'tkennen keyin V' ko'lemine iye bolg'an bolsın. Gazdin' da'slepki tıg'ızlıg'ına shek qoymaymız, al keyingi halda jetkilikli da'rejede siyrekletilgen dep esaplaymız. Bunday jag'dayda entalpiyanın' turaqlılıq sha'rtinen

$$C_V T - a/T + pV = C_V T' + p'V' = C_V T' + RT'. \quad (30-12)$$

SHtrixı bar shamalar keyingi halg'a, al shtrixı joqları da'slepki halg'a tiyisli. Van-der-Vaals ten'lemesinen

$$pV = RTV/(V-b) - a/V = RT + bRT/(V-b) - a/b \quad (30-13)$$

ekenligi kelip shıg'adı. Sonlıqtan (28-12) den alamız:

$$T' - T = \Delta T = \frac{1}{C_p} [(RTb/(V-b) - 2a/V)]. \quad (30-14)$$

$C_p = C_V + R$ ekenligi belgili. Bul formula Djoul-Tomsonnin' integrallıq effektinin' formulası bolıp tabıladı. Effektin' belgisi $\Delta T = 0$ noqatında o'zgeredi, yag'nıy

$$(RTb/(V-b) - 2a/V = 0, \quad (30-15)$$

$$T = \frac{2a}{Rb} (1 - b/V).$$

Gazlerdi suylıw. Eger gaz kritikalıq temperaturadan to'men temperaturalarda tursa onı qısıw arqalı suyuq halg'a o'tkeriw mu'mkin. Biraq ko'pshilik gazler ushın kritikalıq temperatura ju'da' to'men. Misallar keltiremiz:

geliy 5.3 K;
vodorod 33 K;
azot 126.1 K
kislorod 154.4 K.

Gazlerdi normal atmosferalıq basımlarda alıw ha'm saqlaw texnikalıq jaqtan an'satqa tu'sedi. Bunday jag'daylarda atmosferalıq basımdag'ı suyuq halg'a o'tiw temperaturaları:

geliy 4.4 K;
vodorod 20.5 K;
azot 77.4 K
kislorod 90 K.

Gazdi suyultıw ushın ko'pshilik jag'daydarda to'mendegi usıldı qollanadı:

Komnata temperaturasında gaz izotermalıq jag'dayda bir neshe ju'zlegen atmosfera basımg'a shekem qısıladı (ag'ıp turg'an suwdı qollanıw jolı menen qısılıp atırg'an gazdin' temperaturası turaqlı etip uslap turıladı). Bunnan keyin adiabatlıq jol menen yamasa Djoul-Tomson protsessinde gaz ken'eytilei. Eki jag'dayda da gaz salqınlaydı. Bunnan keyin bul salqınlatıl'g'an gaz joqarı basımg'a shekem qısılg'an gazdin' ekinshi portsiyasın salqınlatıw ushın 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.

Haqıyqıy ha'reket etiwshi mashinalarda salqınlatıl'g'an gazdin' portsiyasının' bir bo'limi qısılıw stadiyasına qaytarıladı. Bunnan keyin Djoul-Tomson protsessinde yamasa adiabatlıq ken'eyiw jolı menen salqınlatıladı. Usı protsessler ju'retug'ın du'zilis *jıllıq almasırwshı* dep ataladı. Adiabatlıq ken'eyiw saldarman gaz salqınlaytug'ın du'zilisti *detander* dep ataydı.

Zatlardın' 0 K qasındag'ı qa'siyetleri. Jıllıq sıyımlılıg'ı C_V on' ma'niske iye funksiya bolg'anlıqtan ishki energiya U temperaturanın' monotonlı funksiyası bolıp tabıladı. Temperaturanın' to'menlewi menen ishki energiya kemeyedi ha'm 0 K de o'zinin' en' minimallıq ma'nisine jetedi. Sonlıqtan **0 K de sistemanın' barlıq bo'limlerinin' ishki energiyası o'zinin' minimum ma'nisine jetedi, yag'my sistemanın' qa'legen bo'limi minimal energiyag'a iye tiykarg'ı halında turadı.**

$\delta Q = TdS$ an'latpasınan temperatura to'menlegende entropiyanın' kemeyetug'inlig'ı kelip shıg'adı. O'zinin' kemeyiw barısında entropiya belgili bir ma'niske umtılama degen soraw tuwıladı. Bul sorawg'a *Nerns printsipi* juwap beredi. Bul printsip termodinamikanın' birinshi ha'm ekinshi baslamalarınan keltirilip shıg'arılıwı mu'mkin bolmag'anlıqtan *termodinamikanın' u'shinshi baslaması* dep te ataladı. Entropiya 0 K temperaturag'a jaqınlasqanda entropiya anıq bir shekke umtılatug'ın bolg'anlıqtan bul printsip 0 K de sistemanın' bir ten' salmaqlıq haldan ekinshi o'tiwi entropiyanın' o'zgerisiz a'melge asadı dep tastıyıqlaydı. Bul tastıyıqlawdan

Entropiya 0 K temperaturada sistemanı ta'ripleytug'ın parametrlerdin' ma'nislerine g'a'rezli emes.

dep juwmaq shıg'aramız.

Entropiyanın' 0 K temperaturadag'ı ma'nisi anıqlanbag'an. Sonlıqtan bul ma'nisti 0 ge ten' dep qabıl etiw qolaylı boladı.

Usınday etip anıqlang'an entropiya *absolyut entropiya* dep ataladı. Onın' sistemanın' qa'legen halındag'ı ma'nisi

$$S = \int_{T=0}^T \frac{\delta Q}{T}$$

integralın esaplaw arqalı anıqlanadı.

Nernst printsipinen bir qatar a'hmiyetli juwmaqlar shıg'arılıwı mu'mkin. En' da'slep bul printsipten

0 K temperaturag'a shekli sandag'ı operatsiyalar ja'rdeminde jetiw mu'mkin emes

ekenligi kelip shıg'adı.

Real (haqiqiy) gazde tartılıs ku'shleri menen iyterilis ku'shleri arasında turaqlı qarsı turıw orın aladı. Eger basım bazı bir shamag'a o'zgergende molekulalar arasındag'ı o'z-ara ta'sirlesiw energiyası kemeyetug'ın bolsa gaz qızadı, al sol energiya u'lkeygen jag'dayda gaz salqınlaydı. Bul Djoul-Tomson effektinin' belgisin anıqlaydı. Effekt basımın' ha'r qıylı ma'nislerinde ha'r qıylı belgilerge iye bolıwı mu'mkin.

0 K ge jaqınlag'anda sistemanın' barlıq bo'limlerinin' ishki energiyası o'zinin' en' kishi ma'nisine, entropiya - anıq ma'niske iye bolg'an shekke umtıladı. Sistemanı bir ten'salmaqlıq haldan ekinshi ten'salmaqlıq halg'a o'tkizetug'ın protsessler 0 K de entropiyanın' o'zgeriwisiz a'melge asadı.

0 K temperaturag'a shekli sanlag'ı operatsiyalar ja'rdeminde jetiw mu'mkin emes (termodinamikanın' u'shinshi baslaması).

Djoul-Tomsonnıń differentzial effektinin' belgisi ha'r qıylı basımlarda ha'm temperaturalarda ha'r qıylı boladı. Djoul-Tomsonnıń integrallıq effektinin' belgisi de arametrlerdin' o'zgeriw aymag'ında ha'r qıylı bolıwı mu'mkin.

§ 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. İymeygen bet astındag'ı basım. Kapıllıy qubılıslar.

Erkin betlik energiya. Suyıq hal molekulalar arasındag'ı o'z-ara tartısıwg'a sa'ykes keliwshi potentsial energiyanın' absolyut ma'nisi kinetikalıq energiyadan ko'p bolg'an jag'dayda payda boladı. Suyıqlıqtag'ı molekulalar arasındag'ı tartılıs ku'shleri molekulanı suyıqlıq iyelep turg'an ko'lemde uslap turıwdı ta'miyinleydi. Solay etip suyıqlıqta onın' ko'lemine 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 aling'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 jumstın' ma'nisi belgilengen.

Bettin' bir tekiliginen erkin betlik energiyanın' bettin' maydanına proporsional ekenligi kelip shıg'adı:

$$F = \sigma S. \quad (31-2)$$

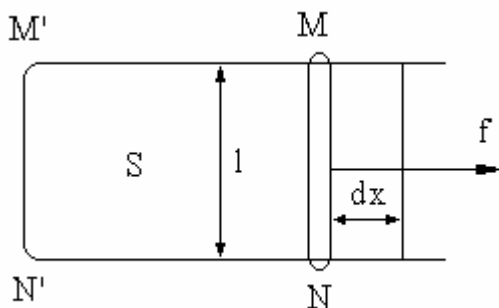
Bul formuladag'ı σ betlik erkin energiyanın' salıstırmalı tıg'ızlıg'ı.

Bet kerimi. Mexanikadag'ı jag'daydag'ıday sistema en' kem potentsial energiyag'a jetiwge umtıladı. Usınday hal en' ornıqlı hal bolıp tabıladı. Termodinamikada sistema izotermalıq sharayatlarda en' az erkin energiyası bar halg'a jetiwge umtıladı. Sonlıqtan

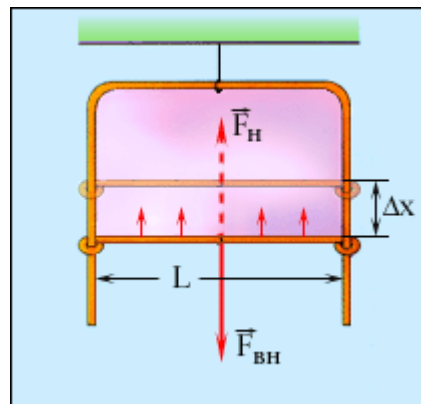
suyıqlıqtın' beti qısqarıwg'a umtıladı. Usıg'an baylanıslı suyıqlıqlın' beti boyınsha bet kerimi dep atalatug'ın ku'shler ta'sir etedi.

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 sımdı MM' ha'm NN' bag'ıtında tartadı ha'm plenka maydanı kemeyedi. Plenkanın' maydanın u'lkeytiw ushın sım'g'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



2-32 su'wret. Bet kerimin esaplaw ushın sabın plenkasın paydalanıw.



Sımnan sog'ılg'an ramkanın' qozg'alıwshı bo'liminin' sırtqı F_{BH} ha'm bet kerimi ku'shleri F_H ten'lesken momentindegi awhalı.

$$dF = 2\sigma dS = -f dx = f dS / l. \quad (31-3)$$

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 birliğı $1 \text{ Dj/m}^2 = 1 \text{ N/m}$. 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. Mısalı

efirde $1.71 \cdot 10^{-2}$;
atsetonda $2.33 \cdot 10^{-2}$;
benzolda $2.89 \cdot 10^{-2}$;
glitserinde $6.57 \cdot 10^{-2}$;
suwda $7.27 \cdot 10^{-2}$;
sınapta 0.465.

Bul jerde o'lshe birlik N/m lerde berilgen.

Bet keriminin' payda bolıw mexanizmleri. σ menen ta'riplenetug'ın erkin energiyaniq salıstırmalı tıg'ızlıg'ı suıqlıqtın' u'ken emes betlik qatlamında lokallasqan ha'm, sonlıqtan, juqa betlik qatlamda ta'sir etedi. Sonlıqtan da juqa betlik qatlam suıqlıqtı qorshap turatug'ın rezina plenkaday bolıp xızmet etedi. Rezina qabıqtan parqı, suıqlıq bettin' formasının' o'zgeriwine g'a'rezsiz barlıq waqıtta da birdey bet kerimine iye.

Bet kerimi suıqlıqtın' beti tiyip turg'an zattın' qa'siyetlerine baylanıslı. Bul a'sirese σ nı erkin energiya tıg'ızlıg'ı dep interpretatsiyalawda anıq ko'rinedi. Sebebi suıqlıq tiyip turg'an zattın' molekulları da usı suıqlıqtın' betlik qatlamında g'ı molekulları menen ta'sir etisedi ha'm molekullardı suıqlıqtın' ishine tartıwshı ku'shlerdi o'zgetedi. Bul bet kerimi σ nın' o'zgeretug'ınlg'ın an'latadı. Sonlıqtan bet kerimi haqqında ga'p etilgende tek suıqlıqtın' 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, mısalı 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. Mısalı 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. Mısalı o'jire temperaturalarında sınapın' erkin betindegi $\sigma = 0.465$ N/m, al suw menen tiyisiw betinde 0.427 N/m, spirt penen 0.399 N/m.

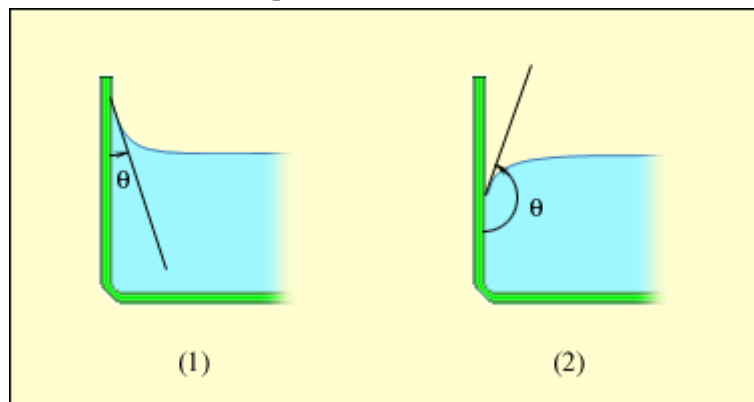
Suyıqlıq-qattı dene shegarasındag'ı ten' salmaqıq sha'rti. Eger suıqlıq ıdısqı quyılğ'an bolsa, onda suıqlıqtın' ıdıstın' vertikal diywalı menen tiyisiwi eki tu'rli boladı. Eger suıqlıq diywalg'a jug'atug'ın bolsa a) su'wrettegi awhal ju'zege keledi. Juqpaytug'ın jag'dayda b) awhal orın aladı. Tap sol sıyaqlı suıqlıqta 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, mısalı, geypara nasekomalar suwdın' bet keriminen suw betinde juwırıp ju're aladı.

Mayısqa bet astındag'ı basım. Bunday basımdı esaplaw ushın sabın qo'bigin qaraymız. Atmosferalıq basımdı ko'bik ishindegi r' basımı ha'm 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' σdS erkin energiyasına aylanadı, dS sabın ko'biginin' ishki ha'm sırtqı betlerinin' o'simlerinin' qosındısı. YAg'nıy $dS = 2d(4\pi r^2) = 298\pi r dr$. Energiyanın' saqlanıw nızamı boyınsha

$$4\pi r^2 P' dr = 2\sigma 98\pi r dr. \quad (31-4)$$

Bunnan

$$p' = 292\sigma/r. \quad (31-5)$$



2-33 su'wret. Jug'atug'ın (a) ha'm juqpaytug'ın (b) suıqlıqlar jag'dayındag'ı suıqlıq penen ıdısqı diywalı arasındag'ı ko'rinisler.

Bul basım sabın ko'biginin' iymeygen eki beti ta'repinen payda etiledi. Bir bet eki ese kem basım payda etedi:

$$p = p' / 2 = 2\sigma / r. \quad (31-5a)$$

Ulıwma jag' dayda iymeklik eki iymeklik radiusı ja'rdeminde anıqlanadı. Sonlıqtan

$$p = \sigma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (31-6)$$

Bul formula **Laplas formulası** dep ataladı. $r_1 = r_2$ bolg'anda bul formula (31-5) ke o'tedi.

Kapillyar qubılıslar. ıdıtın' diywalı menen ta'sir etiskende bet kerimi suyıqlıqtın' qa'ddin ko'teriwge (a su'wret) yamasa to'menleetiwge umtıladı (b su'wret).

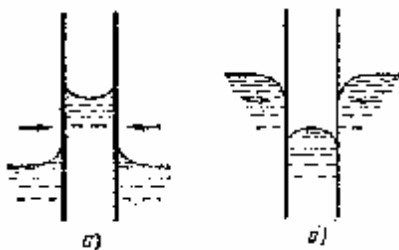
Eger ıdıtın' diywalına suyıqlıq jug'atug'ın bolsa suyıqlıq ko'teriledi. Juqpaytug'ın jag' dayda suyıqlıqtın' qa'ddi to'men tu'sedi. (31-5) formulag'a sa'ykes

$$\rho gh = 2\sigma / R = 2\sigma \cos\theta / r. \quad (31-7)$$

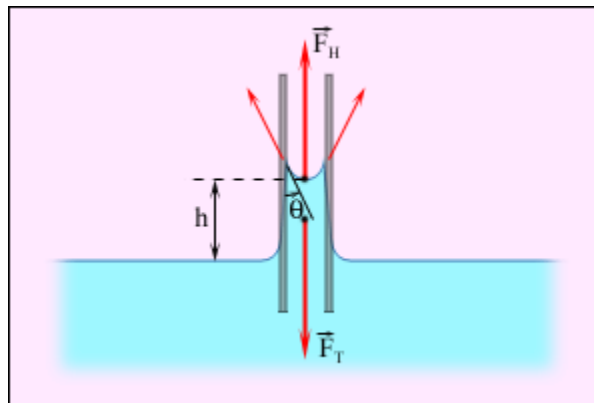
Bul formulada ρ - suyıqlıqtın' tıg'ızlıg'ı, R - suyıqlıq betinin' iymeklik radiusı, r - trubkanın' radiusı ($r = R \cos\theta$). Demek

$$h = 2\sigma \cos\theta / (\rho g r). \quad (31-8)$$

Usınday jollar menen suyıqlıqtın' qa'ddi to'tmenlegen jag' daydag'ı teren'lik te esaplanadı. (31-8)-formuladan biyikliktin' naydın' radiusına keri proporsional 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.



2-34 su'wret. Kapillyarlıq qubılıslar.



Jug'atug'ın suyıqlıqtın' kapillyar tu'tikshede ko'teriliwin esaplaw ushin arnalg'an su'wret.

§ 2-32. Suyıqlıqlardıń puwlanıwı ha'm qaynawı

Dinamikalıq ten' salmaqlıq. Puw-suyıqlıq sisteması. Suyıqlıqtıń iymeygen beti qasındag'ı toying'an puw basımı. Qaynaw. Asa qızdırılǵ'an suyıqlıq. Ko'bik kameralar. Asa suwıtılǵ'an puw. Vilson kamerası.

Puwlaniw. Joqarıda aytilg'anınday molekullardıń bir biri menen ta'sirlesiwiniń sebebinen suıqlıqtıń betinde bettin' payda bolatug'ınlig'ı talqılandı. Bul bet molekullardıń suıqlıqtı taslap ketiwine jol qoymaydı. Biraq jıllıq qozg'alıslarınıń saldarınan molekullardıń ayırım bo'legi suıqlıqtı taslap ketkendeı jetkilikli tezlikke iye boladı. Bul qubılıs **puwlaniw** dep ataladı. Puwlaniw qa'legen temperatura baqlanadı, biraq onıń intensivligi temperaturanıń ko'teriliwi menen joqarılaydı.

Dinamikalıq ten' salmaqlıq. Puw-suyıqlıq sisteması. Eger suıqlıqtı taslap ketken molekullar suıqlıqtan u'iken aralıqlarǵa qashıqlassa, aqır-ayag'ında barlıq suıqlıq puwlanıp ketedi. Eger sol molekullar u'iken qashıqlarǵa ketpese. Al bir ıdıtın' ishinde saqlanatug'ın bolsa, protsess basqasha rawajlanadı. Suyıqlıqtı taslap ketken molekullar puwdı payda etedi. Puw molekulları suıqlıqqa jaqınlag'anda tartısıw ku'shleri ta'sirinde suıqlıqqa qosılıp puwlaniw kemeyedi.

Puwdıń tıg'ızlıǵ'ı artqanda belgili bir waqt ishinde suıqlıqtı taslap ketken molekullar sanı sonday waqt ishinde suıqlıqqa qayıp kelgen molekullar sanına ten' boladı. Bunday haldı dinamikalıq ten' salmaqlıq hal dep ataladı. Dinamikalıq ten' salmaqlıq haldag'ı puwdı toying'an puw dep ataymız.

Puw gaz emes. Gaz bul berilgen temperatura menen basımdıǵ'ı zattın' agregat halı. Puw zattın' agregat halı bolıp tabılamaydı. Sebebi berilgen temperatura menen basımdı agregat hal suıqlıq bolıp tabıladı. Usıg'an baylanış puwdıń 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. Toyınıwǵa jaqınlasqan puwda bolsa (a'sirese toying'an puwda) basım ko'lemge sezilerlikteı baylanış emes, al toying'an puwda bolsa basım ko'lemge baylanış emes. Turpayı juwıqlawda gaz nızamların toyınbag'an puwǵa qollanıwǵa boladı.

Qaynaw. Suyıqlıqtı qızdırǵ'anda toying'an puwdıń basımı sırtqı basımǵa ten' bolǵ'anda suıqlıq penen toying'an puw arasında ten' salmaqlıq ornaydı. Suyıqlıqqa qosımsha jıllıq berilse sa'ykes mas-sag'a iye bolǵ'an suıqlıqtıń puwǵa aylanıwı orın aladı. Usınday jag'dayda suıqlıqtıń intensivli tu'rde puwǵa aylanıwı suıqlıqtıń barlıq ko'lemi boyınsha a'melge asadı. Bul protsess qaynaw dep ataladı.

Toying'an puwdıń basımı sırtqı basımǵa ten' bolǵ'an temperatura qaynaw temperaturası dep ataladı. Basım u'keyse qaynaw temperaturası ko'teriledi, basım kemeyse qaynaw temperaturası to'menleydi.

Asa qızdırılǵ'an suıqlıq. Endi asa qızdırılǵ'an suıqlıqtıń payda bolıwın tu'sindiriwge boladı. Eger suıqlıqtıń quramında basqa qosımtalar ha'm ko'biksheler bolmasa, qaynaw temperaturasına jetkende suıqlıqta ko'biksheler payda bolıwǵa umtılw orın aladı.

Usınday ko'bikshe suıqlıqtıń ishinde payda bolǵ'anlıqtan ha'm ko'bikshe ishindegi puw suıqlıqtıń tegis betine salıstırǵ'anda (tegis beti ushın) toying'an bolsa da suıqlıqtıń iymeygen betine salıstırǵ'anda toying'an bolmay qaladı. Sonlıqtan ko'bikshe tez arada suıqlıqqa kondensatsıyalanadı ha'm ko'bikshe jog'aladı.

Ko'biksheli kameralar. Eger asa qızdırılǵ'an suıqlıq arqalı zaryadlang'an bo'lekshe ushıp o'tetug'ın bolsa, bul bo'lekshe o'z jolında suıqlıq molekulların yamasa atomların ionlastıradı. Na'tiyjede ushıwshı bo'lekshe molekula yamasa atomǵa o'z energiyasınıń bir bo'legin beredi ha'm aqibetinde suıqlıqtıń qaynawın, yag'nıy ko'bikshelerdin' payda bolıwın boldıradı. Basqa so'z benen aytqanda asa qızdırılǵ'an suıqlıq zaryadlı bo'lekshenin' traektoriyası boyınsha qaynaydı ha'm

ko'bikshelerden turatug'ın 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 etisiwin 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 suwtilitg'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 suwtilitg'an puw dep atalıwshı metastabil hal ju'zege keledi.

Toying'an puw salqınlatılğ'anda suyıqlıqtın' mayda tamshıları payda boladı. Biraq bul tamshılar ko'p waqıt jasay almaydı. Sebebi sol tamshılar payda bolğ'an toying'an puw o'z gezeginde tamshının' iymeygen beti ushın toyınbag'an puw bolıp tabıladı. Sonlıqtan tamshılar suyıqlıqları tez arada puwlanadı ha'm tamshılar jog'aladı.

Vilson kamerası. Asa salqınlatılğ'an puwda uship baratırğ'an zaryadlang'an bo'lekshe o'zinin' jolında puw molekulların 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 zatların' fizikalıq jaqtan bir tekli (yag'my gomogen) aralaspasına aytadı.

Fizikalıq bir teklik (gomogenlik) molekulların' ten'dey aralasıwı menen a'melge asırıladı. Usınday qa'sietleri boyınsha eritpeler mexanikalıq aralaspalardan ayrılardı. Mexanikalıq aralaspada zattın' makroskopiyalıq bo'leksheleri (molekulları emes) aralasqan. Eger eritpede bir zattın' mug'darı ekinshi zattın' mug'darınan ko'p bolsa, ko'p bolğ'an zat **eritiwshi (eritkish)**, al basqası **erigen zat** dep ataladı.

Eriytug'ın zattın' eritkishte eriw protsessi a'dette **jıllıqtın' bo'linip shıg'arılıwı** yamasa **jıllıqtın' 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 , suyuq) | + 74.5 kDj/mol. |

Ulıwma jag'dayda qattı zatlar suyuqlıqlarda 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.İ.Mendeleev eritpenin' ko'leminin' eritkish penen erigen zattın' ko'lemine ten' bolmaytug'ınlıg'ın baqladı. Eriw protsessi jıllılıqtın' jutılıwı yamasa temperaturanın' joqarılawı menen a'melge asadı. Mendeleev eritkish penen erigen zattın' belgili bir salmaq qatnaslarına sa'ykes keletug'ın ayırıqsha noqatlardın' bar bolatug'ınlıg'ın anıqladı. Usılardın' barlıg'ı da eritkish penen erigen zat molekularının' 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 efektlerdin' 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 molekularına sa'ykes keletug'ın asa ha'lsiz eritpelerdi qarastıramız. Bunday jag'dayda erigen zat molekuları arasındag'ı ta'sirlesiw ha'lsiz boladı ha'm bunday ko'z-qarasta gaz molekularına usaydı. Biraq usının' menen birge erigen zat molekuları menen eritkish molekuları arasında u'ziksiz soqlıg'ısıw orın alatug'ın bolg'anlıqtan erigen zat molekuları qıyınshılıq penen qozg'aladı ha'm usı arqalı gaz molekularınan parqlanadı.

Osmoslıq basımın' payda bolıw mexanizmi. Meyli bazı bir zattın' eritpesi ha'm taza eritkish yarım o'tkiziwshi diywal menen ajratılğ'an bolsın. Diywal erigen zattın' molekuların 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 aling'an yarım o'tkizgish diywal qol-lang'an qolaylı. Bunday plenklar qatarına $[\text{Cu}_2\text{Fe}(\text{CN})_6]$ birikpesi kiredi ha'm olar suw molekuların o'tkeredi, al ko'plegen eritilgen zatlardı (mısalı qanttı) o'tkermeydi.

Eritpe taza eritkishten joqarıda aytlıg'anday yarım o'tkizgish diywal arqalı ajratılğ'an bolsa, bul diywal arqalı eritkish molekuları 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 molekuları o'z-ara o'tkel araqalı erkin ta'sir etisedi. Ten' salmaqlıq halda o'tkelge eki ta'repten eritkish ta'repinen tu'siriletug'ın basım birdey bolıwı kerek. tu'siriledi. Demek o'tkeldin' bir ta'repinen tu'setug'ın basım ekinshi ta'repten tu'setug'ın basımg'a ten' bolmay shıg'adı. Na'tiyjede taza eritkishtin' qa'ddi eritpenin' qa'ddinen to'men boladı. Eger da'slep eki ta'reptegi suyuqlıqtın' qa'ddi ten'dey bolg'an bolsa, eritkishtin' eritpe ta'repine o'tiwinin' saldarınan eritpenin' qa'ddi ko'teriledi. Yarım o'tkizgish o'tkel arqalı eritkishtin' o'tiwi osmos dep ataladı.

Taza yarım o'tkizgish diywal menen ayrılıp qoyılğ'an eritkish ha'm eritpe arasındag'ı payda bolg'an basımlar ayırması osmoslıq basım dep ataladı.

Osmoslıq basım nızamları. Suyıq eritpelerdegi erigen zattın' molekuların siyrekletilgen gaz molekuları sıpatında qarawg'a boladı. Olardın' kinetikalıq energiyası tek temperaturag'a g'a'rezli boladı. Osmoslıq basım r siyrekletilgen gazdin' basımına ten' ha'm ideal gazler ushın to'mendegidey formula ja'rdeminde esaplanadı:

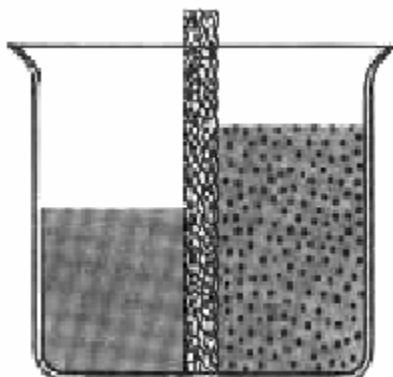
$$p = \frac{nkT}{V} = \frac{vRT}{V}. \quad (33-1)$$

V ko'lemindegi erigen zat molekularının' sanı n arqalı belgilengen. v - molekularıdın' moller sanı. (33-1) Vant-Goff nızamın an'g'artadı.

Ha'lsiz eritpenin' osmoslıq basımı eritkish penen erigen zattın' ta'biyatına g'a'rezli emes, al tek g'ana erigen zattın' mollik kontsentratsiyasına baylanıslı.

Vant-Goff formulasidan to'mendegidey juvmaqlar kelip shig'adi:

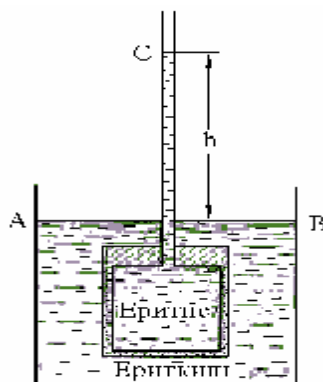
1. Turaqli temperaturada erigen ha'r bir zattin' osmosliq basimi p sol zattin' konsentratsiyasi C g'a tuvri proporsional;



2-35 su'wret.

2. Konsentratsiya turaqli bolg'anda erigen ha'r bir zattin' osmosliq basimi r eritpenin' absolyut temperaturasi T g'a tuvri proporsional;

3. Birdey konsentratsiyalarda ha'm birdey temperaturalarda erigen ha'r tu'rli zatlardin' osmosliq basimlari r olardin' molekulliq samaqlarina keri proporsional.



2-36 su'wret. Osmosliq basimni o'lsheytug'in osmometr dep atalug'in a'sbaptin' su'wreti. AV ha'm S sizig'i arasindag'i suyuqliq bag'anasinin' salmag'i osmosliq basimnin' o'lsheimi sipatida xizmet etedi: $P_{\text{osm}} = \rho gh$. Bul jerde ρ - eritpenin' tignizlig'i, h eritpe bag'anasinin' biyikligi.

Van-Goff nizamini ten'lemesinin' ideal gaz halini ten'lemesine uqshaslig'i eritilgan zattin' molekullarining' sol molekullaridin' konsentratsiyasi joqari bolmag'anda ideal gaz molekullarindag'i qasbiyetke iye bolatug'inlig'in ko'rsatedi. Sonliqtan Van-Goff nizamini bilayinsha aytamiz:

Eritpedegi eritilgan zat usi zat gaz ta'rizli halda eritpe iyelegen ko'lemde ha'm temperaturada joylasqan jag'dayda payda etilgan kerek basimg'a ten' basim payda etedi.

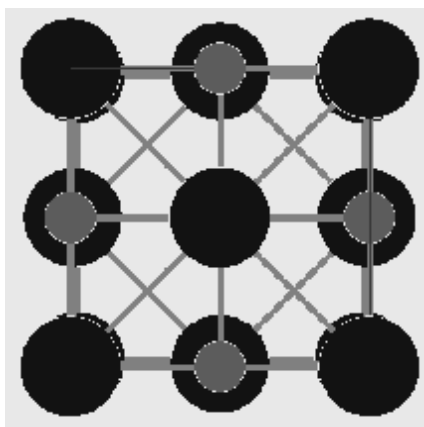
Ha'lsiz eritpelerdin' ko'pchiliginde (33-1)-formula da'l na'tijeler beredi. Biraq bir qatar eritpelerde (misali organikliq emes duzlardin' eritpelerinde) basim (33-1) degiden a'dewir artiq bolip shig'adi. Sebebi bunday duzlar erigende molekullari bir neshe bo'lekshelerga (ionlarga) ildiraydi. Bunday qubilis dissotsiatsiyalaniv dep ataladi. Na'tijede eritpenin' ko'lem birligindagi molekullaridin' konsentratsiyasi n artadi ha'm sog'an sa'ykes osmosliq basim artadi.

(33-1)-formulag'a bag'inatug'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 koordinatar 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^- ionların' jaylasıwları su'wrette ko'rsetilgen (su'wretin' 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 molekularlardı 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 obrazdı aytamız.



2-37 su'wret. NaCl tipindegi kristallardag'ı ionlardın' jaylasıwı

Joqarıdag'ı su'wrette tek bir sorttag'ı ionlar ushın du'zilgen qurılıs sa'wlelendirilgen. Bul qurılıs tiykarında to'belerinde ha'm qaptal betleri ortalarında ionlar jaylasqan kub turadı. A'dette bul kubtı kristallıq pa'njerenin' elementar qutıshası, al qarap atırg'an jag'daydag'ı qurılıstı qaptaldan oraylasqan kaublıq qurılıs dep ataydı. Ma'selen NaCl kristalı ushın kub qabırğasının' 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 parralelopedtin' a, b ha'm c qabırğaları 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 **c** vektorları kristallıq pa'njerenin' translyatsiya vektorları dep ataladı.

Kristalliq denenin' simmetriyasi degenimizde usi deneni qozg'altqanda yamasa basqa da operatsiyalardin' na'tiyjesinde o'z-o'zine u'ylesiw qa'biletliligin na'zerde tutadi. Usunday u'ylesiwlerdi payda etiwshi usillardin' sanı qanshama ko'p bolsa, dene simmetriyalıraq boladı. Misali 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 bolg'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'slepkikey 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. Misali adam denesinin' shep yarımı on' yarımı menen ken'isliktegi qozg'altıwlar arqalı u'ylespeydi. Basqa so'z benen aytqanda shep qoldın' qolg'abın on' qolg'a kiyiwge bolmaydı. Bul jag'dayda aynalıq simmetriya haqqında so'z etiledi. Adamnın' on' yarımı shep yarımına adamnın' ortası arqalı o'tiwshi tegislikke qarata simmetriyalı. Bul tegislik simmetriya tegisligi dep ataladı.

Qattı denelerde to'mendegidey simmetriya elementlerinin' bolıwı mu'mkin:

1). Simmetriya orayı. Ayırım deneler noqatqa qarata simmetriyalı bolıwı mu'mkin. Bunday noqattı simmetriya orayı dep ataymız ha'm onı C ha'ripi menen belgileydi.

2). Simmetriya ko'sherleri. Joqarıda shar menen tsilindrdegi burıw ko'sherleri haqqında ga'p etilgen edi. Ma'selen tsilindrdin' ko'sherine perpendikulyar bolg'an ko'sherdin' do'gereginde 180° qa burg'anda o'zinin' da'slepki halınday halg'a keletug'inlig'ı ayıldı. Bul jag'dayda $360/180 = n = 2$ - ta'rtpili simmetriya ko'sherine iye bolamız. Kristalliq denelerdegi atomlar menen molekullardın' jaylasıwında 1-, 2-, 3-, 4- ha'm 6-ta'rtpili simmetriya ko'sherleri boladı. Misali 6-ta'rtpili simmetriya ko'sherinin' do'gereginde figuranı 360° qa burg'anda 6 ret o'zinin' birdey halları arqalı o'tedi.

Kristalliq denelerde 5-, 7- ha'm joqarı ta'rtpili simmetriya ko'sherleri bolmaydı. Biraq son'g'ı waqıtları uglerodtın' quramalı bolg'an modifikatsiyalarında (misali C_{60} modifikatsiyası) 5-ta'rtpili simmetriya ko'sherinin' orın alatug'inlig'ı da'llilendi).

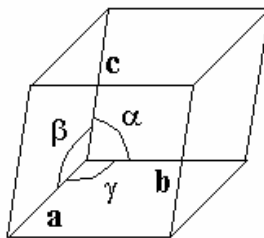
Simmetriya ko'sherlerin 1, 2, 3, 4 ha'm 6 dep belgilew qabil etilgen. Bunday jag'dayda bul sanlar atlıq bolıp tabıladi. Al simmetriya ko'sherlerinin' ta'rtpi haqqında aytlg'anda sannın' keynine - (inshi) belgisi qoyıladi. Demek 1 figuranı o'z do'gereginde 360° qa burıwshi ko'sher bolıp tabıladi.

3). Simmetriya tegislikleri. Eger dene o'z-o'zi menen aynalıq shag'ılistırıwdın' ja'rdeminde u'ylestiriletug'in bolsa, onda bul aynalıq betti simmetriya tegisligi dep ataydı. Misali 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 araqalı 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.

Joqarıda keltirilgen simmetriya elementleri jabıq simmetriya elementleri dep ataladı. Sebebi bul elementlerdin' ja'rdeminde islengen simmetriyalıq operatsiyalar (shag'ılistırıwlar ha'm burıwlar) 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 asırılğ'anda) figura o'z ornında qalmaydı. Bunday simmetriya elementi qatarına birinshi gezekte kristallardag'ı joqarıda aytlg'an translyatsiyalar kiredi.

Eger kristaldı qurawshi 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 jilistirıp qoyg'anımız benen biz qurılısta bazı bir o'zgeristin' bolg'anlig'in sezbeymiz. Usunday ko'z-qarastan translyatsiyalardı simmetriya elementleri dep ataymız.



2-38 su'wret. Elementar qutisha. a , b , c , α , β ha'm γ lar elementar qutishanın' (kristaldın') turaqlıları bolıp tabıladı.

Simmetriya ko'sherine usı ko'sher bag'ıtındıg'ı translyatsiyanı qosıp vintlik simmetriya ko'sherlerin alamız. Al simmetriya tegisligine usı betke parallel bag'ıttag'ı translyatsiyanı qosıw arqalı jılıp shashıratıwshı simmetriya tegisliklerine iye bolamız. Vintlik simmetriya ko'sherleri ha'm jılıp shashıratıwshı simmetriya tegislikleri ashıq simmetriya elementleri bolıp tabıladı.

Simmetriya elementleri ja'rdeminde simmetriyalıq operatsiyalar (burıwlar, shag'ılıstırıwlar) a'melge asırıladı.

Simmetriya elementlerin bir birine qosıw arqalı basqa simmetriya elementleri alınadı. Mısalı 2 ge boyında simmetriya orayı qosılsa usı ko'sherge perpendikulyar bag'ıttang'an ha'm C arqalı o'tiwshı simmetriya tegisligi m alınadı. Bunday mısallardı ko'plep keltiriwge boladı.

Ayqın bir kristaldag'ı mu'mkin bolg'an simmetriyalıq operatsiyalar jıynag'ı matematikalıq topardı payda etedi. Bunday topardı simmetriya toparı dep ataymız.

Jabıq simmetriyalıq operatsiyalardan qurıl'g'an toparlar simmetriyanın' noqatlıq toparları dep ataladı. Bunday toparlardın' sanı 32. Simmetriyası berilgen toparg'a kiriwshı kristallar kristallografiyalıq klaslardı payda etedi. Sonlıqtan da ta'biyatta bar barlıq kristallıq deneler simmetriyası boyınsha 32 kristallografiyalıq klassqa bo'linedi.

Al mu'mkin bolg'an barlıq simmetriyalıq operatsiyalardan qurıl'g'an toparlar simmetriyanın' ken'isliktegi toparları dep ataladı. Bunday toparlardın' sanı 230. 1890-jılı birinshi ret bul toparlardı keltirip shig'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 aksiomalarđ qanaatlandıradı:

1. Topardıń eki elementinin' ko'beymesi yamasa qa'legen elementinin' kvadratı usı toparg'a tiyisli element bolıp tabıladı.
2. Topardıń qa'legen u'sh elementi ushın assotsiativlik nızam orınlanadı, yag'nıy $a(bc) = (ab)c$.
3. Toparda birlik (neytral) element (e yamasa 1) bolıp, ol $ae=ea=a$ sha'rtin qanaatlandıradı.
4. Toparda qa'legen a elementke kerı bolg'an a^{-1} elementi bolıp $aa^{-1}=a^{-1}a=e$ sha'rti orınlanadı.

Kristallografiyalıq koordinatalar sisteması. Kristallardıń qurılısın izertlegende kristallografiyalıq koordinatalar sistemasın qollanıw qabıl etilgen. Bul jag'dayda a'dette X ko'sheri a , Y ko'sheri b , Z ko'sheri c translyatsiyasının' bag'ıtında alınadı. Koordinata bası retinde kristallıq pa'njerenin' qa'legen tu'yini alınıwı mu'mkin. Ha'r bir ko'sher boyınsha uzınlıq birligi retinde Bravais parallelipedinin' sa'ykes qabırğasınıń uzınlıg'ı 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 kestedede keltirilgen.

Kublıq, tetragonal ha'm rombalıq 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 matematika-lıq obraz ekenligin aytqan edik. Pa'njeredegi tu'yinler kristaldı qurawshı atomlardın', ionlardın' yamasa molekullardıń ten' salmaqlıq haldag'ı orınları bolıp tabıladı. Joqarıda keltirilgen su'wrettegi elementar qutışanı ken'islikte **a**, **b** yamasa **c** bag'ıtlarında sa'ykes a, b ha'm c shamalarına sheksiz ko'p ko'shirip shıqsaq a'piwayı kristallıq pa'njereni alamız. Sonlıqtan kristallıq pa'njere ken'islik boyınsha sheklenbe-gen obraz bolıp tabıladı.

Koordinata basın bazı bir ıqtıyarlı tu'yinde orналаstırıp qa'legen tu'yinnin' radius-vektorın bilay esaplawg'a boladı:

$$\mathbf{r} = n_1\mathbf{a} + n_2\mathbf{b} + n_3\mathbf{c}. \quad (34-1)$$

Bul jerde n_1, n_2, n_3 pu'tin sanlar (nol bolıwı da mu'mkin), **a**, **b**, **c** vektorları bazislik vektorlar, al usı u'sh vektordın' jıynag'ı pa'njere bazisi dep ataladı. Demek **a**, **b**, **c** vektorlarınan turatug'ın parallelopiped kristallıq pa'njerenin' elementar qutışası dep ataladı. Eger n_1, n_2, n_3 pu'tin sanları $-\infty$ den $+\infty$ ge shekemgi ma'nislerdin' barlıg'ın qabıl 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'njerele Brave pa'njerele dep atalıp, olar bir birinen ele-mentar qutışaların' formaları ha'm oraylasıwı boyınsha ayırıladı. Pa'njere tu'yini elementar qutıs-halardıń to'beleri menen qatar qaptal betlerinde, orayında da bolıwı mu'mkin. Usıg'an baylanışlı qutıs-halardıń (pa'njerenin') oraylasıwına qaray pa'njerele bilayınsha tto'rtke bo'linedi:

a. Tu'yin tek g'ana elementar bo'lekshenin' to'belerinde jaylasadı. Bunday jag'dayda pa'njereni a'piwayı pa'njere dep ataymız ha'm P ha'ripi menen belgileymiz.

b. Tu'yin elementar qutışanın' 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 ko'sherine perpendikulyar bet oraylassa B pa'njere ha'm Z ko'sherine perpendikulyar bet oraylasqan jag'dayda C pa'njerege iye bo-lamız.

c. Tu'yin elementar qutışanın' 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 qutışalardıń to'delerinde ha'm qaptal betleri oraylarında jaylasadı. Bunday jag'dayda F ha'ripi menen belgilenetug'ın qaptaldan oraylasqan pa'njerege iye bolamız.

Brave qutışasın saylap alıw ushın to'mendegidey u'sh sha'rt qoyıladı:

1) elementar qutışanın' simmetriyası kristaldın' simmetriyasına sa'ykes keliwi, al elementar qutıs-hanın' qabırg'aları pa'njerenin' translyatsiyaları bolıwı kerek;

2) elementar qutışa 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 qutışa 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 qutishalar ha'm 14 tiptegi Brave pa'njerelei qurıladı.

Da'slep 8 tu'rli singoniyadag'ı elementar qutishalardın' parametrleri menen tanısamız:

| Cingoniya | Translyatsiyalar | Mu'yeshler | Pa'njere tipi |
|---------------------------|-----------------------------|---|---------------|
| Kubliq | $a = b = c$ | $\alpha = \beta = \gamma = 90^0$ | P, I, F |
| Tetragonal | $a = b \neq c$ | $\alpha = \beta = \gamma = 90^0$ | P, I |
| Geksagonal | $a = b \neq c$ | $\alpha = \beta = 90^0, \gamma = 120^0$ | P |
| Trigonal (romboedrlik) | $a = b = c$ | $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^0$ | P |
| Rombalıq | $a \neq b \neq c, a \neq c$ | $\alpha = \beta = \gamma = 90^0$ | P, C, I, F |
| Monoklinlik | $a \neq b \neq c, a \neq c$ | $\alpha \neq \gamma \neq 90^0, \beta = 90^0.$ $\alpha \neq 90^0.$ | P, B |
| Trigonallıq | $a \neq b \neq c, a \neq c$ | $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^0$ $\alpha \neq 90^0, \beta \neq 90^0.$ | P |

Atomlıq tegisliklerdi belgilew. Kristalda ha'r qaysısının' betinde sheksiz ko'p atomlar jaylasqan sheksiz ko'p tegisliklerdi ju'rgiziw mu'mkin. O'z ara parallel bolg'an tegisliklerdi ta'riplew ushın olardın' birewin saylap alıw jetkilikli.

Tuwrı sıızılıqlı (tuwrı mu'yeshli bolıwı sha'rt emes) koorrdinalardag'ı qa'legen tegisliktin' ten'lemesi

$$x/|OA| + y/|OV| + z/|OC| = 1$$

tu'rine iye boladı (sızılmada keltirilgen). Joqarıdag'ı formuladag'ı $|OA|$, $|OB|$, $|OC|$ shamaları pu'tin sanlar etip alınıwı kerek. Sonlıqtan

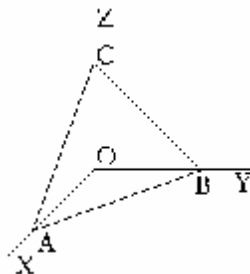
$$x/|OA| + y/|OB| + z/|OC| = 1$$

ten'lemesinin' ornına

$$hx + ky + lz = D$$


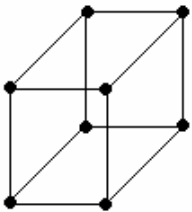
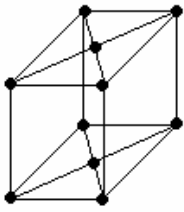
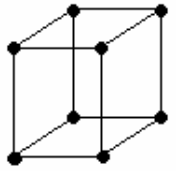
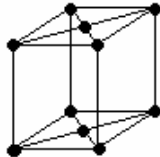
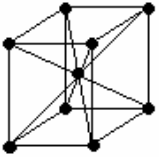
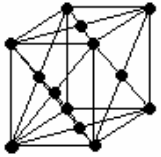
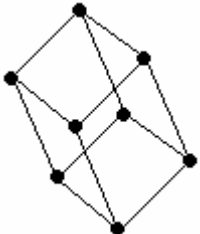
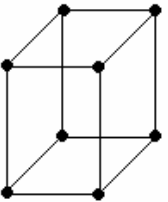
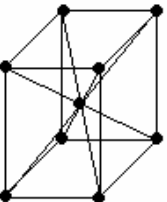
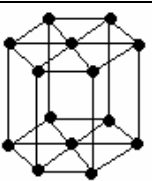
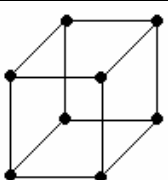
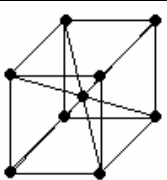
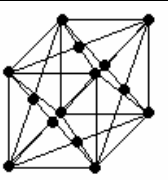
ten'lemesin alıw mu'mkin. Bul ten'lemedegi h,k,l shamaları pu'tin ma'niske iye boladı ha'm **Miller indeksleri** dep ataladı ha'm (hk1) tu'rinde jazıladı.

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'in 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 |  |  | | |
| Rombalıq |  |  |  |  |
| Trigonallıq (romboedrlik) |  | | | |
| Tetragonallıq |  | |  | |
| Geksagonallıq |  | | | |
| Kublıq |  | |  |  |

§ 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'tırıpında bir birinen g'a'rezsiz o'z-ara perpendikulyar u'sh tegislikte terbeletug'ın qattı dene model sıpatında qabıl etiledi. Terbeliwshi atomlar yamasa molekulalar usı o'z-ara perpendikulyar bıg'ıtlarg'a qarata sıızıqlı ostsillyator bolıp 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

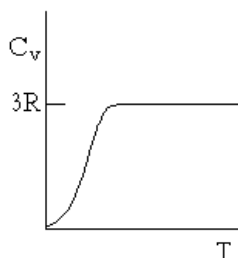
$$C_v = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_v = 3nk. \quad (35-2)$$

Demek qattı denenin' jıllılıq sıyımlılıg'ı turaqlı shama boladı. Eger zattın' molekulalarının' moli alinatug'ın bolsa, onda $n = N_A$, $nk = R$ - mollik gaz turaqlısı. Onday bolsa (35-2) den mollik jıllılıq sıyımlılıg'ının' $3R$ ge ten' ekenligi ha'm temperaturadan g'a'rezsizligi kelip shıg'adı. Bul **Dyulong-Pti nızamı** bolıp tabıladi.

Eksperimentler to'mengi temperaturalarda qattı denenin' jıllılıq sıyımlılıg'ının' $C_v \sim T^3$ nızamı boyınsha nolge umtilatug'ınlıg'ın ko'rsetedi.

Qattı denelerdin' eksperimentlerde aling'an jıllılıq sıyımlılıg'ı su'wrette ko'rsetilgen. Jıllılıq sıyımlılıg'ının' usınday g'a'rezliligi tek metal emes qattı denelerde orın aladı. Bunday denelerdegi birden bir energiya atom yamasa molekulalardın' ten' salmaqlıq halı do'geregindegi terbelisleri bolıp tabıladi. 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'rezliligin tu'sindiriw maqsetinde A.Eynshteyn 1907-jılı qattı denelerdi payda etetug'ın ostsillyatordın' energiyalarının' diskrettiligin esapqa alıwdı usındı. 1900-jılı M.Plank absolyut qattı denenin' nurlanıwın tu'sindiriw ushın usınday usınıs jasag'an edi. O.D.Xvolson bul haqqında bılay jazadı:



2-40 su'wret. Metal emes qattı denenin' jıllılıq sıyımlılıg'ının' temperaturag'a g'a'rezliligi.

“Elektrodinamika ko’z-qarasi boyinsha Plank gipotezaları materiallıq deneler ta’repinen nur energiyası menen almasıw, yag’nıy nur energiyasın shıg’arıw menen jutıw sekiriw menen a’melge asatug’ınlıg’ı tastıyqlawg’a alıp keledi. Qala berse Plank tın’ birinshi teoriyası boyınsha (1901-jıl) dene energiyanı pu’tin san eselengen $\epsilon = h\nu$ shamasına ten’ mug’darda juta aladı yamasa shıg’ara aladı. Xvolson boyınsha n terbelisler sanı, h bazı bir universal shama. Al Plank tın’ ekinshi teoriyası boyınsha (1909-jıl) tek g’ana energiyanın’ shıg’arılıwı bul nızamg’a bag’ınadı, al jutıw bolsa u’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’ salmaqılg’ında turadı, eki erkinlik da’rejesine iye vibratorlardın’ ha’r bir erkinlik da’rejesine qansha jıllılıq energiyası sa’ykes kelse, molekularaldın’ 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 atomnın’ ortasha energiyası 3i ge ten’, al gramm-molekulanın’ ortasha energiyası $J = 3Ni$ ge ten’ bolıwı kerek. YAg’nıy

$$J = 3R \boxed{}.$$

Bul an’latpadan T boyınsha tuwındı alsaq

$$C_V = 3R \left(\frac{\beta\nu}{T} \right)^2 e^{\frac{\beta\nu}{T}} \frac{1}{(e^{\beta\nu/T} - 1)^2} = 3R F(\beta\nu) = \Phi(T/\beta\nu)$$

yamasa

$$C_V = 3R \boxed{} = 3R F(\theta) = 3R \Phi\left(\frac{1}{x}\right)$$

formulaların alamız.

Bul formulalar ilimde da’slep jıllılıq sıyımlılıg’ı haqqındag’ı, al keyin jıllılıq qubılısları haqqındag’ı jan’a da’wirdi (eranı) ashtı. Jıllılıq sıyımlılıg’ı C_V temperatura T nın’ anıq tu’rdegi funktsiyası bolıp shıqtı”.

Meyli sıızqlı ostsillyator iye bola alatug’ın energiyanın’ elementar portsiyası E ge ten’ bolsın. Usı energiya fotonnın’ energiyası jiyilik penen qanday bolıp baylanısqa bolsa, tap sonday bolıp jiyilik penen baylanıslı dep esaplaymız. Onday bolsa

$$E = \hbar\omega. \quad (35-3)$$

Ostsillyatorın’ 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 belgileyemiz. Jıllılıq sıyımlılıg’ın da’l esaplawda E_0 din’ ma’nisi a’hmiyetke iye emes. Sonlıqtan ostsillyator iye bola alatug’ın energiyanın’ mu’mkin bolg’an ma’nisleri mına tu’rde jazıladı:

$$E_n = E_0 + nE \quad (n = 0, 1, 2, \dots). \quad (35-4)$$

Ostsillyator halının’ itimallıg’ı Boltsman formulası menen beriledi dep boljag’anımız durıs boladı. Sonlıqtan

$$R_n = A \exp[-E_n/(kT)] = A \exp[-(E_0 + nE)/(kT)] \quad (35-5)$$

ekenligin alamız. A normirovkalang'an turaqlı shama. Bul shamani normirovka sha'rti tiykarınan alamız:

$$P_n = \exp[-E_0/(kT)] \exp[-E_0/(kT)] A \sum_{n=0}^{\infty} \exp[-nE/(kT)] = 1. \quad (35-6)$$

Endi ostsillyatordın' ortasha energiyasın esaplaw mu'mkin:

$$\langle E \rangle = \langle E \rangle = \sum_{n=0}^{\infty} E_n P_n = E_0 + \{E \sum_{n=0}^{\infty} n \exp[-nE/(kT)]\} / \{ \sum_{n=0}^{\infty} \exp[-nE/(kT)] \}. \quad (35-7)$$

Geometriyalıq progressiya ushın formuladan:

$$\sum_{n=0}^{\infty} \exp[-nE/(kT)] = \{1 - \exp[-E/(kT)]\}^{-1}. \quad (35-8)$$

Bul ten'likтин' eki ta'repin de E boyınsha differentsiallap iye bolamız:

$$\sum_{n=0}^{\infty} n \exp[-nE/(kT)] = \exp[-E/(kT)] \{1 - \exp[-E/(kT)]\}^{-2}. \quad (35-9)$$

Endi (35-7) to'mendegidey tu'rge iye boladı:

$$\langle E \rangle = E_0 + \frac{E}{\exp[E/(kT)] - 1}. \quad (35-10)$$

Bunnan ostsillyatorlardın' bir molinin' energiyası ushın alamız:

$$U = 3N_A \langle E \rangle = 3N_A E_0 + \frac{3N_A E}{\exp[E/(kT)] - 1}. \quad (35-11)$$

Bunday jag'dayda turaqlı ko'lemdegi jıllılıq sıyımlılıg'ı:

$$C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V = 3N_A k \left(\frac{E}{kT} \right)^2 \exp\left(\frac{E}{kT} \right) / \{ \exp\left(\frac{E}{kT} \right) - 1 \}^2. \quad (35-12a)$$

Bul *jıllılıq sıyımlılıg'ı ushın Eynshteyn formulası* bolıp tabıladı. Bul formuladan jetkilikli da'rejede joqarı temperaturalarda (yag'nıy $T \rightarrow \infty$ bolg'anda) $C_V \rightarrow 3R$, al $T \rightarrow 0$ de $C_V \rightarrow 3R \left(\frac{E}{kT} \right)^2 \exp\left(-\frac{E}{kT} \right) \rightarrow 0$.

Eynshteyn formulası. E «energiyanın' elementar portsiyası» qattı denenin' qa'siyetine baylanışlı boladı. Denenin' «qattılıg'ı» artqan sayın bul energiyanın' ma'nisi artadı, sebebi terbelis jiyiligi ω nın' artıwı kerek. Bul energiyanı *Eynshteyn temperaturası* ja'rdeminde bılayınsha tikkeley ta'riplew qabil 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 $C_V \sim \exp[-E/(kT)]$ - eksponenta boyınsha kemeyiwi kerek, al eksperiment bolsa $C_V \sim T^3$ ekenligin ko'rsetedi. Solay etip

Eynshteyn formulası jıllılıq sıyımlılıg'ın esaplaw ushın jaramaydı. Sonlıqtan bul formula basqa formula menen almasırlıwı kerek.

Eynshteyn boyınsha qattı dene ha'r birinin' energiyası $E = \hbar\omega$ bolg'an bir birinen g'a'rezsiz sıyıqlıq ostsillyatorlardın' jıynag'ı bolıp tabıladı. Demek gazdegi molekulalardıń qozg'alısınday qattı denelerdegi atomlar yamasa molekulalardıń qozg'alısları Eynshteyn boyınsha bir birinen g'a'rezsiz. Bunday modeldin' qabıl etiliwinin' o'zi qa'telik.

Qattı denelerdin' atomların' qozg'alısın bir birinen g'a'rezsiz dep qaraw nadırıs bolıp tabıladı. Olardıń 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. Qattı deneni quraytug'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 halınan 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 halınan shıqqan atom belgili bir ku'sh penen qon'ısı atomlarga ta'sir etedi. Na'tiyjede sol atomlar da o'zlerinin' ten' salmaqlıq hallarınan shıg'adı ha'm bir atomnıń qozg'alısı qattı denede tolqın tu'rinde tarqaladı. Sonlıqtan qozg'alıs kollektivlik tu'rge iye boladı.

Atomlardın' usınday kollektivlik qozg'alısı qattı denedegi ses tolqını bolıp tabıladı. Solay etip ses terbelisleri elementar qozıwlar bolıp tabıladı.

Normal modalar. Joqarıdag'ıday bolıp ta'sirlesetug'ın atomlar sisteması baylanısqa ostsillyatorlar jıynag'ı tu'rinde qaraladı. Bunday jag'dayda atomlar sistemasının' qa'legen qozg'alısı normal terbelisler yamasa sistemanın' normal modaları superpozitsiyası sıpatında ko'rsetiledi. Normal modalardıń ha'r qaysısı o'zinin' jiyiligine iye boladı, yag'niy ω_i jiyiligi modası

$$E_i = \hbar\omega_i. \quad (35-13)$$

energiyasına iye boladı (E_0 qaldırılğ'an). Qattı denede usı modanın' bir-eki (bir-ekiden artıq bolıwı da mu'mkin) terbelisi qozadı. Eger usı modanın' n terbelisi qozg'an bolsa

$$E_{in} = n \hbar \omega_i. \quad (35-14)$$

Berilgen moda menen E_{in} energiyasının' baylanıslı bolıwı Boltsman bo'listiriliwine bag'ınadı dep esaplaymız ha'm sonlıqtan

$$P_{in} = A \exp[-E_{in}/(kT)] = A \exp[-n \hbar \omega_i/(kT)] \quad (35-15)$$

Berilgen moda terbelislerinin' ortasha sanı

$$\langle n_i \rangle = \langle E_{in} \rangle / (\hbar\omega_i) = 1/(\hbar\omega_i) \sum n \hbar\omega_i R_{in} = \frac{1}{\exp(\hbar\omega_i/kT) - 1}. \quad (35-16)$$

Endi tolıq energiyanı esaplaw normal modalar jiyilikleri menen olardin' sanın esaplawg'a alıp ke-
lindi.

Fononlar. Jiyiligi ω bolg'an terbelis modası menen baylanışlı energiya ushın jazılǵ'an (35-13) for-
mulası usınday modanı kvazibo'lekshe sıpatında qaraw haqqında pikirdi payda etedi. Ses terbelisleri mo-
daları menen baylanışqan usınday kvazibo'lekshe *fonon* dep ataladı. Fonon tu'sinigin paydalanıw
talqılawlardı an'satlastıradı ja'ne matematikalıq esaplawlarda da birqansha jen'illik payda etedi. Fotonlar
ushın qollanılǵ'an birqansha matematikalıq operatsiyalar fononlar ushın da jemisli tu'rde qollanıladı. Se-
bebi eki jag'dayda da birdey bolg'an tolqınlıq 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' tolqınlardin' ta-
ralıwı mu'mkin. Ko'ldenen' tolqınlar o'z-ara perpendikulyar bolg'an eki tu'rli bag'ıtqa iye polarizatsi-
yag'a iye bolıwı mu'mkin. Sonlıqtan u'sh polarizatsiyag'a iye uzın tolqınlı ses tolqınların' modaları
haqqında aytıwǵ'a boladı.

A'piwayılıq ushın izotrop qattı dene jag'dayına itibar beremiz. Ha'r bir polarizatsiya ushın modalar
sanın esaplaw birdey. Debaydın' jıllılıq sıyımlılıǵ'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 belgileyemiz. λ - tolqın uzınlıǵ'ı, T - terbelis
da'wiri. Bunday jag'dayda jiyilik penen tolqın sanı arasındag'ı qatnastı ta'ripleytug'ın

$$\omega = \pm vk \quad (35-7)$$

formulası *dispersiyalıq qatnas* dep ataladı. Bul formuladag'ı $v^2 = \partial p / \partial \rho$ - basımnan tıǵ'ızlıq boyınsha
alınǵ'an dara tuwındı, v - tolqınnın' 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' ener-
giyaların' ma'nislerin anıqlawg'a mu'mkinshilik beredi.

Modalar sanın anıqlaw. Shekli o'lishemlerge iye bolg'an denelerde turg'ın tolqınlar payda boladı.
Denenin' shegarası erkin terbeledi ha'm bul jerde hesh qanday kernewler payda bolmaıdı. 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. ξ arqalı terbeliwshi noqattın' ten' salmaqlıq
haldan awısıwın belgileyemiz.

X ko'sheri bag'ıtında v tezligi menen tarqalıwshı 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 bolmaıdı) bul ten'leme ushın shegaralıq sha'rt
bılay jazıladı:

$$\left. \frac{\partial \xi}{\partial x} \right|_{x=0 \text{ ham } x=l} = 0. \quad (35-19)$$

(34-19) g'a sa'ykes keliwshi (34-18) din' sheshimi bılay 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 baylanısqa. (35-19) din' qanaatlandırılıwı ushın (35-20) da $A = 0$ dep esaplaw kerek ha'm k g'a $kl = n\pi$ sha'rti qoyıladı. Bul jerde $n = 1, 2, \dots$ Aling'an qatnaslar turg'ın tolqınlardıń payda bolıwına sa'ykes keletug'ın tolqınlıq sanlardıń 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:

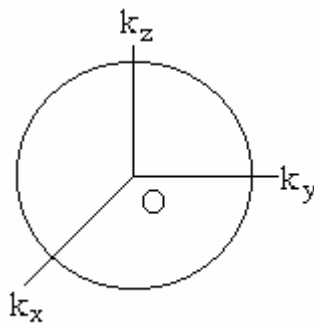
$$\begin{aligned} k_x &= \pi n_x / L & (n_x &= 1, 2, \dots), \\ k_y &= \pi n_y / L & (n_y &= 1, 2, \dots), \\ k_z &= \pi n_z / L & (n_z &= 1, 2, \dots). \end{aligned} \quad (35-21)$$

n_x, n_y, n_z sanları bir birinen g'a'rezsiz mu'mkin bolg'an barlıq ma'nislerine iye bolıwı mu'mkin. Endi modalar sanın anıqlaw (n_x, n_y, n_z) sanlarının' ha'r qanday jıynaqlarının' sanın anıqlawg'a alıp kelin-di. 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 jazıl-g'an. Sebebi L tolqın uzınlıg'ınan a'dewir u'lken.



2-41 su'wret.

dN nin' ma'nislerin esaplaw ushın k_x, k_y ha'm k_z ler tek on' ma'nislerdi qabıl etetug'ın bolg'anlıqtan sferalıq koordinatalarg'a o'tken qolaylı boladı. (35-22) de $dk_x dk_y dk_z = (4\pi/8) k^2 dk$ dep boljaw kerek. Na'tiyjede k dan $k+dk$ intervalındag'ı modalar sanı ushın (35-22) den alamız

$$dN = \frac{4\pi L^3}{(2\pi)^3} k^2 dk. \quad (35-23)$$

Bul formulada 4π sferalıq koordinatalarda esaplawlardın' ju'rgizilip atırǵ'anlıǵ'ın an'latıw ushın bo'limindegi 2π menen arnawlı tu'rde qısqartılmag'an. Endi (35-19) dispersiyalıq qatnasınan paydalanamız. Bul qatnastan

$$k^2 dk = (1/v^3) \omega^2 d\omega. \quad (35-24)$$

Demek ω menen $\omega + d\omega$ aralıǵ'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 kontsentratsiyasınan' qosındısınan turadı dep esaplap

$$\rho(\omega) = \frac{4\pi L^3}{(2\pi)^3} (1/v_b^3 + 2/v_k^3) \omega^2 \quad (35-28)$$

ekenligine iye bolamız.

Qattı denelerdin' atomlıq-kristallıq qurılısın esapqa almag'anlıqtan (35-28) ju'da' qısqa tolqınlar ushın durıs na'tiyje bermeydi. Joqarıdag'ı esaplawlarda denelerdin' qurılısı ko'lemi boyınsha bir tekli u'zliksiz dep esaplandı. Uzunlıǵ'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 temperaturalardaǵ'ı jıllılıq sıyımlılıǵ'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 temperaturalardaǵ'ı jıllılıq sıyımlılıǵ'ı. Jıllılıq energiyası menen baylanısqa terbelislerdin' barlıq modalarınan' tolıq energiyası

$$\begin{aligned}
 U &= \int_0^\infty \langle n(\omega) \rangle \rho(\omega) d\omega = \frac{4\pi L^3 \hbar}{(2\pi)^3} \left(\frac{1}{v_b^3} + \frac{2}{v_k^3} \right) * \int_0^\infty \frac{\omega^3 d\omega}{\exp[\hbar\omega/(kT)] - 1} = \\
 &= \frac{4\pi L^3}{(2\pi \hbar)^3} \left(\frac{1}{v_b^3} + \frac{2}{v_k^3} \right) (kT)^4 \int_0^\infty \frac{\xi^3 d\xi}{e^\xi - 1}.
 \end{aligned} \tag{35-29}$$

$\int_0^\infty \frac{\xi^3 d\xi}{e^\xi - 1}$ integralı kompleks o'zgeriwshi funksiyları usılları menen esaplanıwı mu'mkin ha'm ol $\pi^4/15$ ke ten'.

(34-29) jıllılıq sıyımlılıg'ın esaplawg'a mu'mkinshilik beredi:

$$C_v = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_v \sim T^3. \tag{35-30}$$

Jıllılıq sıyımlılıg'ının temperaturadan usınday g'a'rezliligi 0 K ge jaqın temperaturalardag'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'ınlıg'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

$$3N_A = \int_0^{\omega_{\max}} \rho(\omega) d\omega. \tag{35-31}$$

Jiyilik ω_{\max} nın' ma'nisi materialdın' serpimli 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

$$\omega_{\max} = 2\pi \langle v \rangle \left(\frac{3N_A}{-\pi L^3} \right)^{\frac{1}{3}} \tag{35-32}$$

ekenligine iye bolamız. Bul jerde $\langle v \rangle$ shaması $\left(\frac{1}{v_b^3} + \frac{2}{v_k^3} \right) = 3/(\langle v \rangle)^3$ formulası ja'rdeminde alıng'an sestin' ortasha tezligi. (35-31) ja'rdeminde alıng'an maksimallıq jiyilikti Debay temperaturası θ_D arqalı an'latadı:

$$k\theta_D = \hbar\omega_{\max}. \tag{35-33}$$

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 alınadı. Esapqa alg'an jag'dayda

$$U = \frac{12\pi L^3}{(2\pi\hbar)^3 \langle v \rangle^3} \int_0^{\omega_{\max}} \frac{\omega^3 d\omega}{\exp[\hbar\omega/(kT)] - 1} \quad (35-34)$$

formulasın alamız. Bul jerde $\langle v \rangle$ nın' shaması $\frac{1}{v_b^3} + \frac{2}{v_k^3} = \frac{3}{(\langle v \rangle)^3}$ formulası ja'rdeminde esaplanadı.

$$\xi = \frac{\hbar\omega}{kT}$$

o'lishem birligi joq o'zgeriwshige o'temiz. Bunday jag'dayda (35-33) ti esapqa alıp

$$U = 9N_A kT \left(\frac{T}{\theta_D} \right)^3 \int_0^{\theta_D/T} \frac{\xi^3 d\xi}{\exp \xi - 1} \quad (35-35)$$

an'latpasına iye bolamız. 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 temperaturalardag'ı jıllılıq sıyımlılıg'ı ushın Dyulong-Pti nızamı $C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V = 3R$ di alamız.

§ 2-36. Qattı denelerdin' jıllılıq ken'eyiwi

Temperatura joqarılag'anda ko'pshilik qattı denelerdin' ko'leminin' u'lkeyetug'ınlıg'ı belgili qubılıs. Bul qubılıstı **jıllılıq ken'eyiwi** dep ataymız. Qızdırg'anda qattı denelerdin' ko'leminin' u'lkeyiw sebeplerin qaraymız.

Kristaldın' ko'leminin' u'lkeyiwi atomlar arasındag'ı ortasha qashılıqtın' o'siwine baylanış ekenligi ha'mmege tu'sinikli. demek temperaturanın' o'siwi atomlar arasındag'ı qashılıqların' o'siwine alıp keledi dep juwmaq shıg'aramız. Al qızdırg'anda atomlar arasındag'ı qashılıqtıq u'lkeyiwi qanday sebeplerge baylanış degen soraw qoyıladı.

Kristaldın' temperaturasının' artıwı menen atomlardın' jıllılıq terbelislerinin' energiyası da artadı. Na'tiyjede bul terbelislerdin' amplitudaları u'lkeyedi.

Eger atomlardın' terbelisi garmonikalıq bolg'anda, onda qon'ıslas atomlar arasındag'ı ortasha qashılıq o'zgermegen ha'm jıllılıq ken'eyiwi baqlanbag'an bolar edi. Al haqıyqatında kristaldı qurawshı atomlar garmonikalıq terbelis jasamaydı. Bul jag'day su'wrette ko'rsetilgen.

Su'wrette R_0 aralıg'ı atomlar arasındag'ı en' to'men temperaturalardag'ı ortasha qashılıqqa sa'ykes keledi. Bul jag'dayda terbelis qatan' garmonikalıq boldı. Temperaturanın' o'siwi menen atomnın' da en-

ergiyasi o'sedi. Sonliqtan da'slep klm sızıg'ı boyınsha terbelis jasaytug'in atom k'l'm' sızıg'ı 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' ma'nisinin' joqarılaytug'ınılıg'ı ha'm sog'an sa'ykes atomlar arasındag'ı ortasha qashılıqtın' u'lkeyetug'ınılıg'ı ko'rinip tur. Basqa so'z benen aytqanda temperatura ko'terilgen sayın atomlar arasındag'ı tartısıw ku'shine salıstırg'anda iyterisiw ku'shi u'lkeyedi.

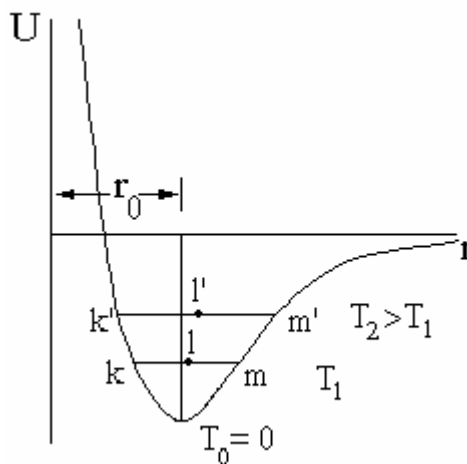
Demek *atomlardın' terbeliwindegi angaromnizmnin'* saldarınan jıllılıq ken'eyiw ju'zege keledi eken. Kristallıq denelerdi quraytug'ın atom yamasa molekulalar garmonikalıq terbelis jasaytug'ın bolg'anda jıllılıq ken'eyiw bolmag'an bolar edi.

Jıllılıq ken'eyiw sanlıq jaqtan sızıqlı ha'm ko'lemlik ken'eyiw koeffitsientleri menen ta'riplenedi. Meyli 1 uzınılg'ındag'ı dene temperatura ΔT shamasına ko'terilgende o'z uzınılg'ın ΔQ shamasına o'zgertetug'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 uzınılg'ının' 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'ınılıg'ın ko'rsetetug'ın su'wret.

Bul formulalardan denenin' T temperaturasındag'ı uzınılg'ı menen ko'lemi bılay anıqlanatug'ınılıg'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 uzınılg'ı menen ko'lemi belgilengen.

Kristallardıń' anizotropiyasınıń' saldarınan ha'r qıylı kristallografiyalıq bag'ıtlarda sızıqlı ken'eyiw koeffitsientleri ha'r qıylı ma'niske iye boladı. Demek, eger biz kristaldan shar sog'ıp alsaq, temperatura u'lkeygende ol o'zinin' sferalıq formasın o'zgertedi. Ulıwma jag'dayda shar ko'sherleri kristallografiyalıq bag'ıtlar menen baylanısqa *u'sh ko'sherli ellipsoidqa* aylanadı.

Bul ellipsoidtin' u'sh ko'sheri boyınsha jıllılıq ken'eyiwı ko'effitsientleri kristaldın' *ken'eyiwınin' bas ko'effitsientleri* dep ataladı. Olardı α_1 , α_2 ha'm α_3 arqalı belgilesek, onda kristaldın' ko'lemlik ken'eyiw ko'effitsienti

$$\beta = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3.$$

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 qızdırılǵ'annan keyin de shar bolıp qaladı (a'lbette diametri u'lkenirek bolǵ'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' sıızılıq ha'm ko'lemlik ken'eyiw ko'effitsientleri temperatura kishi intervallarda o'zgergende, temperaturanın' ma'nisinin' o'zi de joqarı bolǵ'anda basım ko'pshilik jag'daylarda turaqlı bolıp qaladı. Al ulıwma jag'dayda jıllılıq ken'eyiw ko'effitsienti temperaturag'a baylanıslı o'zgeredi ha'm temperatura tu'menlegende α menen β ko'effitsientleri temperaturanın' kubına proporsional kishireyedi ha'm temperatura nolge umılǵ'anda kristallardın' jıllılıq sıyımlılıǵ'ı sıyaqlı olar da nolge umıladı. Bul jag'day su'wrette ko'rsetilgen $T = 0$ noqatına sa'ykes keledi.

Temperatura absolyut nolge umılǵ'anda jıllılıq ken'eyiwınin' de, jıllılıq sıyımlılıǵ'ının' da nolge umılıwı tan' qalarlıq na'rse emes. Sebebi bul fizikalıq qa'siyetlerdin' ekewi de atomlardın' terbelisi menen baylanıslı. Sonlıqtan jıllılıq ken'eyiwı menen jıllılıq sıyımlılıǵ'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 ko'effitsientinin' atomlıq jıllılıq sıyımlılıǵ'ına qatnası temperaturadan g'a'rezsiz turaqlı shama bolıp tabıladı.

Qattı denelerdin' jıllılıq ken'eyiw ko'effitsientleri

| 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. Kонтсentratsiya ushin relaksatsiya waqıtı.

O'zi o'zine qoyılǵ'an sistema joqarı itimallıqqa iye ten'salmaqlıq halǵ'a o'tiwge umtıladı. Usının' saldarman sistemanı ta'riplewshi parametrler ten'salmaqlıq ma'nislerine jetedi (ten'salmaqlıq haldag'ı ma'nislerine jetedi). Bul protsess sa'ykes molekulalıq belgilerdin' ko'shiwi sıpatında ta'riplenedi.

O'z-o'zine 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 ushin za'ru'r bolg'an waqıt **relaksatsiya waqıtı** dep ataladı.

Sistemanın' Maksveldin' ten' salmaqlıq bo'listiriliwinen awıtqıwı ha'r qanday parametrler boyınsha ju'redi. Bul parametrler ushin ha'r qıylı relaksatsiya waqıtı orın aladı. Mısalı gazdin' quramındag'ı ha'r qanday sorttag'ı molekular kontsentratsiyalarının', tıǵ'ızlıqlardın' ha'm basqa da parametrlerdin' ten' salmaqlıq halǵ'a o'tiwi ha'r qıylı waqıt aralıqlarında bolatug'ınlıǵ'ı ta'biyiy na'rse.

Sistema ushin bo'listiriwdin' Maksvell bo'listiriliwine aylanıwı ushin ketetug'ın waqıtı Maksvell **belistiriliwine relaksatsiya waqıtı** yamasa **termalizatsiya waqıtı** dep ataladı.

Jıllılıq o'tkizgishlik. Ten' salmaqlıq halda sistemanın' (endigiden bılay fazanın' dep ta ataymız) barlıq noqatlarında temperatura birdey ma'niske iye boladı. Temperaturanın' ten' salmaqlıq haldan awıtqıwının' aqıbetinde temperaturanın' ma'nisin barlıq noqatlarda birdey bolıp qalatug'ınday bag'darlarda sistemanın' bir bo'liminen ekinshi bo'limine jıllılıqtın' qozǵ'alıwı ju'zege keledi. Usınday qozǵ'alıstar menen baylanıslı bolg'an jıllılıqtın' ko'shiriliwi **jıllılıq o'tkizgishlik** dep ataladı.

Gazlerdin' jıllılıq 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 jıllılıqtın' ag'ısı menen baylanısqa. Usınday bolıp gazdegi (basqa da denelerdegi) jıllılıq ag'ısının' payda bolıwına **jıllılıq o'tkizgishlik** dep ataymız. A'lbette, jıllılıq ag'ısı gaz molekularının' ilgerilemeli qozǵ'alıslarındag'ı soqlıǵ'ısıwları na'tiyjesinde a'melge asadı. Suyıqlıqlarda bolsa jıllılıq ag'ısı terbeliwshi molekuların' soqlıǵ'ısıwı na'tiyjesinde ju'zege keledi. Joqarı energiyag'a iye molekular u'lken amplitudag'a iye terbelislerge qatnasadı. Olar amplitudaları kishi molekular menen soqlıǵ'ısqanda olardı ku'shlirek terbeltedi ha'm o'z energiyasının' bir bo'limin beredi.

Jıllılıq ag'ısı bag'ıtı temperaturanın' to'menlew bag'ıtına sa'ykes keledi. Ta'jiriye jıllılıq ag'ısı Q dın' temperatura gradientine proporsional ekenligin ko'rsetedi, yag'nıy

$$Q = - \chi (dT/dx).$$

Bul an'latpadag'ı χ jıllılıq o'tkizgishlik koeffitsienti dep ataladı. Jıllılıq ag'ısı dep maydannın' bir birligi arqalı waqıt birliginde ag'ıp o'tetug'ın jıllılıq mug'darin tu'sinemiz.

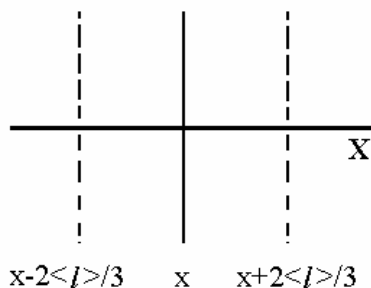
Sİ birlikler sistemasında jillılıq o'tkizgishlik koeffitsienti Dj/m^*s^*K yamasa Vt/m^*K birligine, al SGS sistemasında erg/sm^*s^*K birligine iye. Texnikada bolsa χ ushın kDj/m^*saat^*K o'lshe birligi ko'birek qollaniladı.

Diffuziya. Ten' salmaqlıq halda fazanı qurawshı ha'r bir komponentinin' tıg'ızlıqları ha'r bir noqatta birdey ma'niske iye boladı. Tıg'ızlıqtın' ten' salmaqlıq haldan awıtıwı 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 salıstırğ'anda tınıshlıqta turadı. Olardıń biri basqa bo'limlerge salıstırğ'anda qozg'alısqa keltirilgen jag'dayda usı qozg'alıwshı bo'limnin' tezligin kemeytiwge bag'darlang'an ku'shlepayda boladı. YAg'nıy *tormozlanıw* yamasa *jabısqaqlıq* payda boladı dep aytamız. Gazlerdegi jabısqaqlıq (tormozlanıw) qozg'alıwshı ha'm qozg'alımaytug'ın qatlamlar (bo'limler) arasındag'ı impulsler almasıwg'a (yag'nıy ta'rtplesken qozg'alıs impulsinin' ko'shiwine) alıp kelineadı.

Sonlıqtan gazler menen suyıqlıqlardag'ı su'ykelis ku'shlerinin' payda bolıwı ko'shiw protseslerine, atap aytqanda molekularadıń ta'rtplesken qozg'alısı impulsinin' ko'shiwine baylanıslı boladı.

Gazlerdegi ko'shiwdin' ulıwma ten'lemesi. Meyli G bir molekulag'a sa'ykes keliwshi bazı bir molekularlıq qa'siyetti ta'rtplesin. Bul qa'siyet energiya, impuls, kontsentratsiya, elektr zaryadı ha'm basqalar bolıwı mu'mkin. Ten' salmaqlıq halda G barlıq ko'lem boyınsha birdey ma'niske iye bolatug'ın jag'dayda G nın' gradienti orın alg'anda usı shamanın' kemeyiw bag'ıtındag'ı qozg'alısı baslanadı.



2-43 su'wret. Ko'shiwdin' ulıwma ten'lemesin keltirip shıg'arıw ushın arnalg'an su'wret.

Meyli X ko'sheri G nın' gradienti bag'ıtında bag'ıtlang'an bolsın (su'wrette ko'rsetilgen). Son'g'ı soqlıg'ısıwdan keyin dS maydanın kesip o'tetug'ın molekularadıń 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 molekularlar sanının' ag'ısı $n_0 \langle v \rangle / 4$ ke ten'. Demek X ko'sherinin' teris ta'rpinde 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

$$I_G^{(+)} = -\frac{1}{4}n_0 \langle v \rangle \left\{ G(x) - \frac{2}{3} \langle 1 \rangle \frac{\partial G(x)}{\partial x} \right\} \quad (37-3)$$

tu'rine iye boladı.

Demek qosındı ag'ıs ushın to'mendegidey ten'leme alamız:

$$I_G = I_G^{(+)} + I_G^{(-)} = -\frac{1}{3}n_0 \langle v \rangle \langle 1 \rangle \frac{\partial G}{\partial x}. \quad (37-4)$$

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'alısınin' ortasha energiyası. Eger bir noqattan ekinshi noqatqa o'tkende temperatura o'zgeretug'in bolsa jıllılıq o'tkizgishlik te o'zgermeli shama bolıp tabıladı. Bunday jag'dayda jıllılıq ag'ısı I_G shamasın I_g arqalı belgileymiz. Erkinlik da'rejesi boyınsha ten'dey bo'listirilw teoremasınan

$$G = \frac{i}{2}kT = \frac{i}{2} \frac{kN_A}{N_A} T = \frac{i}{2} \frac{R}{N_A} T = \frac{C_v}{N_A} T. \quad (37-5)$$

Bunday jag'dayda ko'shiw ten'lemesi (37-4) mınaday tu'rge iye boladı:

$$I_G = -\frac{1}{3}n_0 \langle v \rangle \langle 1 \rangle \frac{C_v}{N_A} \frac{\partial T}{\partial x} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (37-6)$$

$$\lambda = \frac{1}{3}n_0 \langle v \rangle \langle 1 \rangle \frac{C_v}{N_A} = \frac{1}{3}\rho \langle v \rangle \langle 1 \rangle c_v \quad (37-7)$$

jıllılıq o'tkizgishlik dep ataladı. $\rho = n_0 m$, $c_v = C_v / (N_A m)$ shamaları sa'ykes gazdin' tıg'ızılıg'ı ha'm turaqlı ko'lemdegi gazdin' salıstırmalı jıllılıq sıyımlılıg'ı. (37-6) *jıllılıq o'tkizgishlik ushın Fure ten'lemesi* yamasa *Fure nızamı* dep ataladı.

Jıllılıq o'tkizgishlik haqındag'ı ta'limat XVIII a'sirdin' ekinshi yarımında rawajlana basladı ha'm J.B.J.Furenin' (1768-1830) 1822-jılı baspadan shıqqan «Jıllılıqtın' analitikalıq teoriyası» kitabında tamamlandı.

Jıllılıq o'tkizgishlik a'dette ko'plegen usıllar menen o'lshenedi. Molekulanı qattı sfera ta'rizli dene dep $\langle 1 \rangle$ di molekulalı radiusı r_0 arqalı an'latıwg'a boladı. (37-7) degi basqa shamalar eksperimentte o'lshenedi, al $\langle v \rangle$ bolsa berilgen temperatura ushın Maksvell bo'listirilwinen 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 molekulalar ushın radiuslar derlik birdey dep esaplay alamız.

Ha'r qanday gazler ushın jıllılıq sıyımlılıg'ı S_v da bir birinen az parqlanadı. Sonlıqtan berilgen kontsentratsiyalarda jıllılıq o'tkizgishlik tiykarınan molekulalardın' ortasha tezligi $\langle v \rangle$ dan g'a'rezli bolıp shıg'adı.

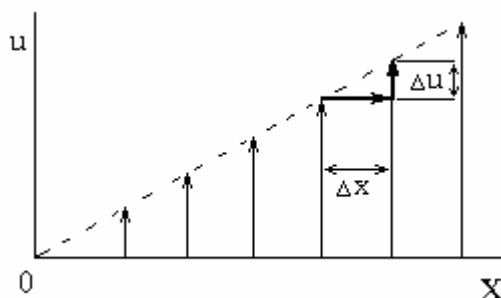
Na'tiyjede jen'il gazler awır gazlerge qarag'anda a'dewir u'lken jıllılıq o'tkizgishlikke iye boladı.

Misali a'dettegi jag'daylarda kislorodtin' jilliliq o'tkizgishligi $0.024 \text{ Vt(m}^*\text{K)}$, al vodorodniki bolsa $0.176 \text{ Vt(m}^*\text{K)}$.

$n_0 \langle l \rangle = 1/\sigma$ basimg'a g'a'rezli emes,, al $\langle v \rangle \sim T^{1/2}$ shaması da basimnan g'a'rezsiz.

Demek jilliliq o'tkizgishlik basimg'a g'a'rezli emes, al temperarutanin' kvadrat korenine proporsional o'zgeredi. Bul jag'daylar eksperimentte tasiyiqilanadi.

Jabisqaqliq. Joqarida aytilg'anday jabisqaqliq yamasa gazlerdegi ishki su'ykelis gaz qatlamlarının' qozg'alisi bag'itında molekular impulslerin ko'shiriwge baylanisli payda boladi. Su'wrette X ko'sherine perpendikulyar bolg'an u qatlamlarının' tezlikleri vektorlari ko'rsetilgen. Iqtiyarli tu'rde saylap aling'an qatlam on' ta'repinde turg'an qatlamg'a salistirg'anda kishirek tezlik penen, al shep ta'repinde turg'an qatlamg'a salistirg'anda u'lkenirek tezlik penen qozg'aladi. Qatlamlarg'a bo'liw sha'rtli tu'rde ju'rgizilgip, tezligi Δu ge parqlanatug'in qatlamnıń qalın'lıg'ı Δx dep belgilengen.



2-44 su'wret. Jabısqaqlıqtın' payda bolıw mexanizmi.

Jilliliq qozg'alislari na'tiyjesinde bir qatlamnan ekinshi qatlamg'a molekular uship 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 bolıwının' ma'nisi usınnan ibarat.

Gazdin' bir biri menen su'ykelisetug'in 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'rtplesken qozg'alıs impulsının' ag'ısına ten'. Bul jag'dayda

$$G = \mu u \quad (37-8)$$

ha'm (37-4) mınaday tu'rge enedi:

$$I_G = -\frac{1}{3} n_0 \langle v \rangle \langle l \rangle m \frac{\partial u}{\partial x} = -\theta \frac{\partial u}{\partial x} = \tau. \quad (37-9)$$

Bul jerde

$$\eta = \frac{1}{3} n_0 \langle v \rangle \langle l \rangle m = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle l \rangle \quad (37-10)$$

dinamikaliq jabisqaqliq dep ataladi. $\rho = n_0 m$ - gazdin' tıg'ızlıg'ı. τ dın' belgisi u'ikenirek tezlik penen qozg'alıwshı qatlamlarg'a ta'sir etiwshi su'ykelis ku'shleri tezlikke qarama-qarsı bag'ıtlang'anlıg'ın esapqa alg'an.

Bul jag'dayda da $n_0 \langle l \rangle = 1/\sigma$ basımg'a g'a'rezli emes, al $\langle v \rangle \sim T^{1/2}$ shaması da basımnan g'a'rezsiz. Sonlıqtan dinamikaliq jabisqaqliq basımg'a baylanıslı emes, al temperaturanın' kvadrat korenine baylanıslı o'zgeredi.

Dinamikaliq jabisqaqlıqtın', yag'nıy su'ykelis ku'shlerinin' basımnan, sog'an sa'ykes gazdin' 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 molekular kontsentratsiyası basımg'a proporsional. Molekula ta'repinen alıp ju'rilgen ta'rtiplesken qozg'alıs impulsı erkin ju'riw jolına tuwra proporsional (yag'nıy basımg'a kerı proporsional). İmpuls alıp ju'riwshi molekuların' kontsentratsiyası basımg'a tuwra proporsional bolg'anlıqtan birliги bir waqıt ishinde ha'm ko'lemdegi molekular ta'repinen alıp o'tilgen impuls basımg'a baylanıssız bolıp shıg'adı. Bul juwmaq eksperimentte jaqsı tastıyqlanadı.

Dinamikaliq jabisqaqlıqtın' birliги paskal-sekund (Pa*s) bolıp tabıladı.

$$1 \text{ Pa*s} = 1 \text{ N*s/m}^2 = 1 \text{ kg/(m*s)}.$$

Dinamikaliq jabisqaqliq penen birge **kinematikaliq jabisqaqliq** ta qollanıladı:

$$v = \theta/\rho. \quad (37-11)$$

Kinematikaliq jabisqaqlıqtın' o'lsheми $1 \text{ m}^2/\text{s}$ bolıp tabıladı.

O'zlik diffuziya. Molekular mexanikalıq ha'm dinamikaliq qa'siyetleri boyınsha birdey bolg'an jag'daydı qaraymız. Bunday jag'dayda molekuları ren'i boyınsha ayıratug'ın bolayıq ha'm

$$G = n_1/n_0.$$

Keltirilgen formulada n_0 ten' salmaqlıq kontsentratsiya, n_1 birinshi sort molekular kontsentratsiyası. Bul jag'dayda

$$I_{n_1} = -\frac{1}{3} n_0 \langle v \rangle \langle l \rangle \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{n_1}{n_0} \right) = -D \frac{\partial n_1}{\partial x}. \quad (37-12)$$

Bul jerde

$$D = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle l \rangle \quad (37-13)$$

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 $l \sim 1/r$. Demek turaqlı temperaturada $D \sim 1/r$. Ekinshi ta'repten turaqlı basımda $\langle l \rangle \sim T$, al $\langle v \rangle \sim T^{1/2}$. Demek turaqlı basımda $D \sim T^{3/2}$. Bul juwmaqlar eksperimentte jetkilikli da'rejede tekserilgen. $D \sim 1/r$ qatnasın $D_p = \text{const}$ dep jazg'an qolaylı. Bul eksperimentte ju'da' tıg'ız bolmag'an gazlerde basımın' ken' intervalında da'l tastıyqlanadı (protsentın' onnan birindey da'llikte).

Normal temperaturalarda kislorod penen azottın' hawadag'ı diffuziya koeffitsienti shama menen $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ qa ten'.

Ko'shiw protsesslerin xarakterlewshi koeffitsientler arasındag'ı baylanıslar. (37.7), (37.10) ha'm (37.13)- an'latpalardan

$$\lambda = \frac{\eta C_v}{m N_A} = \eta c_v, \quad (37-14)$$

$$D = \eta / \rho = \frac{\lambda}{c_v \rho} \quad (37-15)$$

ekenligi kelip shıg'adı. Bul an'latpalarda c_v arqalı turaqlı ko'lemdegi jıllılıq sıyımlılıg'ı, al ρ arqalı zattın tıg'ızılıg'ı belgilengen.

QOSIMSHALAR

İdeal gazdın' hal ten'lemesi

Termodinamikalıq sistemanın' hal ten'lemesi sistemanın' halının' parametrlerin baylanıstıratug'ın analitikalıq formula bolıp tabıladı. Eger sistemanın' xalı u'sh parametr ja'rdeminde tolıq anıqlanatuğ'ın bolsa (basım P, ko'lem V ha'm temperatura T) hal ten'lemesi ulıwma tu'rde bılay jazıladı:

$$F(P, V, T) = 0 \quad (1)$$

Bul formulanın' ayqın tu'ri qarap atırılğ'an termodinamikalıq sistemanın' fizikalıq qa'siyetlerine baylanıslı.

Ko'p sanlı eksperimentallıq mag'lıwmatlardı ulıwmalastırıw gazlardın' ko'pshiliginin' o'jire temperaturasında ha'm shama menen bir atmosfera basımında (a'dettegi sharayatlar) *Klapeyron-Mendeleev ten'lemesi* dep atalatuğ'ın ten'lemenin' ja'rdeminde jetkilikli da'rejedegi joqarı da'llikte ta'riplenetuğ'ınlig'ın ko'rsetedi:

$$PV = \nu RT. \quad (2)$$

Bul an'latpadag'ı P gazdın' basımı, V gaz iyelep turg'an ko'lem, ν gazdın' mollerinin' sanı, R universal gaz turaqlısı, T absolyut temperatura. (2)-ten'leme frantsuz fizigi Benua Pol Emil Klapeyronnın' (1799 - 1864) ha'm orıs ximigi Dmitriy İvanovich Mendeleevın' (1834 - 1907) hu'rmeti menen ataladı.

Termodinamikalıq jaqtan P, V ha'm T parametrlerin baylanıstıratug'ın ten'leme (2)-Klapeyron-Mendeleev ten'lemesi bolatuğ'ın bolsa, onda usınday sha'rtlerge bag'ınatuğ'ın gazdı *ideal gaz* dep ataydı. Normal jag'daylarda vodorod ha'm geliy o'zlerinin' qa'siyetleri boyınsha ideal gazlerge ju'da uqsas gazler bolıp tabıladı.

(2)-ten'lemeni tallawdı *absolyut temperatura* dep atalatuğ'ın T shamasın talqılawdan baslaymız. (2) den ko'lem menen zattın' mug'darı turaqlı bolğ'anda temperatura T nın' ideal gazdın' basımı P g'a tuwrı proporsional bolatuğ'ınlig'ı ko'rinip tur. Al bul jag'day eger temperaturanı o'lshew ko'lemi turaqlı bolğ'an gaz termometri menen o'lsheuse ha'm gaz ideal gaz bolsa, onda aling'an termometr temperatura boyınsha sıızılıq shkalag'a iye bolatuğ'ınlig'ın an'latadı. Biraq sonı esapqa alıw kerek, termometrlik dene

retinde gaz paydalanılatur'ın gaz termometriniñ absolyut temperaturanı o'lshew imkaniyatları sheklen-gen. Sebebi termometrlik dene retinde haqıyqıy (real) gaz paydalanıladı, al real gaz ushın (2)-ten'leme juwıq orınlanadı. To'mengi temperaturalarda ideal gaz suyıq halg'a o'tedi. Sonlıqtan haqıyqıy gazlerdi termometriniñ jumısshı denesi retinde paydalanıw maqsetke muwapıq kelmeydi.

İdeal gaz termometri menen o'lshegen absolyut temperatura T TSelsiya shkalasında anıqlang'an temperatura menen bilay baylanısqa:

$$T = t + 273,15. \quad (3)$$

Bul an'latpadag'ı t arqalı TSelsiya shkalasındag'ı temperaturanın' ma'nisi berilgen. Temperaturanın' absolyut shkalasındag'ı temperaturanı o'lshew birliğı kelvin (K) bolıp tabıladı ha'm ol sanlıq jaqtan TSelsiya shkalasındag'ı temperaturanı o'lshew birliğı TSelsiya gradusı (°S) menen ten'.

(2)-formulag'a sa'ykes absolyut temperatura nolge ten' ($T=0$) bolg'anda PV ko'beymesi nolge ten' boladı. Temperaturanın' bul ma'nisi *temperaturanın' absolyut noli* dep ataladı. Basım menen ko'lemnin' ko'beymesi PV teris ma'niske iye bola almaytug'ını sıyaqlı absolyut temperatura da teris ma'niske iye bola almaydı. (3) ten temperaturanın' absolyut noline TSelsiya shkalasındag'ı $t = -273,15^{\circ}\text{C}$ tempera-turanın' sa'ykes keletug'inlıg'ı ko'rinip tur.

(2)-formuladag'ı zattın' mug'darın (bul jag'dayda ideal gazdın') ta'ripleytug'ın v parametrin tal-lawg'a o'teyik. Molekulalıq-kinetikalıq ko'z-qarastan bul shama sistemag'a kiriwshi molekulalardıñ sanına proporsional. Sistemadag'ı molekulalar sanınan onın' tepmodinamikalıq qa'siyetleri g'a'rezli ek-enligi anıq. Sonlıqtan v da P, V ha'm T sıyaqlı sistemanın' termodinamikalıq parametri bolıp tabıladı ha'm (2) hal ten'lemesi barlıq to'rt termodinamikalıq parametrdi baylanıstıradı.

Termodinamika zatlardın' molekulalıq qurılısın izertlemeytug'ın bolg'anlıqtan onın' ramkalarında zatlar mug'darı eksperimentallıq mag'lıwmatlar tiykarında tek termodinamikalıq qatnaslar tiykarında anıqlanıwı mu'mkin.

O'tkerilgen ta'jiriybeler P, V ha'm T parametrleri arasındag'ı qatnastın' olardıñ massaları arasında belgili bir turaqlı qatnas saqlang'anda birdey bolıp kalatug'inlıg'ın ko'rsetedi. Mısalı gazdın' basımı me-nen ko'lemnin' ko'beymesi PV ha'm temperatura T arasındag'ı proporsionallıq koeffitsient 2 gramm vodorod ha'm 32 g kislorod ushın birdey bolıp kaladı. Bunnan zatlardın' mug'darı v di gazdın' massası M nin' usı gaz ushın turaqlı bolg'an μ shamasına katnası sıpatında anıqlawdın' kerek ekenligi kelip shıg'adı:

$$v = \frac{M}{\mu}. \quad (4)$$

Bul an'latpadag'ı v *mollik massa* yamasa *zattın' bir molinin' massası* dep ataladı.

Tariyxıy jaqtan zattın' mug'darı tu'sinigi da'slep ximiyalıq reaksiyag'a kiriwshi ha'm reaksiyanın' na'tiyjesinde alinatug'ın ximiyalıq zatlardın' massaların' qatnasınan kirgizilgen. Bul jag'day zattın' mug'darın' o'lshew birliginin' atına o'z izin kaldırdı. Zatlardın' mug'darı mollerde o'lshedeni. Bul o'lshew birliğı SI sistemasının' tiykarg'ı birliklerinin' dizimine kirgizilgen.

Qa'legen zattın' bir molinde ^{12}C uglerod izotopının' 12 grammındag'ı molekulalar sanınday mug'darda molekula boladı.

Qa'legen zattın' bir molindegi molekulalar sanı birdey boladı ha'm ol san *Avagadro sanı* dep ataladı (İtaliyalı fizik ha'm ximik Amedeo Avagadronın' (1776-1856) hu'rmetine). Bul turaqlınnın' ma'nisi eksperimentte anıqlang'an ha'm mınag'an ten':

$$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}. \quad (5)$$

Avogadro turaqlısı makro- ha'm mikrodu'nyadag'ı massalardıń masshtablarınń qatnasın beredi ha'm termodinamikalıq sistemadag'ı bo'lekshelerdin' sanının' o'lishem birligi bolıp tabıladı. Bul shama sistemalardı ta'riplegendegi termodinamikani paydalanıwdın' qollanılıwının' kriteriyin beredi. Eger sistemadag'ı bo'leksheler sanı Avogadro sanı menen salıstırılıqtay yamasa onnan ko'p bolsa, onda bul sistema ushın termodinamikalıq ta'riplew ju'rgiziw mu'mkin.

Avogadro turaqlısı *massanın' atomlıq birligi (m.a.b)* shaması menen baylanıslı. Bul shama ^{12}S izotopının' massasının' on ekiden birine ten':

$$M_{\text{m.a.b.}} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ g}. \quad (6)$$

Bir grammnın' (10^{-3} kg) massanın' atomlıq birligine qatnası Avogadro sanına ten'.

Bir atomnıń massası m_a massanın' atomlıq massası $M_{\text{m.a.b.}}$ menen Mendeleevtin' da'wirlik sistemasında ko'rsetilgen elementtin' atomlıq massası A g'a ko'beytkenge ten':

$$M_a = M_{\text{m.a.b.}} \cdot A \quad (7)$$

Bir molekulanın' massası m usı molekulag'a kiriwshi atomlardın' massalarınń qosındısı tu'rinde anıqlanadı. Aling'an an'latpanı Avogadro turaqlısına ko'beytiw *zattın' molekulalıq massası* beredi:

$$\mu = m N_A. \quad (8)$$

Molekulalıq massa kg/mol de o'lishenedi.

(2)-Klapeyron-Mendeleev ten'lemesinde PV ha'm T shamaları arasındag'ı proporsionallıq koeffitsienti sıpatında *zattın' mug'darı* v din' R koeffitsientine ko'beymesı tur. R universal gaz turaqlısı dep ataladı. Onın' shaması barlıq gazler ushın birdey ha'm mınag'an ten':

$$R = 8,31 \frac{\text{Dj}}{\text{mol} \cdot \text{K}}. \quad (9)$$

Zattın' mug'darı ushın jazılğ'an (4) an'latpanı (2) Klapeyron-Mendeleev ten'lemesine qoysaq, onı aqırg'ı tu'rge alıp kelemiz:

$$PV = \frac{M}{\mu} RT. \quad (10)$$

Klapeyron-Mendeleev ten'lemesi ideal gazdin' ten' salmaqlıq halın, demek onday gazde ju're alatug'ın qa'legen qaytımlı protsesslerdi ta'ripleydi. Sistemag'a qosımsha sha'rtler qoyılğ'anda *termodinamikalıq protsesslerdin' ten'lemelerin* ha'm sa'ykes nızamlardı alıw mu'mkin. Bul nızamlar shekli tu'rdegi qollanıwılarg'a iye bolıp, (2) ten'leme ta'repinen ruqsat etiletug'ın termodinamikalıq protsesslerdin' dara jag'dayları bolıp tabılardı.

Boyl-Mariot nızamına saykes turaqlı temperaturadag'ı massası o'zgermey qalatug'ın gazdin' basımı ko'lemge keri proporsional o'zgeredi. Bul nızam menen ta'riplenetug'ın protsess izotermalıq protsess ($T = \text{const}$) dep ataladı, al onın' ten'lemesi mına tu'rge iye:

$$PV = \text{const.} \quad (11)$$

Gazdin' basımı menen ko'lemi arasındag'ı usınday baylanıs XVII a'sirdin' ekinshi yarımında bir birinen g'a'rezsiz anglısh Robert Boyle (1627 - 1691) ha'm frantsuz fizigi Edmon Mariot (1620 - 1684) ta'repinen ashıldı. XVII a'sirdin' alpısınshı jılları Boyle ta'repinen o'zgermeytug'ın belgili bir mug'dardag'ı hawanın' ko'leminin' basım'g'a g'a'rezli o'zgeriwleri izertlendi. Bul ta'jiriybeler a'meliy xarakterge iye ha'm hawa nasosların sog'ıw ha'm olardı jetilistiriw menen baylanıslı boldı. O'zinin' ta'jiriybeleri ushın Boyle bir ushı kepsirlengen shiyshe nay soqtı ha'm og'an naydın' kepsirlengen ushında hawanın' ko'bigın qaldırıp sinap quydı. Atmosferalıq basımnan u'lken basımlar ushın V ta'rizli iymeytillen nay, al atmosfera basımınan kishi basımlar ushın tuwrı nay qollanıldı ha'm naydın' bir ushın ishinde sinap quyıl'g'an ıdısqa otırg'ızıldı. Ko'biktin' ko'lemi ha'm sinap bag'anasının' biyikligi boyınsha Boyle hawanın' basımı menen ko'lemi arasındag'ı qatnastı taptı. Alıng'an na'tiyjeler hawanın' basımı menen ko'lemi arasındag'ı keri g'a'rezlilikthin' bar ekenligin tastıyıqladı. 1676-jılı Boyle nızamı Mariot ta'repinen ashıldı. Bul nızamdı ol gazlerdin' fundamentallıq qa'siyetlerinin' biri dep karadı.

Temperaturanı o'lshew usıllarının' rawajlanıwı barısında gazlerdin' ko'leminin' temperaturag'a g'a'rezliligi boyınsha sanlıq qatnaslardı alıwdın' mu'mkinshiligi payda boldı. *Jozef Lui Gey-Lyussak* (1778 - 1850) ha'r qıylı gazler ushın ta'jiriybeler seriyasın o'tkerdi ha'm turaqlı basımda ha'm zattın' birdey mug'darı ushın temperatura birdey shamalg'a ko'terilgende gazlerdin' ken'eyiwi birdey bolatug'ınlig'in anıqladı. Bun nızam *Gey-Lyussak nızamı* dep ataladı. Bunnan burınraq XVIII a'sirdin' aqırında bul nızam *Jak Aleksandr TSezar SHarl* (1746 - 1823) ta'repinen ashıl'g'an edi (biraq ol o'z miynetin baspada shıg'arg'an joq).

Gey-Lyussak nızamı izobaralıq protsessti ($P = \text{const}$) ta'ripleydi:

$$\frac{V}{T} = \text{const} \quad (12)$$

yamasa

$$V = V_0(1 + \alpha t). \quad (13)$$

Bul an'latpadag'ı V_0 gazdın' TSelsiya shkalası boyınsha nolge ten' bolg'andag'ı ko'lemi, α gazdın' ken'eyiwinin' temperaturalıq koeffitsienti (ideal gaz ushın $1/273,15$ shamasına ten' bolıwı kerek). Normal sharayatlar ushın haqıyqıy gazler ushın da α nın' ma'nisi usı ma'niske jaqın.

Eger gazdin' ko'lemin o'zgerissiz kaldırsaq (bunday awhal turaqlı ko'lemli gaz termometrinde orın aladı), onda bunday jag'dayda o'tetug'ın protsessti *izoxoralıq* protsess ($V = \text{const}$) dep ataymız ha'm bunday protsess minä ten'leme menen ta'riplenedi:

$$\frac{P}{T} = \text{const.} \quad (14)$$

Bul nızam SHarl nızamı dep ataladı.

Haldın' parametrlerinin' birewi (temperatura, basım yamasa ko'lem) turaqlı bolıp qalatug'ın jag'daylarda ideal gazlerde o'tetug'ın protsesslerdi ((11), (12) ha'm (14)) *izoprotsessler* dep ataydı. Bul protsesslerdin' ju'riwi bir hal parametrin turaqlı etip qaldıratug'ın qosımsha sırtqı ta'sirler menen sheklengen. Sonlıqtan bul protsesslerdi tek dara jag'daylar dep karaw kerek (ideal gazlerde mu'mkin bolg'an protsesslerdin' dizimi tek usı u'sh protsessten turmaydı, al ko'p sanlı protsesslerdi o'z ishine kamtıydı).

Termodinamikanın' birinshi ha'm ekinshi baslamaları haqqında ulıwmalıq eskertiwler

Termodinamikanın' birinshi baslaması ta'biyattag'ı protsesslerdin' bag'ıtı haqqında hesh qanday ko'rsetpeler bermeydi. Mısalı, izolyatsiyalang'an sistema ushın termodinamikanın' birinshi baslaması barlıq protsesslerde sistemanın' energiyasınan' turaqlı bolıp qalıwın talap etedi. Eger sistemanın' eki hali 1- ha'm 2-hallar dep belgilense birinshi baslama sistemanın' 1-haldan 2-halg'a o'tetug'ınlig'ı yamasa 2-haldan 1-halg'a o'tetug'ınlig'ı haqqında hesh na'rse de aytpaydı. Ulıwma aytqanda termodinamikanın' birinshi baslaması tiykarında izolyatsiyalang'an sistemada qanday da bir protsesstin' ju'retug'ınlig'ı haqqında ga'p etiw mu'mkin emes.

Meyli adiabatlıq izolyatsiyalang'an sistema bir biri menen ta'sirlesetug'in, biraq basqa deneler menen ta'sirlespeytug'in eki deneden turatug'in bolsın. Bunday jag'dayda sol eki dene arasındag'ı jıllılıq almasıw $Q_1 = - Q_2$ sha'rtine bag'ınadı. Bir dene ta'repinen aling'an Q_1 jıllılıg'ı ekinshi dene ta'repinen berilgen Q_2 jıllılıg'ına ten'. Jıllılıqtın' qaysı ta'repke beriletug'ınlig'in termodinamikanın' birinshi baslaması ayta almaydı. Sonlıqtan jıllılıq salqınaraq deneden qızdırılğ'an deneg'e o'z-o'zinen o'tetug'in bolsa birinshi baslamag'a kayshı kelmegen bolar edi. Temperaturanın' sanlıq ma'nisi haqqında ma'sele termodinamikanın' birinshi baslaması ushın jat ma'sele bolıp tabıladı. Sonlıqtan birinshi baslama temperaturanın' hesh bir ratsionallıq shkalasın du'ziwge alıp kelmeydi.

Termodinamikanın' ekinshi baslaması bolsa kerisinshe haqıyqatta ju'retug'in protsesslerdin' bag'ıtı haqqında ga'p qılıwğ'a mu'mkinshilik beredi. Biraq termodinamikanın' ekinshi baslamasının' a'hmiyeti usınan' menen tamam bolmaydı. Ekinshi baslama temperaturanın' sanlıq o'lishemi haqqında ma'seleni sheshiwge, termometrlik deneni saylap alıwdan ha'm termometrın' qurılısınan g'a'rezsiz bolğ'an ratsional temperaturanın' shkalasın saylap alıwğ'a tolıq mu'mkinshilik beredi. Termodinamikanın' birinshi baslaması menen birlikte ekinshi baslama termodinamikalıq ten' salmaqlıq halında turg'an denelerdin' makroskopiyalıq parametrleri arasındag'ı da'l sanlıq qatnaslardı anıqlawğ'a mu'mkinshilik beredi. Usınday da'l qatnaslardın' barlıg'ı *termodinamikalıq qatnaslar* degen at aldı.

Termodinamikanın' ekinshi baslamasının' tiykarın salg'an Frantsuz injeneri menen fizigi Sadi Karno bolıp tabıladı dep esaplanadı. 1824-jılı jırıq ko'rgen «Ottın' qozg'awshı ku'shi ha'm usı ku'shti paydalanıwshı mashinalar haqqında» degen kitabında Sadi Karno jıllılıqtın' jumıska aylanıwının' sha'rtlerin izertledi². Biraq sol waqıtları Karno teploterod teoriiyası ko'z-qaraslarında turdı ha'm sonlıqtan ol termodinamikanın' ekinshi baslamasının' anıq formulirovkasın bere almadı³. Anıq formulirovka 1850-1851 jılları bir birinen g'a'rezsiz nemis fizigi Rudolf Klauzius ha'm SHotlandiya fizigi Vilyam Tomson (lord Kelvin) ta'repinen berildi. Olar termodinamikanın' ekinshi baslamasın an'latatug'in tiykarıg'ı postulattı keltirip shıg'ardı ha'm onnan baslı na'tiyjelerdi aldı.

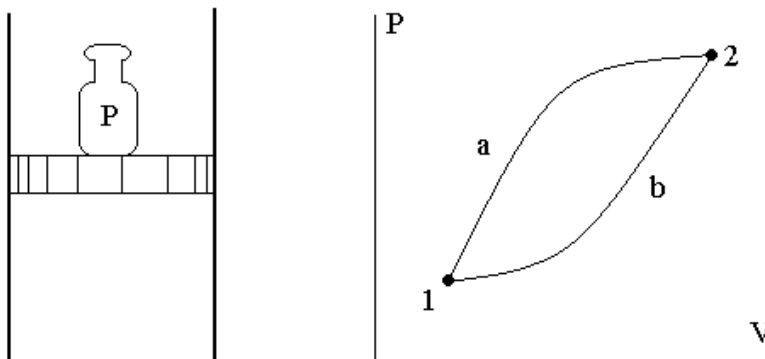
Termodinamikanın' ekinshi baslamasın an'latatug'in tiykarıg'ı postulattın' ha'r qıylı anıqlamaları

Izolyatsiyalang'an sistema denelerinin' baslang'ısh halının' qanday bolıwına qaramastan bul sistemada aqır-ayag'ında barlıq makroskopiyalıq protsessler toqtaytug'in termodinamikalıq ten' salmaqlıq orındaydı. Bul awhal termodinamikada a'hmiyetli orındı iyeleydi ha'm *postulat tu'rinde qabıl* etiledi. Bul postulattı *termodinamikanın' ulıwmalıq baslaması* dep te ataydı.

Termodinamikanın' ekinshi baslamasının' anıqlamasın beriw ushın ideyalardıń tariyxıy rawajlanıwına sa'ykes jıllılıq mashinasının' jumısın sxema tu'rinde ko'remiz.

² YAg'nıy R.Mayer, Djoul ha'm Gelmgolts ta'repinen termodinamikanın' birinshi baslaması ashılmastan burın.

³ Keyinirek ol teploterod teoriiyası ko'z-karaslarınan bas tarttı.



Mashinanin' tsilindirinde (su'wrette keltirilgen) jumisshi dene dep atalatug'in gaz yamasa basqa zat bar bolsin. Anıqlıq ushın jumisshi deneni gaz dep esaplaymız. Meyli PV diagrammasında jumisshi denenin' da'slepki halı 1 noqatı menen belgilensin. TSilindrdin' tu'bin temperaturası sol denenin' (yag'nıy tsilindrdegi gazdin') temperaturasınan joqarı bolg'an qızdırg'ısh penen jıllılıq kontaktına alıp kelemiz. Gaz kızadı ha'm ken'eyedi – bul protsess 1a2 sıızıg'ı menen su'wretlengen. Jumisshi dene qızdırg'ısthan Q_1 jıllılıg'ın aladı ha'm A_1 ge ten' on' ma'nisli jumıs isleydi. Birinshi baslama boyınsha

$$Q_1 = U_2 - U_1 + A_1.$$

Endi porshendi da'slepki halına alıp keliw kerek, yag'nıy gazdı kısıwımız kerek. Bunı qısılg'anda islengen jumıs A_2 nin' shaması A_1 din' shamasınan kishi bolatug'ınday etip a'melge asırıwımız kerek. Usınday maqset penen tsilindrdin' tu'bin temperaturası tsilindrdegi gazdin' temperaturasınan to'men bolg'an salqınlatqısh penen jıllılıq kontaktına keltiremiz ha'm 2b1 jolı menen gazdı qısamız. Na'tiyjede gaz da'slepki 1-halga qayıp keledi ha'm usı protsesstin' barısında salqınlatqıshqa Q_2 jıllılıg'ın beredi. Birinshi baslama boyınsha

$$-Q_2 = U_1 - U_2 - A_2.$$

Bunnan $Q_1 = U_2 - U_1 + A_1$ formulası menen kombinatsıyanı paydalansaq

$$Q_1 - Q_2 = A_1 - A_2$$

ekenligi kelip shıg'adı. Solay etip mashina aylanbalı protsessti basınan keshirdi. Usının' na'tiyjesinde qızdırg'ısh Q_1 jıllılıg'ın berdi, salqınlatqısh Q_2 jıllılıg'ın aldı. $Q = Q_1 - Q_2$ jıllılıg'ı $A_1 - A_2$ jumısın islewge jumısaldı.

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$

qatnası jıllılıq mashinasının' *paydalı ta'sir koeffitsienti* yamasa *ekonomikalıq paydalı ta'sir koeffitsienti* dep ataladı.

Salqınlatqıshsız da'wirli ra'wishte isleytug'in jıllılıq mashinasın sog'ıw mu'mkin be degen soraw tuwıladı. Bunday jag'dayda $Q_2 = 0$ ha'm sog'an sa'ykes $\eta = 1$. Bunday mashina qızdırg'ısthan aling'an jıllılıqtı tolıg'ı menen jumısqa aylandırg'an bolar edi. Bunday mashinanın' mu'mkin ekenligi energiyanın' saqlanıw nızamına qayshı kelmeydi ha'm o'zinin' a'meliy a'hmiyeti boyınsha perpetuum mobileden to'men bolmas edi. Bunday jıllılıq mashinası okeanlar menen ten'izlerdin' suwlarındag'ı, atmosferadag'ı, Jerdin' ishki qabatlarındag'ı derlik tewsilmeytug'in ishki energiyanı mexanikalıq energiya'ga aylandırg'an bolar edi. Bunday mashinanı Vilgelm Ostvald (1853-1932) *ekinshi a'wlad perpetuum mobile* dep atadı. Al *birinshi a'wlad perpetuum mobile* bolsa hesh na'rsesiz jumıs islewı kerek. Bul energiyanın' saqlanıw nızamı ta'repinen tolıq biykarlanadı.

Sadi Karnonın' o'zi bunday mashinanın' printsiptallıq jaqtan mu'mkin emes ekenligin tu'sindi. Jıllılıq dvigatellerinin' jumısın ol suw dvigatellerinin' jumısı menen salıstırdı. Bunday dvigatellerde jumıs suwdın' joqaridan to'menge karay tu'siwinin' esabınan islenedi. Usıg'an sa'ykes Karno jıllılıq mashinalarında jumıstın' isleniwi jıllılıqtın' joqarıraq qızdırılğ'an denelerden to'menirek qızdırılğ'an denelerge beriliwinin' saldarınan boladı dep esapladı. Usı analogiya tiykarında S.Karno biz keyinirek tanısatug'ın bir katar durıs juwmaqlarg'a keldi. Sonın' menen birge Karno o'zinin' zamanlasları menen jıllılıq do'retilmeydi de, joq etilmeydi de dep nadurıs tu'sindi (teplorod teoriyası).

Ta'jiriybeler juwmaqları ekinshi a'wlad perpetuum mobilelerdi do'retiwdin' mu'mkin emes ekenligin ko'rsetedi. Sonın' ushın usınday perpetuum mobileni sog'ıwdın' mu'mkin emes ekenligi postulat rangasına ko'terildi. Bul *termodinamikanın' ekinshi nızamının' postuladı* bolıp tabıladı ha'm ta'jiriybede alıng'an na'tiyjelerdi ulıwmalastırıw jolı menen keltirilip shıg'arılğ'an. Bul postulattın' da'lili usı postulattan kelip shıg'atug'ın barlıq na'tiyjelerdin' ta'jiriybeler na'tiyjeleri menen sa'ykes keliwinde bolıp tabıladı. Sonlıqtan termodinamikanın' ekinshi baslamasının' postuladı isenimli eksperimentallıq tiykar u'stinde tur.

Termodinamikanın' ekinshi baslamasının' postulattın' u'sh da'l formulirovkasın keltiremiz:

1. Vilyam Tomson (ilimde qosqan u'lesleri ushın keyinirek lord Kelvin degen attı aldı) 1951-jılı termodinamikanın' ekinshi baslamasının' to'mendegidey anıqlamasın berdi: *«Birden bir na'tiyjesi jıllılıq saqlag'ıshtı salqınlatıw arqalı jumıs isleytug'ın aylanbalı protsesstin' ju'riwi mu'mkin emes»*.

Jıllılıq saqlag'ıshı dep ishki energiya zapasına iye deneni yamasa ishki energiya zapasına iye o'z-ara termodinamikalıq ten' salmaqlıqta turg'an deneler sistemasın tu'sinemiz. Biraq jıllılıq saqlag'ıshın' o'zi makroskopiyalıq jumıs islemeydi, al tek g'ana o'zinin' ishki energiyanı basqa denege yamasa basqa deneler sistemasına beredi. Eger sistema jıllılıq saqlag'ıshın' ishki energiyanı esabınan jumıs isleytug'ın bolsa, onda ol termodinamikada *jumısshı dene (jumıs isleytug'ın dene)* dep ataladı. Solay etip Tomson boyınsha: *«Birden bir na'tiyjesi jıllılıq saqlag'ıshın' ishki energiyanın' esabınan jumıs isleytug'ın aylanbalı protsesstin' ju'riwi mu'mkin emes»*.

2. Sırtqı jumıs islew degenimiz neni an'latatug'ınlıg'ın ha'm tiykarıg'ı postulattın' anıqlamaların qanday jollar menen alıng'anlıg'ın ayqınlastırıw mu'mkin. Sol anıqlamalardıń biri M.Plankke (1858-1947) tiyisli. Onın' ma'nisi to'mendegidey: *«Birden bir na'tiyjesi jıllılıq saqlag'ıshtı salqınlatıw arqalı ju'kti ko'teriw bolğ'an da'wirli ha'reket etetug'ın mashinanı sog'ıw mu'mkin emes»*.

Plank bergen anıqlamadag'ı mashinanın' da'wiriligin atap o'tiw a'hmiyetli na'rse. Tap sol sıyaqlı Tomson anıqlamasında da protsesstin' aylanbalı bolıwı a'hmiyetke iye. Haqıyqatında da birden bir na'tiyjesi ju'kti ko'teriw bolğ'an jıllılıq saqlag'ıshın' ishki energiyanı esabınan isleytug'ın protsesstin' (aylanbalı emes protsesstin') ju'riwi mu'mkin. Plank mınaday misal keltiredi: Meyli porsheni bar tsilindrde ideal gaz jaylasqan bolsın. Porshen u'stinde salmag'ı P bolğ'an ju'k tursın. TSilindrdin' ultanın jetkilikli da'rejede u'lken, al temperaturası ideal gazdan' temperaturasınan sheksiz kishi shamag'a joqarı bolğ'an jıllılıq saqlag'ısh penen tutastıramız. Keyin porshendi sheksiz kishi portsiyalar menen ju'kley baslaymız. Bunday jag'dayda gaz ju'kti ko'terip izotermalıq ra'wishte ken'eye baslaydı ha'm ju'kti ko'teriw boyınsha A jumısın isleydi. Birinshi baslama boyınsha

$$Q = U_2 - U_1 + A.$$

İdeal gazdin' ishki energiyanı tek U tek temperaturadan g'a'rezli bolğ'anlıqtan (izotermalıq protsesste ishki energiya o'zgermeydi) $Q = A$ sha'rti orınlanadı. Solay etip jıllılıq saqlag'ıshın alıng'an Q jıllılıg'ı tolıg'ı menen ju'kti ko'teriw ushın jumsaldı. Bul termodinamikanın' ekinshi baslamasına qayshı kelmeydi, sebebi bul protsess aylanbalı protsess, al mashina da da'wirli ha'reket etetug'ın mashina emes. Eger qanday da bir usıllar menen ju'kti ko'terilgen halda kaldırıp, gazdı bolsa kısıp da'slepki halına alıp kelinetug'ın ha'm porshendi de sırttag'ı barlıq denelerde hesh qanday o'zgeris bolmaytug'ınday etip ornına kaytarıp alıp kelinse (a'llette jıllılıq saqlag'ısh tag'ı jıllılıqtın' kemeygenligin esapqa almaymız) termodinamikanın' ekinshi postuladı menen qarama-qarsılıq payda bolğ'an bolar edi. Sebebi

termodinamikanın' ekinshi baslamasının' postulatu bunday o'zgerislerdi hesh kandy usıl menen a'melge asırıw mu'mkin emes dep tastıyqlaydı.

Plank anıqlaması Tomson anıqlamasınan tek forması menen g'ana o'zgeshe. Endigiden bılay Tomson-Plank protsessi dep birden bir na'tiyjesi jıllılıq saqlag'ıstı salqınlatıw menen jumıs islenetug'ın aylanbalı protsessin' ju'riwi mu'mkin emes dep aytamız. Onda postulat mına tastıyqlawg'a alıp kelinedi: *Tomson-Plank protsessinin' ju'riwi mu'mkin emes.*

Klauzius (1822-1888) 1850-jılı tiykarg'ı postulattın' pu'tkilley basqa anıqlamasın berdi. Ol minaday jag'daydı usındı: «*Jıllılıq to'menirek qızdırılğ'an deneden joqarı qızdırılğ'an deneg'e o'zinshe⁴ o'te almaydı*». Jıllılıq dep bul jerde ishki energiyanı tu'siniw kerek. Bul jerde eki dene jıllılıq kontaktına kelse barlıq waqıtta da jıllılıq ko'birek qızdırılğ'an deneden kemirek qızdırılğ'an deneg'e o'tedi degen kelip shıqpaydı. Bunday etip tastıyqlaw fizikalıq nızamnın' ma'nisin quramaydı, al tek g'ana qaysı deneni ko'birek qızdırılğ'an, al kaysı deneni kemirek qızdırılğ'an dep esaplawg'a g'ana baylanıslı. Jıllılıqtın' o'tiwi (da'liregi ishki energiyanın' bir deneden ekinshi deneg'e o'tiwi) tek jıllılıq kontaktında emes, al basqa da ko'p sandag'ı usıllar menen a'melge asadı. Mısalı barlıq deneler ko'zge ko'rinetug'ın yamasa ko'zge ko'rinbeytug'ın nurlardı (elektromagnit tolqınların) shıg'aradı ha'm jutadı. Bir denenin' nurlanıwın linza yamasa sfaralıq ayna menen ekinshi deneg'e jıynap, usı usıl menen ekinshi deneni qızdırıwıg'a boladı. Biraq barlıq o'tiwler mu'mkin emes. Klauzius postulattının' ma'nisi minadan ibarat: kemirek qızdırılğ'an deneden jıllılıqtı alıp, onı tolıg'ı menen ko'birek qızdırılğ'an deneg'e ta'biyatta basqa hesh kandy o'zgeristi boldırmay alıp beriwdin' hesh qanday usılı joq. Usınday etip alıp beriwdin' kewildegı protsessi *Klauzius protsessi* dep ataladı. Solay etip *Klauzius protsessinin' mu'mkin emes* ekenligin postulat tastıyqlaydı.

Termodinamikanın' ekinshi baslamasına baylanıslı ma'seleler

1. Klauzius A'lemde tuyıq sistema dep qarap termodinamikanın' ekinshi baslamasının' mazmunın «A'lemnin' entropiyası maksimumg'a umtıladı» dep tastıyqlawg'a alıp keldi. Usı maksimumg'a jatken waqıtta A'lemdegi barlıq protsessler toqtaydı. Haqıyqatında da, ha'r bir protsess entropiyanın' o'siwine alıp keledi. Entropiya o'zinin' maksimumına jetkenlikten bunday protsessin' ju'riwi mu'mkin emes. Solay etip Klauzius boyınsha A'lemde en' aqırında absolyut ten' o'lsheuli haldın' ornawı kerek. Bunday halda hesh bir protsessin' ju'zege keliwi mu'mkin emes. Bunday hal «*A'lemnin' jıllılıq o'limi*» dep ataldı. Biraq usınday juwmaq shıg'arıw ushın entropiya tu'sinigin yamasa onın' o'siw nızamın paydalanıp otırıwdın' keregi joq. Haqıyqatında da bul juwmaq pu'tkil A'lem ushın paydalanılğ'an termodinamikanın' ulıwmalıq baslaması bolıp tabıladı. Biraq termodinamikanın' ulıwmalıq baslaması da, entropiyanın' o'siw nızamı da *shekli sistemalarg'a* tiyisli ta'jiriybede aling'an mag'lıwmatlardı ulıwmalastırıw jolı menen keltirilip shıg'arılğ'an. Olardı A'lem ushın qollanıw ekstropolyatsiya bolıp tabıladı. Al bunday ekstropolyatsiya ushın tiykar joq. A'lem bolsa tutası menen u'zliksiz ha'm monotonlı ra'wishte evolyutsiyag'a ushiray aladı ha'm sonın' na'tiyjesinde hesh qashan termodinamikaniq ten' salmaqlıqqa kelmewi mu'mkin. Usınday mu'mkinshilikke Eynshteynnin' gravitatsiya teoriyasında jol qoyıladı: gravitatsiyalıq maydanlardın' bar bolıwının' saldarınan gigant kosmologiyalıq sistemalar u'zliksiz tu'rde entropiyanın' o'siw ta'repine qaray evolyutsiyalanadı. Sonın' menen birge entropiyanın' maksimumı halına hesh kashan da kelmeydi. Sebebi A'lem ushın bunday hal bolmaydı.

A'lemnin' jıllılıq o'limi kontseptsiyasına basqasha sındı Boltsman berdi. Onın' ma'nisi to'mendegilerden ibarat.

Entropiyanı termodinamikalıq ko'z-qarastan anıqlag'anda bul tu'siniktin' termodinamikalıq *ten' salmaqlı emes protsesslerge* paydalang'anda bir qansha qıyınshılıqlarg'a alıp keletug'inlıg'ı ma'lim. Boltsman ta'repinen aling'an $S = k \ln P$ formulası usı qıyınshılıqlardan qutılıwdın' printsipiiallıq usılın beredi. Bul formulag'a *entropiyanın' anıqlaması* sıpatında qaraw lazıw. Biraq bul anıqlamanın' ayqın tu'rdegi ma'nige iye bolıwı ushın za'ru'r bolg'an barlıq jag'daylar ushın hallardın' itimallıqların esaplaw usılları menen tolıqtırıw kerek. Biraq bunı islemesede *entropiyanın' usınday etip tu'singende onın' o'siw nızamının' xarakterinin' pu'tkilley o'zgeretug'inlıg'ı ko'rinip tur. Ol (nızam) o'zinin' absolyutlılıg'ın*

⁴ «O'zinshe» degen so'z ayılğ'anda a'tiraptag'ı basqa denelerde hesh kandy o'zgeristin' bolmawı na'zerde tutıladı.

jog'altadı ha'm statistikalıq nızamg'a aylanadı. Tuyıq sistemanın' entropiyası tek o'se bermeydi, al kemeyde aladı. Eger jetkilikli da'rejede ko'p waqt ku'tip turılsa entropiya haqıyqatında da kemeyedi,. Biraq kemeyiw protsessi bunnan keyin o'siw protsessi menen almasadı. Bunday jag'dayda «termodinamikanın' ekinshi baslamasına ne qaladı?» degen soraw tuwıladı. Onın' fizikalıq ma'nisi neden ibarat? Onın' ma'nisi bilayınsha tu'sindiriledi: qanday da bir haldan keyin basım ko'pshilik jag'dayda bul halg'a qarag'anda itimallıg'ı joqarıraq bolg'an hal ju'zege keledi. Eger sistema u'lken bolsa, al onın' da'slepki halı ten' salmaqıq halına onsha jaqın bolmasa, onda sistemanın' itimallıg'ı kem bolg'an hallarg'a o'tiwinin' itimallılıg'ı sonshama kishi itimallıqqa iye bolıp, praktikada hesh qanday a'hmiyetke iye bolmaydı. Bunday jag'dayda entropiyanın' o'siw nızamı a'melde absolyut da'llikte aqlanadı.

2. Joqarıda Klauzius ta'repinen usınılg'an A'lemnin' jıllılıq o'limi kontsetsiyası ga'p etilgen edi. Bul kontseptsiyag'a Boltsman ta'repinen qarama-qarsı ma'niske iye bolg'an *fluktuatsiyalıq gipoteza* dep atalug'ın kontseptsiya islenip shıg'ıldı. Boltsman termodinamikanın' ekinshi nızamının' pu'tkil A'lem ushın qollanıla alınatug'ınlıg'ın biykarlag'an joq. Biraq termodinamikanın' ekinshi baslaması statistikalıq nızam ha'm usıg'an baylanışlı termodinamikalıq ten' salmaqıqtın' buzılıwına alıp keletug'ın fluktuatsiyalardıń orın alıwınan qashıp bolmaydı. A'lemnin' ha'zirgi waqıtlardag'ı halı ten' salmaqıq hal emes. Bul haldı Boltsman gigant fluktuatsiya dep esapladı. Bul fluktuatsiyanın' jog'alıwı kerek. Bunday jag'dayda A'lemnin' jıllılıq o'limi baslanadı. Biraq bul hal waqıtsha hal bolıp tabıladı. Bazı bir waqt o'tkennen keyin ja'ne de tap sol sıyaqlı gigant fluktuatsiya orın aladı ha'm A'lem jıllılıq o'limi halınan qaytadan shıg'adı. Eger Klauziustın' kontseptsiyası boyınsha jıllılıq o'limi A'lemnin' qayıtıp shıg'a almaytug'ın en' aqırg'ı halı bolsa, Boltsman boyınsha A'lem da'wirli tu'rde jıllılıq o'limi halına keledi ha'm o'zinen o'zi bunday haldan shıg'adı. Biraq birinen son' biri keletug'ın gigant fluktuatsiyalar arasındag'ı waqıtlardıń u'lkenligi sol hallardıń jasaw waqıtlarınan ju'da' u'lken boladı. Sonlıqtan fluktuatsiyalıq gipoteza boyınsha A'lemde «jıllılıq o'limi» halında «derlik barlıq waqt jasaydı» dep esaplaw mu'mkin.

Solay etip fluktuatsiyalıq gipoteza Klauzius kontseptsiyasına tu'p tiykarınan ayırıladı. Biraq sonın' menen birge derlik birdey aqırg'ı juwmaqqa keledi (A'lem «jıllılıq o'limi» halında «derlik barlıq waqt jasaydı»). Sonlıqtan termodinamikanın' ekinshi baslamasını statistikalıq nızam dep qarasaq ta, onı A'lemge ekstrapolıyatsiya kılıwg'a bolmaydı.

3. Termodinamikada entropiya ıqtıyarlı additiv turaqlı da'lligine shekem anıqlanadı. Fizikalıq ma'niske entropiyanın' o'zi emes, al olardıń ayırması iye boladı. Biraq Boltsmannın' $S = k \ln G$ formulası entropiyanı sistemanın' itimallılıg'ı arqalı bir ma'nisli anıqlaydı. Bul bazı bir qarama-qarsılıqtın' bar ekenligindey pikirge alıp keledi. Eger itimallıqtı bir ma'nisli etip anıqlawdın' sha'rt emes ekenligin itibarg'a alsaq, qarama-karsılıq tolıg'ı menen jog'aladı. *Ha'r qanday hallardag'ı itimallıqlardıń o'zleri bir ma'nisli anıqlanbaydı, al sol ha'r qanday hallardag'ı itimallıqlardıń qatnasları bir ma'niske iye boladı.* Sonlıqtan itimallıqlardıń o'zlerinin' ıqtıyarlı additiv turaqlı C da'lligine shekem anıqlanatug'ınlıg'ı kelip shıg'adı⁵. Demek itimallıq ıqtıyarlı additiv turaqlı C da'lligine shekem anıqlanadı. Sanlı ko'baytıwshinin' bar ekenligi S ushın jazılgn formula $\ln C$ additiv turaqlısının' payda bolıwında ko'rinedi.

Eger itimallıq $S = k \ln G$ sha'rti menen normirovkalang'an bolsa, onda ol *matematikalıq itimallıq* dep ataladı. Boltsman formulasın paydalang'anda Plank ta'repinen usınılg'an normirovkanın' paydalang'an qolaylı. Bunday jag'dayda barlıq itimallıqlar (eger olar mu'mkin bolsa) pu'tin sanlar menen an'latılardı. Usınday etip normirovkalang'an itimallıqtı *statistikalıq salmaq* yamasa *haldın' termodinamikalıq itimallıg'ı* dep ataydı. Statistikalıq salmaq biz G ha'ripi menen belgileymiz ha'm Boltsman formulasın $S = k \ln G$ tu'rinde jazamız.

Termodinamikanın' ekinshi baslamasını ha'r qıylı tu'siniw

«Termodinamikanın' ekinshi baslaması» tu'sinigi fizikada shama menen 130 jıldan artıq waqıttan beri qollanıladı. Biraq usı waqıtlarg'a shekem ha'r qıylı avtorlar ha'r kıylı mazmun beredi. Bul ma'sele terminologiyalıq ma'sele bolsa da, usı ma'selege kewil bo'liw paydalı. Ekinshi baslama sıpatında ti-

⁵ Birden bir mu'mkin bolg'an barlıq ha'm bir biri menen sa'ykes kelmeytug'ın waqıyalardıń qosındısı $P_1 + P_2 + \dots + P_n = 1$ etip alıng'anlıqtan bul jag'daydı tu'siniw qıyın emes.

tykarg'ı postulattı qollanatuǵ'ın avtorlar ma'seleni durıs tu'sinedi. Tiykarg'ı postulat degende Tomson-Plank postulattın, Klauzius postulattın ha'm olarg'a ekvivalent bolǵ'an tastıyıqlawlardı tu'sinemiz.

Basqa avtorlar ekinshi baslamanın' ma'nisin tiykarg'ı postulattın' to'mendegidey jag'daylarına alıp keledi: 1) entropiya S tin' hal funktsiyası ekenligine, 2) entropiyanın' o'siw printsipine. Bul eki jag'day logikalıq jaqtan bir birine g'a'rezli emes (T.A.Afanaseva-Erenfest, 1876-1964). Haqıyqatında da S funktsiyasınan' bar ekenligi tiykarg'ı postulattın' anıqlamasında sa'wlelengen ta'biyiy protsesslerdin' qaytımsızlıǵ'ınan pu'tkilley g'a'rezli emes. Bul mınadan ko'rinedi: entropiya S tin' bar ekenliginin' da'lilinin' tiykarına ma'nisi qarama-qarsı bolǵ'an postulattı qoyıw mu'mkin (mısalı «birden bir na'tiyjesi mexanikalıq jumıstın' esabınan jıllılıq saqlag'ıshtı qızdırıw bolǵ'an aylanbalı protsessstın' bolıwı mu'mkin emes»). Entropiyanın' o'siwiniń da'lili bolsa tiykarg'ı postulatqa su'yenedi (og'an karama-qarsı tastıyıqlawǵ'a emes). Eger keri tastıyıqlaw durıs bolatug'ın bolsa adiabatlıq izolyatsiyalang'an isstemanın' entropiyası o'spey, kishireygen bolar edi.

Bir kansha avtorlar Afanaseva-Erenfesttin' mısalınday termodinamikanın' ekinshi baslaması degende tiykarg'ı postulattın' tek bir na'tiyjesin, atap aytqanda entropiyanın' hal funktsiyası sıpatında bar bolatug'ınlıǵ'ın aladı. Bunday tu'siniwge mına jag'day tiykar boladı: termodinamikanın' ekinshi baslamasınan keltirilip shıǵ'arılatug'ın ten'likler tu'rindegi qatnaslar entropiyanın' tek bir qa'siyetin – onın' sheksiz kishi o'siminin' tolıq differentsial bolatug'ınlıǵ'ın paydalanadı.

Termodinamikalıq funktsiyalar

Termodinamikada entropiya menen bir katarda usı entropiya menen baylanısqa ko'p sandag'ı hal funktsiyaları qollanıladı. Olardıń en' baslıların karap o'temiz.

Eger protsess kvazistatikalıq bolsa $\delta Q = TdS$. Bunday protsess ushın birinshi baslamanın' ten'lemesi

$$\delta Q = dU + PdV \quad (q1)$$

nı bılayınsha ko'shirip jazamız

$$dU = TdS - PdV. \quad (q2)$$

Eger entalpiya $I = U + PV$ nı paydalansaq, onda U dı jog'altıp

$$dI = TdS + VdP \quad (q3)$$

ekenligine iye bolamız.

$TdS = \delta Q$ bolǵ'anlıqtan turaqlı basımda $dI = \delta Q$. Bunnan entalpiyanın' turaqlı basımdag'ı kvazistatikalıq protsesste o'simi sistema ta'repinen alıng'an jıllılıq Q g'a ten' bolǵ'an hal funktsiyası ekenligi kelip shıǵ'adı. Usıǵ'an baylanıslı entalpiyanı *jıllılıq funktsiyası* yamasa *jıllılıq saqlaw* dep te ataydı.

Termodinamikada ayırıqsha a'hmiyetli orınlardı eki hal funktsiyası iyeleydi: Gelmgolts ta'repinen kirgizilgen *erkin energiya* Ψ ha'm Gibbs ta'repinen kirgizilgen *termodinamikalıq potentsial* Φ . Bul hal funktsiyaları to'mendegidey an'latpalar menen anıqlanadı

$$\Psi = U - TS, \quad (q4)$$

$$\Phi = \Psi + PV = U - TS + PV. \quad (q5)$$

Olardıń differentsialları ushın alamız:

$$d\Psi = -SdT - PdV, \quad (q6)$$

$$d\Phi = -SdT + VdP. \quad (q7)$$

İzotermalıq protsesste $dT = 0$, sonlıqtan $d\Psi = -PdV = \delta A$. Bunnan $A = \Psi_1 - \Psi_2$. Demek erkin energiya hal funktsiyası bolıp tabıladı, onın' kvazistatikalıq izotermalıq protsesstege kemeyiwı sistema ta'repinen islengen jumıstı beredi.

(q2), (q3), (q6), (q7) qatnasları U ishki energiyanı S ha'm V argumentlerinin', I entalpiyanı S ha'm P argumentlerinin', Ψ erkin energiyanı T ha'm V argumentlerinin', Φ termodinamikalıq potentsialın T ha'm P argumentlerinin' funktsiyaları tu'rinde karaw mu'mkin degen oyg'a alıp keledi:

$$U = U(S, V), \quad (q8)$$

$$I = I(S, P),$$

$$\Psi = \Psi(T, V),$$

$$\Phi = \Phi(T, P).$$

Usınday tu'rdegi (a'wlad) qatnaslar zat halının' *kanonikalıq ten'lemeleri* dep ataladı. Olar termodinamikag'a Gibbs ta'repinen sistemalı tu'rde kirgizildi. Gibbs usı kanonikalıq ten'lemelerdin' ha'r qaysısı zatların' qa'siyetleri haqqında termo yamasa kaloriyalıq hal ten'lemelerine qarag'anda bayıraq informat-siyalardı beretug'ınlıg'ın atap o'tti. (q8) *de keltirilgen qaysı formada aling'anlıg'ına karamastan kanonikalıq hal ten'lemeleri zattın' jıllılıq (termikalıq) ha'm kaloriyalıq qa'siyetleri haqqında tolıq mag'lıwmatlarg'a iye boladı*. Haqıyqatında da (q8) den to'mendegilerdi alamız:

$$\begin{aligned} dU &= \left(\frac{\partial U}{\partial S} \right)_V dS + \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_S dV, \\ dI &= \left(\frac{\partial I}{\partial S} \right)_P dS + \left(\frac{\partial I}{\partial P} \right)_S dP, \\ d\Psi &= \left(\frac{\partial \Psi}{\partial T} \right)_V dT + \left(\frac{\partial \Psi}{\partial V} \right)_T dV, \\ d\Phi &= \left(\frac{\partial \Phi}{\partial T} \right)_P dT + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial P} \right)_T dP. \end{aligned} \quad (q9)$$

Bul qatnaslardı (q2), (q3), (q6) ha'm (q7) an'latpaları menen salıstırıw to'mendegilerdi beredi:

$$T = \left(\frac{\partial U}{\partial S} \right)_V, \quad P = - \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_S \quad (q9)$$

$$T = \left(\frac{\partial I}{\partial S} \right)_P, \quad V = \left(\frac{\partial I}{\partial P} \right)_S, \quad (q10)$$

$$S = - \left(\frac{\partial \Psi}{\partial T} \right)_V, \quad P = - \left(\frac{\partial \Psi}{\partial V} \right)_T, \quad (q11)$$

$$S = - \left(\frac{\partial \Phi}{\partial T} \right)_P, \quad V = - \left(\frac{\partial \Phi}{\partial P} \right)_T. \quad (q12)$$

Keltirilip shıg'arılğ'an ten'lemelerdin' kelip shıg'atug'ın eki jag'daydı atap o'temiz: Ψ ha'm Φ funktsiyalarının' anıqlamalarınan $U = \Psi + TS$, $I = \Phi + TS$ ekenligi kelip shıg'adı. Usı an'latpalarg'a (q11) ha'm (q12) an'latpalarınan entropiya ushın an'latpalardı qoyıp mına formulalardı alamız

$$U = \Psi - T \left(\frac{\partial \Psi}{\partial T} \right)_V, \quad (q13)$$

$$I = \Phi - T \left(\frac{\partial \Phi}{\partial T} \right)_P. \quad (q14)$$

Bul ten'lemeler *Gibbs-Gelmgolts* ten'lemeleri dep ataladı. Usı ten'lemelerden alınatug'ın paydını atap o'temiz. Ko'p jag'daylarda Ψ erkin energiyasın tek temperaturag'a g'a'rezli bolg'an qosımsha da'lliginde an'sat anıqlawg'a boladı. Bunı sistema ta'repinen islenetug'ın izotermalıq jumıstı esaplaw arqalı a'melge asıradı. Bunday jag'dayda (q13) formulası tap sonday anıqsızlıqta sistemanın' ishki energiyasın esaplawg'a da mu'mkinshilik beredi.

Eger $U=U(S,V)$ funktsiyası belgili bolsa, onda onı S ha'm V boyınsha differentsiallaw arqalı sistemanın' temperaturası menen basımın anıqlaw mu'mkin (yag'nıy termo qa'siyetler haqqında tolıq mag'lıwmatlar alıwg'a boladı). Bunnan keyin (q1) formulası ja'rdeminde δQ dı ha'm sa'ykes jıllılıq sıyımlılıqların anıqlawg'a boladı. Bunday jag'dayda kaloriyalıq qa'siyetler haqqında tolıq mag'lıwmatlar alınadı. Tap sonday esaplawlardı qalg'an u'sh kanonikalıq hal ten'lemelerinen de alıw mu'mkin.

Endi (q9) qatnasların ja'ne bir ret differentsiallaw arqalı tabamız:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial V} \right)_S = \frac{\partial^2 U}{\partial S \partial V}, \left(\frac{\partial P}{\partial S} \right)_V = - \frac{\partial^2 U}{\partial V \partial S}.$$

Bunnan matematikalıq analizdin' belgili bolg'an differentsiallawdın' ta'rtibin o'zgertiw haqqındag'ı teoremedan

$$\left(\frac{\partial T}{\partial V} \right)_S = - \left(\frac{\partial P}{\partial S} \right)_V$$

ekenligi kelip shıg'adı. Tap sol sıyaqlı

$$\left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_S = \left(\frac{\partial V}{\partial S} \right)_P, \quad (q16)$$

$$\left(\frac{\partial S}{\partial V} \right)_T = \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_V, \quad (q17)$$

$$\left(\frac{\partial S}{\partial P} \right)_T = - \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P. \quad (q18)$$

Usı ha'm usıg'an uqsas katnaslar *Maksvell qatnasları* dep ataladı. Bul qatnaslar sistemanın' termodinamikalıq ten' salmaqlıq halın xarakterlewshi shamalar arasındag'ı qatnaslardı keltirip shıg'arıw ushın ken'nen qollanıladı. Keltirip shıg'arıwdın' usınday usılın (metodın) *termodinamikalıq funktsiyalar usılı* yamasa *termodinamikalıq potentsiallar* usılı dep ataladı. Bunı tu'sindiriw ushın eki mısıl keltiremiz:

1-mısıl. SHeksiz kishi kvazstatikalıq izotermalıq protsesstı qaraymız. (q2) qatnasın dV g'a bo'lip

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T = T \left(\frac{\partial S}{\partial V} \right)_T - P$$

an'latpasın alamız yamasa (q17) den mınag'an iye bolamız:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = T\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T - P. \quad (q19)$$

2-misal. Usınday protsess ushın dP g'a bo'liw arqalı (q3) ten

$$\left(\frac{\partial I}{\partial P}\right)_T = T\left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T + V,$$

al (q18) tiykarında

$$\left(\frac{\partial I}{\partial P}\right)_T = V - T\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P \quad (q20)$$

an'latpaların alamız. Bunday an'latpalardı basqa da usıllar menen alıw mu'mkin (mısalı tsikller usılı). Biraq termodinamikalıq funktsiyalar usılı basqa usıllarg'a salıstırğ'anda a'piwayıraq.

Ga'p etilgen I, Ψ ha'm Φ funktsiyaları *eki erkinlik da'rejesine iye* sistemalar ushın alıng'an edi (yag'nıy ishki halları eki parametr menen anıqlanatug'ın sistemalar). Joqarıda aytlıg'anlardı esapqa alıp sol an'latpalardı *ko'p sandlı erkinlik da'rejesine iye sistemalar* ushın da ulıwmalastırıwg'a boladı. Bunın' ushın barlıq an'latpalardag'ı $\delta A = PdV$ an'latpasın $\delta A = A_1dA_1 + A_2dA_2 + \dots + A_ndA_n$ an'latpası menen almasıw kerek. Sonda to'mendegidey anıqlamalar alınadı:

$$I = U + \sum A_i a_i \text{ (entalpiya),} \quad (q21)$$

$$\Psi = U - TS \text{ (erkin energiya)} \quad (q22)$$

$$\Phi = \Psi + \sum A_i a_i \text{ (termodinamikalıq potentsial)} \quad (q23)$$

Ca'ykes funktsiyalardıń differentsialları ushın iye bolamız:

$$dU = TdS - \sum A_i da_i, \quad (q24)$$

$$dI = TdS + \sum a_i dA_i, \quad (q25)$$

$$d\Psi = -SdT - \sum A_i da_i, \quad (q26)$$

$$d\Phi = -SdT + \sum a_i dA_i. \quad (q27)$$

Ten' salmaqlıq fluktuatsiyalar

Termodinamikalıq sistemanın' ten' salmaqlıq halların statistikalıq ta'riplew tarqalıw funktsiyası tiykarında onın' halının' makroskopiyalıq parametrlerin anıqlawg'a mu'mkinshilik beredi. Biraq qa'legen, ha'tte ten' salmaqlı sistemada, usınday orta ma'nislerden tosınnan bolatug'ın awıtqıwlar bolıp turadı. Bunday awıtqıwlardı eksperimentlerde sistemanın' halın ko'p waqıtlar dawamında o'lshewlerdin' barısında baqlaw mu'mkin. Mısalı gazdın' u'lken emes ko'leminin' temperaturasını joqarı da'llikte uzaq waqıtlar dawamında o'lshewlerdin' barısında ha'tte sırtqı jıllılıq ta'sirleri bolmag'anda da temperaturanın' tosınnan kishi shamalarg'a o'zgeretug'inlig'ı baqlanadı. Basımın' tosınnan o'zgerislerinin' bolatug'inlig'ın ortalıqtatıw bo'lekshelerdin' xaotikalıq qozg'alısları (bunı broun qozg'alısı dep ataymız) ko'rsetedi.

Sistema halının' termodinamikalıq parametrlerinin' ortasha ma'nisinen tosınnan awıtqıwı *fluktuatsiyalar* dep ataladı. Fluktuatsiyalar termodinamikalıq sistemanın' bo'lekshelerinin' xaotikalıq jıllılıq qozg'alıslarının' sebebinen boladı. Biz bul paragrafta ten' salmaqlıq sistemadag'ı fluktuatsiyalardı karap o'temiz. Bunday fluktuatsiyalar *ten' salmaqlıq fluktuatsiyaları* dep ataladı.

Meyli sistemanın' ten' salmaqlıq halı bazı bir χ parametri menen ta'riplenetug'ın bolsın. Onın' ortasha ma'nisi $\langle \chi \rangle$ g'a ten'. Bunday jag'dayda usı parametrdin' fluktuatsiyası onın' ma'nisinin' ortasha ma'nisten awıtqıwı tu'rinde anıqlanadı:

$$\Delta x = x - \langle x \rangle. \quad (1)$$

(1) formuladan fluktuatsiya $\langle x \rangle$ tın' ortasha ma'nisinin' nolge ten' ekenligi ko'rinedi:

$$\langle \Delta x \rangle = \langle x - \langle x \rangle \rangle = \langle x \rangle - \langle x \rangle = 0. \quad (2)$$

Fluktuatsiyalardın' shamasın sanlıq jaqtan bahalaw ushın x parametrinin' awısıwının' ortasha kvadratın' onın' ortasha ma'nisinin' awıtqıwın paydalanıwg'a boladı:

$$\langle (\Delta x)^2 \rangle = \langle (x - \langle x \rangle)^2 \rangle = \langle x^2 \rangle - 2\langle x \rangle \langle x \rangle + \langle x \rangle^2 - \langle x \rangle^2. \quad (3)$$

Tap usınday formulanı qa'legen $\varphi(x)$ funktsiyasının' fluktuatsiyanın' ortasha kvadratı $\Delta \varphi(x) = \varphi(x) - \langle \varphi(x) \rangle$:

$$\langle (\Delta \varphi(x))^2 \rangle = \langle (\varphi(x))^2 \rangle - \langle \varphi(x) \rangle^2. \quad (4)$$

Fluktuatsiyalardı sanlıq jaqtan bahalaw ushın ortasha kvadrattan aling'an kvadrat tu'bir ken' qollanıladı. Bul shama $\sqrt{\langle (\Delta \varphi)^2 \rangle}$ bolıp tabıladı ha'm ortasha kvadratlıq fluktuatsiyalar dep ataladı. Onın' ortasha ma'niske qatnası $\sqrt{\langle (\Delta \varphi)^2 \rangle} / \langle \varphi \rangle$ ortasha kvadratlıq salıstırmalı fluktuatsiya dep ataladı.

Joqarıda keltirilgen barlıq ortasha ma'nislerdi esaplag'anda belgili bolg'an $\langle \varphi(x) \rangle = \int_a^b \varphi(x) f(x) dx$ formulasınan paydalanıw mu'mkin. Bul formula termodinamikalıq sistemanın' qa'legen parametrlerinin' ortasha ma'nisin tabıwg'a mu'mkinshilik beredi (eger onın' dinamikalıq parametrlerinin' tarqalıw funktsiyası belgili bolsa). Al termodinamikalıq sistemanın' ten' salmaqlıq halı ushın tarqalıw funktsiyasın tabıw ma'selesı jetkilikli ulıwmalıq jag'daylarda sheshiliwi mu'mkin. Usınday tarqalıw funktsiyaları ushın mısıl retinde Maksvell-Boltsman ha'm Gibbs tarqalıw funktsiyaların ko'rsetiwge boladı.

Solay etip ten' salmaqlıq hallardı statistikalıq ta'riplew tek g'ana sistemanın' termodinamikalıq parametrlerinin' ortasha ma'nislerin anıqlawg'a mu'mkinshilik berip qoymay, onın' fluktuatsiyaların da tabıwg'a mu'mkinshilik beredi.

Joqarıda aling'an an'latpalardı bir atomlı ideal gazdin' kinetikalıq energiyasının' fluktuatsiyaların esaplawg'a qollanamız. Belgili $\langle \varphi(x) \rangle = \int_a^b \varphi(x) f(x) dx$ ha'm $F_E(E_K) = \frac{2\pi}{(\pi kT)^{3/2}} \sqrt{E_K} \exp\left(-\frac{E_K}{kT}\right)$ formulalarına sa'ykes molekulanın' kinetikalıq energiyasının' ortasha ma'nisi mına formula ja'rdeminde anıqlanadı:

$$\langle E_K \rangle = \frac{2\pi}{(\pi kT)^{3/2}} \int_0^\infty E_K^{3/2} \exp\left(-\frac{E_K}{kT}\right) dE_K = \frac{3}{2} kT. \quad (5)$$

Al usı energiyanın' kvadratının' ortasha ma'nisi mına tu'rge iye boladı:

$$\langle E_K^2 \rangle = \frac{2\pi}{(\pi kT)^{3/2}} \int_0^\infty E_K^{5/2} \exp\left(-\frac{E_K}{kT}\right) dE_K = \frac{15}{2} (kT)^2. \quad (6)$$

Bunday jag'dayda kinetikalıq energiyanın' fluktuatsiyaların' ortasha kvadratı (4)-formulag'a sa'ykes mınag'an ten':

$$\langle (E_K)^2 \rangle = \frac{15}{2} (kT)^2 - \frac{9}{2} (kT)^2 = \frac{3}{2} (kT)^2. \quad (7)$$

Endi ulıwmalıraq jag'daydı qarap o'temiz. Meyli ideal gaz molekulasına sırttan ku'sh maydanı ta'sir etetug'in bolsın ha'm onın' tarqalıw funksiya'sı Maksvell-Boltsman tarqalıwı

$$f(\mathbf{r}, \mathbf{v}) = \frac{1}{\Theta} \exp\left(-\frac{E_p(\mathbf{r}) + E_K(\mathbf{v})}{kT}\right) \quad (8)$$

menen ta'riplensin bolsın: Bunday jag'dayda molekulanın' tolıq energiyasının' ortasha ma'nisi mınag'an ten' boladı:

$$\langle E \rangle = \frac{1}{\Theta} \int_{rv} E \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dV_{rv}, \quad (9)$$

al bul energiyanın' kvadratının' ortasha ma'nisi sa'ykes

$$\langle E^2 \rangle = \frac{1}{\Theta} \int_{rv} E^2 \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dV_{rv}. \quad (10)$$

Bul jerde $dV_{rv} = dV dV_v$ arqalı koordinatalar ha'm tezlikler ken'isligindeki elementer ko'lem belgilengen.

Θ shaması normirovka sha'rtinen anıqlanadı ha'm mına tu'rge iye boladı

$$\left(\Theta = \iint_{V_v V} \exp\left(-\frac{E_p(\mathbf{r}) + E_K(\mathbf{v})}{kT}\right) dV dV_v \right):$$

$$\Theta = \int_{V_{rv}} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dV_{rv}. \quad (11)$$

(11)-an'latpanın' temperatura T boyınsha tuwındısın tabamız:

$$\frac{d\Theta}{dT} = \frac{1}{kT^2} \int_{V_{rv}} E \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dV_{rv} = \frac{\Theta \langle E \rangle}{kT^2}. \quad (12)$$

(9) ni temperatura T bo'yinsha differentsiallasaq:

$$\begin{aligned}\frac{d\langle E \rangle}{dT} &= -\frac{1}{\Theta^2} \frac{d\Theta}{dT} \int_{V_{rv}} E \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dV_{rv} + \frac{1}{\Theta} \frac{1}{kT^2} \int_{V_{rv}} E^2 \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dV_{rv} = \\ &= \frac{1}{kT^2} \langle E \rangle^2 + \frac{1}{kT^2} \langle E^2 \rangle\end{aligned}\quad (13)$$

yamasa

$$\langle E^2 \rangle - \langle E \rangle^2 = kT^2 \frac{d\langle E \rangle}{dT}.\quad (14)$$

(14)-an'latpa aling'anda (9)-, (10)- ha'm (12)-formulalar paydalanilg'an.

Onda (4) ten'ligine sa'ykes sirtqi potentsial maydanda turg'an ideal gazdin' molekulasinin' fluktuatsiyalarinin' ortasha kvadrati ushin an'latpag'a iye bolamiz:

$$\langle (dE)^2 \rangle = kT^2 \frac{d\langle E \rangle}{dT}.\quad (15)$$

Joqarida jazilg'an (7)-formulanin' (15)- an'latpanin' dara jag'dayi ekenligin atap o'temiz.

Endi N molekulag'a iye ha'm turaqli ko'lemli iyeldeytug'in ideal gazdin' ishkin energiyasinin' fluktuatsiyalarin esaplawg'a o'temiz. Bunday gaz ushin ishki energiya molekularinin' energiyalarinin' qosindisinin turadi dep esaplawg'a boladi:

$$U = \sum_{i=1}^N E_i\quad (16)$$

Onda ishki energiyanin' ortasha ma'nisi:

$$\langle U \rangle = \sum_{i=1}^N \langle E_i \rangle = N \langle E \rangle,\quad (17)$$

al onin' kvadrati sa'ykes mina formula menen aniqlanadi:

$$\langle U^2 \rangle = \left\langle \left(\sum_{i=1}^N E_i \right)^2 \right\rangle = \sum_{i=1}^N \langle E_i^2 \rangle + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^N \langle E_i \rangle \langle E_j \rangle = N \langle E^2 \rangle + N(N-1) \langle E \rangle^2.\quad (18)$$

(17)-(18) formulalardi esaplag'anımızda ideal gazdin' molekularinin' energiyalarinin' statistikaliq g'a'rezsizligi esapqa alindi. Sonin' menen birge bul jerde qarap atirilg'an gaz ten' salmaqliq halda turipti ha'm onin' molekularinin' barlig'ı birdey ortasha energiyag'a iye boladi dep boljandi.

(17)-(18) formulalar barlıq gazdın' ishki energiyasının' fluktuatsiyasının' kvadratı menen bir molekulanın' energiyasının' fluktuatsiyasının' kvadratı arasındag'ı qatnastı jazıwg'a mu'mkinshilik beredi:

$$\langle U^2 \rangle - \langle U \rangle^2 = N \left(\langle E^2 \rangle - \langle E \rangle^2 \right) \quad (19)$$

yamasa

$$\langle (\Delta U)^2 \rangle = N \langle (\Delta E)^2 \rangle. \quad (20)$$

Keyingi formulag'a molekulanın' fluktuatsiyalarının' kvadratı ushın jazılğ'an (15) ti qoysaq:

$$\langle (\Delta U)^2 \rangle = kT^2 \frac{d\langle U \rangle}{dT}. \quad (21)$$

Bul jerde gazdın' ishkin energiyasının' ortasha ma'nisi ushın jazılğ'an (17) esapqa alıng'an.

Bir atomlı ideal gazdın' ishki energiyası mına formula menen anıqlanadı:

$$\langle U \rangle = \nu C_\nu T. \quad (22)$$

Bul an'latpadag'ı $\nu = \frac{N}{N_A}$ arqalı zattın' mollerinin' sanı belgilengen. $C_\nu = \frac{3}{2}R$ bir atomlı gazdın' mollik jıllılıq sıyımlılıg'ı, N_A Avagadro sanı, R universal gaz turaqlısı. $R = kN_A$ ekenligin esapqa alıp iye bolamız:

$$\langle U \rangle = \frac{3}{2} NkT. \quad (23)$$

(23) ti differentsiallasaq ha'm alıng'an n'a'tiyjeni (21) ge qoysaq mınanı alamız:

$$\langle (\Delta U)^2 \rangle = \frac{3}{2} Nk^2 T^2. \quad (24)$$

Usı an'latpalardı esapqa alıp ishki energiyanın' ortasha kvadrathıq salıstırmalı fluktuatsiyasın mına tu'rde jaza alamız:

$$\frac{\sqrt{\langle (\Delta U)^2 \rangle}}{\langle U \rangle} = \sqrt{\frac{2}{3N}}. \quad (25)$$

Bul formuladan makroskopiyalıq sistemalar ushın $N \gg 1$ bolg'anda ishki energiyanın' salıstırmalı fluktuatsiyalarının' esapqa almasay kishi ekenligi ko'rinip tur.

Ten' salmaqlıq halda fluktuatsiyag'a tek ishki energiya emes, al sistemanın' basqa da termodinamikalıq parametrleri ushıraydı (basım, temperatura, ko'lem, entropiya h.b.). Usı aytlıg'an barlıq

parametrler ushin olardin' salıstırmalı fluktuatsiyalarınin' ma'nisi sistemadag'ı bo'lekshelerdin' sanının' kvadrat tu'birine kerı proportsional:

$$\frac{\sqrt{\langle(\Delta x)^2\rangle}}{\langle x \rangle} \sim \sqrt{\frac{1}{N}}. \quad (26)$$

Bul formulada proportsionallıq koeffitsienti shama menen birge ten'.

(26)-formulanı tek g'ana ten' salmaqlıq hallardı talqılag'anda g'ana paydalanıw mu'mkin. Ten' salmaqlıq halg'a alıs hallar jag'dayında (mısalı suyıqlıq-gaz fazalıq o'tiwindegi kritikalıq noqatta yamasa sistemag'a joqarı intensivliktegi sırtqa ta'sirler ta'sir etken jag'dayda) fluktuatsiyalar a'dewir o'sedi ha'm olardin' shamaları fluktuatsiyalanatug'in parametrlerdin' shamaları menen barabar bolıp qaladı. Bunday termodinamikalıq sistemalardag'ı fluktuatsiyalar qaytımlı emes protsesslerdin' ju'riw xarakterin anıqlaydı ha'm olardin' teoriyasın islep shıg'ıw ten' salmaqlıq emes termodinamikanın' ma'selesı bolıp tabıladı.

Ma'sele: Gazdin' bir moli bar gaz termometrindagi temperaturanın' salıstırmalı ten' salmaqlıq fluktuatsiyalarınin' shamasın bahalan'ız.

SHeshimi: Gazdin' bir moli Avagadro sanına ten' molekulag'a iye boladı: $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$. (26)-formulag'a sa'ykes qarap atırıl'gan gaz termometri ushin temperaturanın' salıstırmalı fluktuatsiyalarınin' ma'nisi minag'an ten':

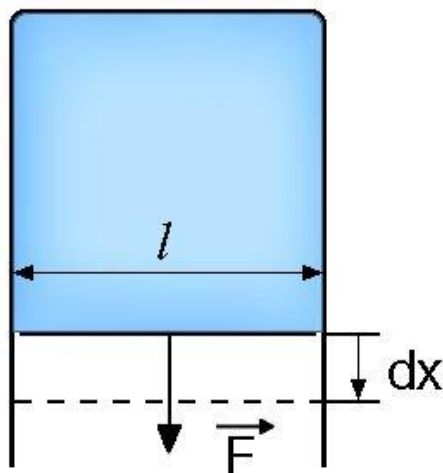
$$\frac{\sqrt{\langle(\Delta T)^2\rangle}}{\langle T \rangle} \sim \sqrt{\frac{1}{N_A}} = 1,3 \cdot 10^{-12}.$$

A'llette, usınday kishi fluktuatsiyalardı registratsiyalaw a'meliy jaqtan mu'mkin emes.

Gaz, suyıqlıq ha'm qattı deneler arasındag'ı shegarada baqlanatug'in qubılıslar

Ta'jiriybeler suyıqlıqlardın' betinin' mu'mkin bolg'anınsha kishi maydang'a ten' etiwge umtılatug'inlig'in ko'rsetedi. Bul qubılıs suyıqlıqtın' betine mexanikalıq ku'shlerdin' ta'sir etiwinin' saldarı bolıp, bul mexanikalıq ku'shler bettin' maydanın kishireytiwge tırsadı. Usınday ku'shler *bet kerimi ku'shleri* dep ataladı.

Suyıqlıq penen gaz arasındag'ı shegarada payda bolatug'in qubılıslardı karap o'temiz. Meyli suyıqlıqtın' plenkası bar bolsın (mısalı sabınlı suwdın' plenkası), ol plenka bir ta'repi qozg'alatug'in sim ramka menen kerip turılatusın (su'wrette keltirilgen).



Suyıq plenkalı ramka

Bet keriwi ku'shlerinin' esabınan plenka o'zinin' maydanın kishireytiwge umtıladı. Bul ku'shke kesent jasaw ushın ramkanın' qozg'alıwshı ta'repine (qozg'alıwshı sımg'a) F ku'shi menen ta'sir etiwimiz kerek. Ta'jiriybeler bul ku'shtin' shamasının' plenkanın' bet maydanına g'a'rezsiz ekenligin, al sol ta'reptin' uzınlıg'ı l ge proporsional ekenligin ko'rsetedi:

$$F = 2\sigma l. \quad (1)$$

Proporsionalıq koeffitsienti σ *bet kerimi (bet kerimi koeffitsienti)* dep ataladı. (1)-formuladag'ı 2 sanı suyıqlıqtın' plenkasının' eki betke iye bolatug'ınlıg'ına baylanıslı payda bolg'an. Sebebi plenkanın' qalın'lıg'ı molekular arasında g'ı qashıqlıqtan u'lken bolsa eki bettin' de qozg'alıwshı sımg'a bir birinen g'a'rezsiz ta'sir etiwı orın aladı. A'llette F ku'shi bet kerimi ku'shine ten' ha'm sonlıqtan (1)-formuladan *bet kerimi ku'shinin' san jag'ınan bet kerimi σ menen plenka menen simnın' kontaktı sıızıg'ının' eki uzınlıg'ı 2l ge ko'beymesine ten'*. Bul ku'sh plenkanın' betine tu'sirilgen urınba bag'ıtında boladı.

Qozg'alıwshı simdı a'ste-aqırınlıq penen dx shamasına ko'shirsek plenkanın' beti

$$dS_{\text{bet}} = 2l dx. \quad (2)$$

shamasına o'sedi. A'ste-aqırınlıq penen ko'shiriw protsessti izotermalıq ha'm kvazistatikalıq (qaytımlı) dep qaraw ushın za'ru'r.

(1)-formula tiykarında bet kerimi ku'shlerine qarsı islengen jumıs $\delta A'$ bılayınsha anıqlanadı:

$$\delta A' = F dx = 2\sigma l dx = \sigma dS_{\text{get}} \quad (3)$$

Usıg'an sa'ykes bet kerimi ku'shleri ta'repinen islengen jumıs $dA = dA'$ mına tu'rge iye boladı:

$$\delta A = -\sigma dS_{\text{get}}. \quad (4)$$

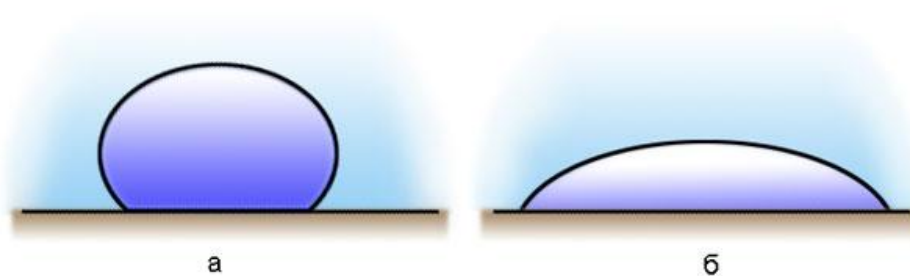
(3) *ten bet keriminin' sanlıq jaqtan bettin' maydanın qaytımlı izotermalıq protsesste bir birlikke u'lkeytiw ushın islengen jumısqa ten' ekenligi kelip shıg'adı*. Bul jumıs suyıqlıqtın' betinin' energiyasının' o'siwi ushın jumısaladı (*erkin betlik energiyanın' o'siwi ushın jumısaladı*). Demek *bet kerimi sanı jag'ınan salıstırmalı erkin bet energiyasına ten'*.

Erkin betlik energiyanın' bar bolıwı suyıqlıqtın' molekuları arasında g'ı tartısıw ku'shinin' bar ekenliginin' na'tiyjesi. Usınday ku'shlerdin' tasirinde bet qatlamındag'ı molekular suyıqlıqtın' ishine tartıladı, al suyıqlıqtın' ishinde jaylasqan molekular ushın ten' ta'sir etiwshi tartılıs ku'shinin' shaması nolge ten'. Tap usınday jag'day Van-der-Vaals gazinde de orın aladı. Al bul o'z gezeginde gazdın' ıdıs-tın' diywalına tu'siretug'ın basımın azaytadı. Suyıqlıqta da molekular arasında g'ı tartılıs ku'shleri onın' betine tu'siretug'ın basımın azaytadı.

Molekular aralıq ku'shlerdi jen'iw ushın gaz molekulası ustinen jumıs islew kerek. Bul jumıs molekulanı suyıqlıqtın' ishinen onın' betine shıg'arg'anda islengen jumısqa ten'. Bul jumıstın' san shaması molekulanın' potentsial energiyasının' o'simine ten' bolıp, tap usı jumıstın' o'zi bet kerimi ku'shlerinin' payda bolıwına alıp keledi. Betlik qatlamdag'ı molekuların' sanı bettin' maydanına proporsional bolg'anlıqtan, barlıq molekuların' erkin energiyası da (erkin betlik energiya) bettin' maydanına tuwrı proporsional.

Gravitatsiyalıq tartısıw yamasa basqa da sırtqı ku'shler bolmag'anda suyıqlıqtın' berilgen ko'lemine sa'ykes keliwshi bettin' maydanı minimallıq ma'nisine iye boladı (salmaqsızlıq jag'daylarında suyıqlıq tamshılarnın' shar ta'rizli formag'a iye bolatug'ınlıg'ın eske tu'siremiz, sonın' menen birge sabın ko'bigi de salmag'ının' kishi bolg'anlıg'ı sebepli derlik shar ta'rizli formag'a iye boladı).

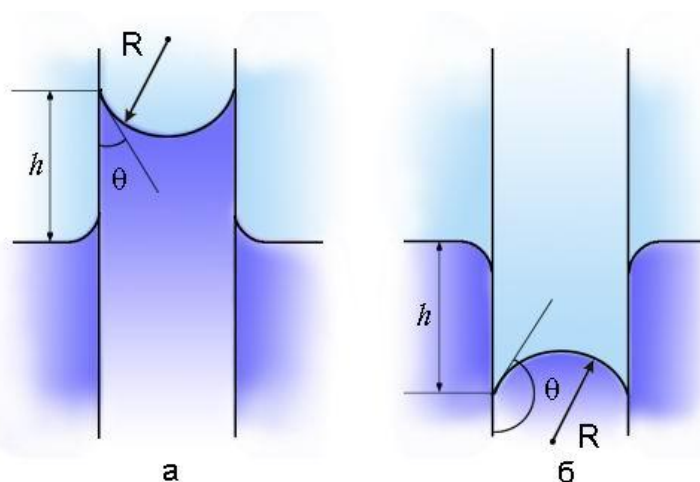
Endi qattı denenin' betindegi suyuqlıqtın' tamshısının' kandy awhallarda bolatug'ınlg'ın karap o'temiz. Bul jag'dayda fazalar arasındag'ı u'sh shegara boladı: gaz-suyıqlıq, suyuqlıq-gaz, gaz-qattı dene. Suyıqlıq tamshısının' qa'siyetleri (povedeniyesi) ko'rsetilgen shegaradag'ı bet keriminin' shaması menen anıqlanadı (erkin betlik energiyanın' salıstırmalı shamarı menen). Suyıqlıq penen gazdın' shegarasındag'ı bet kerim ku'shleri tamshıg'a sferalıq forma beriwge tırsadı. Bul jag'day eger suyuqlıq penen qattı dene arasındag'ı bet kerimi gaz benen qattı dene arasındag'ı bet keriminen u'lken bolg'an jag'dayda orın aladı. (a su'wrette keltirilgen). Bul jag'dayda suyuqlıq tamshını sferag'a tartıw protsessi suyuqlıq-qattı dene shegarasınin' bet maydanın kishireytiwge alıp keledi ha'm usınin' menen bir waqıtta gaz-suyıqlıq shegarasınin' bet maydanı u'lkeyedi. Bunday jag'daylarda qattı denenin' betine suyuqlıqtın' *juqpaytug'ı* orın aladı. Tamshının' forması bet kerimi ku'shleri menen salmaq ku'shinin' ten' ta'sir etiwshisi menen anıqlanadı. Eger tamshı u'lken bolsa bette «jalpayadı», al kishi bolsa shar ta'rizli formag'a iye boladı.



Qattı denenin' betindegi tamshışın' ha'r qıylı formaları - (a) juqpaytug'ın ha'm (b) jug'atug'ın suyuqlıqlar.

Eger suyuqlıq pene qattı denenin' shegarasındag'ı bet kerimi gaz benen qattı dene arasındag'ı bet keriminen kishi bolsa, onda tamshı gaz-qattı dene shegarasınin' betinin' maydanın kishireytiwge umtıladı, yag'niy suyuqlıq tamshısı qattı denenin' betinde jayıladı (b su'wret). Bul jag'dayda qattı denenin' betine suyuqlıqtı jug'adı dep esaplaymız.

Qattı denenin' betine suyuqlıqtın' jug'ıwı yamasa juqpaytug'ı *kapıllıy efekt* dep atalatug'ın effektin' ju'zege keliwine alıp keledi. Kapıllıy dep ishine suyuqlıq kuyılğ'an ıdıska salıng'an jin'ishke naydı tu'sinemiz. Kapıllıy efekt suyuqlıqtın' nay diywalına jug'atug'ınlg'ına yamas juqpaytug'ınlg'ına baylanışlı kiplıy ishinde suyuqlıq oyıq yamasa do'n'es formanı aladı. Birinshi jag'dayda suyuqlıqtın' ishindegi basım sırtqı basımg'a salıstırg'anda kishireyedi ha'm suyuqlıq kapıllıyın' ishinde joqarıg'a ko'teriledi (a su'wret). Al ekinshi jag'dayda basım u'lkeyedi, al bul o'z gezeginde kapıllıyadag'ı suyuqlıqtın' qa'dinin' ıdıstıg'ı suyuqlıqtın' qa'ddine salıstırg'anda to'menlewine alıp keledi (b su'wret).



Jug'atug'ın (a) ha'm juqpaytug'ın suyuqlıqlardag'ı kapıllıy

Kapilyardag'ı suıqlıqtın' ko'teriliwi ha'm qosımsha basım potentsial energiya E_p nın' minimum sha'rtinen anıqlanadı:

$$\frac{dE_p}{dh} = 0. \quad (5)$$

Bul an'latpada dh arqalı kapilyardag'ı suıqlıq bag'anasının' elementar o'zgeriwi belgilengen.

TSilindar ta'rizli kapilyardag'ı suıqlıqtın' qa'ddin dh namasına o'zgertiwi ushın salmaq ku'shlerine qarsı minaday jumıs islenedi:

$$\delta A'_{\text{salmaq}} = \rho g h \pi r^2 dh \quad (6)$$

Al bet kerimi esabınan islengen jumıs minag'an ten':

$$\delta A'_{\text{kerim}} = (\sigma_{23} - \sigma_{13}) 2\pi r dh. \quad (7)$$

Bul jerde ρ suıqlıqtın' tıg'ızlıg'ı, g erkin tu'siw tezleniwi, h suıqlıqtın' kapilyardag'ı ko'teriliw biyikligi, r kapilyardın' radiusı, σ_{13} ha'm σ_{23} ler arqalı sa'ykes gaz ha'm kapillyar, suıqlıq ha'm kapillyar aralarındag'ı bet kerimi berilgen. Bunday jag'dayda energiyanın' o'zgeriwi

$$dE_p = \delta A'_{\text{salmaq}} + \delta A'_{\text{kerim}} \quad (8)$$

yamasa

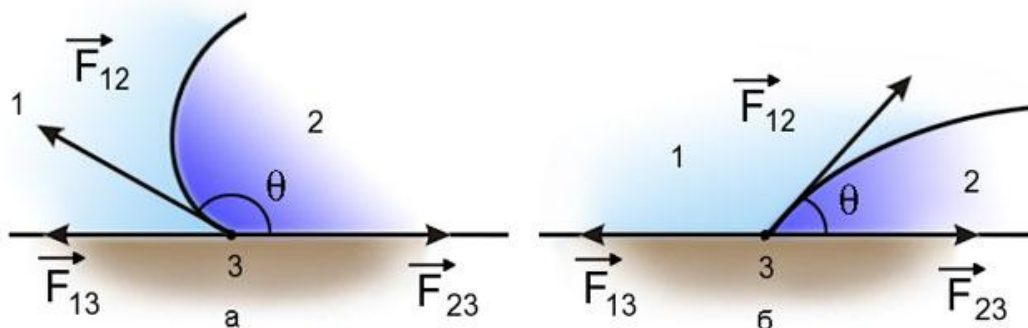
$$dE_p = \rho g h \pi r^2 dh + (\sigma_{23} - \sigma_{13}) 2\pi r dh. \quad (9)$$

Solay etip (5)-sha'rt mina tu'rge iye boladı:

$$\rho g h r^2 + (\sigma_{23} - \sigma_{13}) 2\pi r = 0. \quad (10)$$

Bul anlatpanı mina tu'rge alıp kelemiz

$$\rho g h r - 2\sigma_{12} \cos \theta = 0. \quad (11)$$



Bul an'latpadag'ı σ_{12} gaz benen suyuqlıq arasındag'ı bet kerimi. Bunnan suyuqlıqtın' kapillyar boyınsha ko'teriliw biyikligin anıqlaymız:

$$h = \frac{2\sigma_{12} \cos \theta}{\rho g r}. \quad (12)$$

Bul formuladan $0 < \theta < \pi/2$ de kapillyarda suyuqlıqtın' biyikliginin' o'setug'inlig'ı, al $\pi/2 < \theta < \pi$ bolg'anda to'menleytug'inlig'in ko'remiz.

Suyuqlıqtın' beti ta'repinen payda etiletug'in qosımsha basım ΔP gidrostatikalıq basımdı ten'lestirip turıwı kerek. Sonlıqtan

$$\Delta P = \frac{2\sigma_{12} \cos \theta}{r} \quad (13)$$

yamasa

$$\Delta P = \frac{2\sigma_{12}}{R}, \quad (14)$$

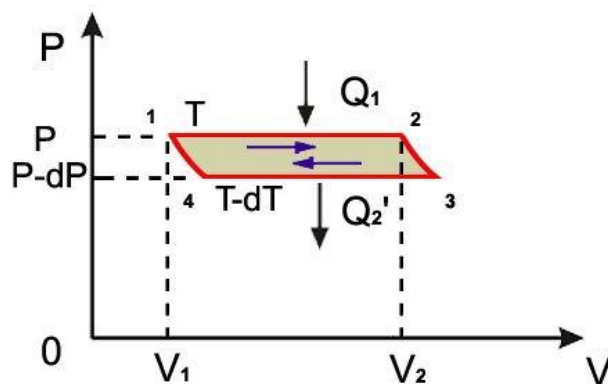
bul jerde suyuqlıqtın' sferalıq betinin' radiusı $R = r/\cos \theta$ paydalanılğ'an (su'wretti qaran'ız). (14)-formula bet *kerimi ushın Laplas formulası* dep ataladı.

Birinshi a'wwlad fazalıq o'tiwleri

Birinshi a'wwlad fazalıq o'tiwlerin ta'riplew ushın fazalıq o'tiw noqatlarındag'ı $P = P(T)$ basımın' temperaturag'a g'a'rezliligin anıqlaw kerek (yag'nıy eki fazanın' ten' salmaqlıq iymekliginin' formasın biliw kerek). Ten' salmaqlı termodinamika usılları bul g'a'rezlilikin' birinshi tuwındısın, yag'nıy ten' salmaqlıq iymeklikin' qıyalıg'ın anıqlawg'a mu'mkinshilik beredi.

Meyli eki fazalı sistemanın' bir fazasına bazı bir Q_1 jıllılıg'ı berilgende zattın' massası M bolg'an bo'legi bir fazadan ekinshi fazag'a o'tetug'in bolsın. Qarap atırılğ'an o'tiw kvazi ten' salmaqlıq bolg'anlıqtan o'tiw barısında basım da, temperatura da turaqlı kaladı, yag'nıy $P = \text{const}$, $T = \text{const}$. Salıstırmalı ko'lem (ko'lemnin' massag'a katnası) birinshi faza ushın v_1 ge, al ekinshi faza ushın v_2 ge ten'. Massası M bolg'an zattın' mug'darı birinshi fazada $V_1 = v_1 M$ ko'lemnin, al ekinshi fazada $V_2 = v_2 M$ ko'lemnin iyeleydi.

Zattın' birinshi fazadan ekinshi fazag'a o'tiwi bazı bir aylanbalı protsesstin' 1-2 ushastkası sıpatında su'wrette keltirilgen. Usınday aylanbalı protsesstin' ja'rdeminde massası M bolg'an zat qaytadan da'slepki birinshi fazag'a qaytarıladı. Bul aylanbalı protsessti Karno tsikli dep qaraymız. Bunday jag'dayda 2-3 ha'm 4-1 protsessler adiabatlıq, al izotermalıq 3-4 protsess zat ekinshi fazadan birinshi fazag'a o'tkendegi jıllılıqtı kaytıp beriwdi ta'ripleydi. 3-4 protsessi P - dP basımında ha'm T - dT temperaturasında a'melge asadı ha'm olardıń shamaları 1-2 protsess ju'retug'in basımın' P , temperaturanın' T ma'nislerine sheksiz jaqın dep esaplaymız.



Birinshi a'wlad fazalıq o'tiwin esaplaw ushin arnalg'an su'wret

Karnonın' birinshi teoreması tiykarında qarap atırılǵ'an tsikldin' paydalı ta'sir koeffitsienti (p.t.k.) ushin mına an'latpanı jazıw ǵalıyız⁶:

$$\eta = \frac{\delta A_{12}}{Q_1} = \frac{T - (T - dT)}{T} = \frac{dT}{T} \quad (1)$$

Bul an'latpadag'ı δA_{12} tsikl barısındag'ı islengen jumıs. Birinshi juwıqlawda (pri pervom priblijenii) dP shamasının' sheksiz kishi ekenligin esapqa alsaq Karnonın' bir tsiklinde islengen jumıs δA_{12} tın' shaması sheksiz kishi biyiklikke iye tuwrı mu'yeshlik bolǵ'an tsikldin' jumısına jaqın dep esaplaymız. Bul Karno tsiklinin' qaptalındag'ı adiabatlardı $V = \text{const}$ vertikal kesindileri menen almasıwıǵ'a mu'mkinshilik beredi (yag'nıy Karno tsiklin biyikligi sheksiz kishi dP g'a ten' tuwrı mu'yeshlik tu'rinde karaymız). Usınday juwıqlawda mınag'an iye bolamız:

$$\delta A_{12} = P(V_2 - V_1) - (P - dP)(V_2 - V_1) = M(v_2 - v_1)dP \quad (2)$$

Birinshi a'wlad fazalıq o'tiwleri sanlıq jaqtan fazalıq o'tiwdin' salıstırmalı jıllılıǵ'ı menen xarakterlenedi. Bul fazalıq o'tiw ushin zattın' bir birlik massasına beriletug'in jıllılıq bolıp tabıladı:

$$q_{12} = \frac{Q_1}{M} \quad (3)$$

Bunday jag'dayda (2)- ha'm (3)- formulalardı esapqa alıp (1) di mına tu'rge keltiriw mu'mkin:

$$\frac{(v_2 - v_1)dP}{q_{12}} = \frac{dT}{T} \quad (4)$$

yamasa

⁶ Karnonın' (birinshi) teoreması: Karno tsikli menen isleytug'in jıllılıq mashinasının' paydalı ta'sir koeffitsienti tek qızdırg'ısh penen salqınlatqıstın' temperaturaları T_1 menen T_2 ge g'ana g'a rezli bolıp, mashinanın' du'zilisine ja'ne paydalanılatug'in jumısshı zattın' ta'biyatına g'a rezli emes.

Karnonın' ekinshi teoreması: Qa'legen jıllılıq mashinasının' paydalı ta'sir koeffitsienti qızdırg'ıshının' ha'm salqınlatqıshının' temperaturaları tap sonday bolǵ'an Karno tsikli menen isleytug'in ideal mashinanın' paydalı ta'sir koeffitsientinen u'lken bola almaydı. YAg'nıy

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \leq \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

$$\frac{dP}{dT} = \frac{q_{12}}{T(v_2 - v_1)}. \quad (5)$$

Bul an'latpa *Klapeyron-Klauzius ten'lemesi* dep ataladı ha'm ol ten' salmaqlıq birinshi a'wlad fazalıq o'tiwindegi o'tiwidin' salıstırmalı jıllılıg'ı, temperaturası, da'slepki ha'm aqırg'ı fazalardıń salıstırmalı ko'lemlerine g'a'rezli basımnan tesperatura boyınsha aling'an tuwındını beredi.

Klapeyron-Klauzius ten'lemesin salıstırmalı termodinamikalıq potentsialdın' ja'rdeminde de alıwg'a boladı. Bunın' ushın eki fazanın' turaqlı termodinamikalıq ten' salmaqlıqta turg'anda olardıń salıstırmalı termodinamikalıq potentsialların' ten'liginen paydalanamız:

$$\varphi_1(P, T) = \varphi_2(P, T)$$

Bul ten'liktin' eki ta'repin de differentziallaymız:

$$d\varphi_1(P, T) = d\varphi_2(P, T) \quad (6)$$

yamasa ($s_2 - s_1 = q_{12}/T$ formulasın qaran'ız)

$$-s_1 dT + v_1 dP = -s_2 dT + v_2 dP. \quad (7)$$

Bul jerde s_1 ha'm s_2 ler arqalı birinshi ha'm ekinshi fazalardıń salıstırmalı entropiyası belgilengen.

(7) den mınag'an iye bolamız:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{s_2 - s_1}{v_2 - v_1}. \quad (8)$$

Zattın' bir fazadan ekinshi fazag'a o'tiwi ten' salmaqlıq protsess dep qaralatug'ın ha'm turaqlı temperaturada ju'retug'ın bolg'anlıqtan salıstırmalı entropiyalardıń ayırmasın mına tu'rde anıqlaw mu'mkin:

$$s_2 - s_1 = \frac{q_{12}}{T}. \quad (9)$$

Bul an'talatpanı (8)-formulag'a qoyıw (5)- Klapeyron-Klauzius ten'lemesi tu'rine alıp keledi.

Klapeyron-Klauzius ten'lemesine sa'ykes dP/dT tuwındısının' belgisi fazalardıń salıstırmalı ko'lemlerinin' qatnasınan g'a'rezli. Eger jıllılıq berilgende suyıqlıq gaz ta'rizli halg'a o'tse salıstırmalı ko'lemnerdin' o'siwi orın aladı ($v_2 > v_1$) ha'm tuwındı $dP/dT > 0$. Sonlıqtan usınday o'tiwlerde basımın' o'siwi qaynaw temperaturasının' ko'teriliwine alıp keledi. Tap usınday g'a'rezlilik ko'pshilik qattı denelerdin' eriwinde de (balqıwında da) baqlanadı (ayırım zatlarda eriw salıstırmalı ko'lemnerdin' kishireyiwi menen ju'redi, yag'nıy $v_2 < v_1$). Usınday zatqa mısıl retinde suwdı keltiriw mu'mkin. Suw qattı haldan (muz halınan) suyıq halg'a o'tkende o'zinin' salıstırmalı ko'lemin kishireytedi. (suwdın' tıg'ızlıg'ı muzdın' tıg'ızlıg'ınan u'lken). Bunday zatlarag'a basım jaqarılğ'anda eriw temperaturasının' to'menlewi ta'n.

Hal diagrammalari

Zatlardın' halların ha'm onın' fazalıq o'tiwlerin grafikalıq ta'riplegende a'dette P ha'm T o'zgeriwshileri qollanıladı. Grafiklerde berilgen zattag'ı fazalıq o'tiwlerdegi ten' salmaqlıq iymeklikleri sıızıladı. P ha'm T o'zgeriwshilerinde sıızılğan diagrammanı *hal diagramması* dep ataydı. Usı diagrammadag'ı ha'r bir noqatqa belgili bir ten' salmaqlıq hal sa'ykes keledi. Bul diagramma anaw yamasa minaw protseste kanday fazalıq o'tiwlerdin' bolatug'ınlg'ın ko'rsetedi.

Ten' salmaqlıq halda fizika-ximiyalıq qa'siyetleri boyınsha bir tekli zattın' birden u'sh ten' salmaqlıq halda turatug'ın jag'daydı qaraymız (misalı muz, suw ha'm puw). Bunday sistemanın' ten' salmaqlıg'ı bul u'sh fazanın' ten' salmaqlıg'ına sa'ykes keletug'ın u'sh sha'rttin' bir waqıtta orınlang'anda orın aladı. Bul sha'rtlerdi ulıwma jag'dayda bilayınsha jazamız:

$$\varphi_1(P, T) = \varphi_2(P, T) = \varphi_3(P, T) \quad (1)$$

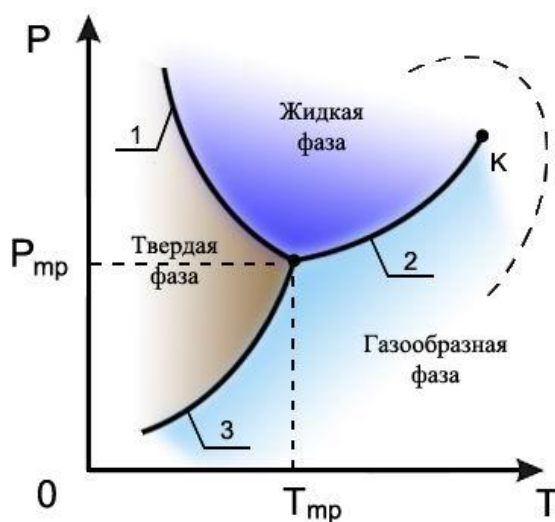
(1)-ten'lik eki bir birinen g'a'rezsiz ten'lemeler sistemasının' payda bolıwına alıp keledi:

$$\varphi_1(P, T) = \varphi_2(P, T), \quad (2)$$

ha'm

$$\varphi_2(P, T) = \varphi_3(P, T) \quad (3)$$

Bul ten'lemeler sistemasın (ximiyalıq reaksiyalar bolmaytug'ın sha'rti orınlang'anda) sheshiw sol u'sh faza bir waqıtta bola alatug'ın basım $P_{u'sh}$ ha'm temperatura $T_{u'sh}$ nın' anıq ma'nislerin beredi. P ha'm T o'zgeriwshilerindegi hal diagrammasındag'ı joqarıda keltirilgen basım menen temperaturanın' ma'nislerine sa'ykes keletug'ın noqat (su'wrette berilgen) *u'shlik noqat* dep ataladı. Bul noqatta qattı ha'm suyuq ta'rizli fazalardı bo'lip turıwshı 1, suyuq ha'm gaz ta'rizli fazalardı ayırıp turatug'ın 2 *puwlanıw sıızıg'ı*, qattı ha'm gaz ta'rizli fazalardı ayırıp turıwshı 3 *vozgonka* iymekligi bar boladı.



Hal diagramması. 1-eriw iymekligi, 2-puwlanıw iymekligi, 3-vozgonka iymekligi.

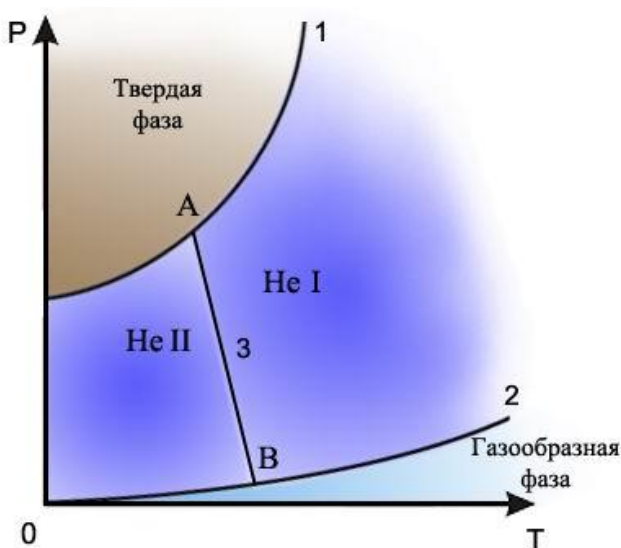
2-puwlanıw iymekligi *kritikalıq noqatta* (K) tamam boladı. Bul noqatta suyuq ha'm gaz ta'rizli fazalar arasındag'ı ayırma jog'aladı. Eger fazalıq o'tiw kritikalıq noqattı aylanıp o'tiw arqalı a'mege assa (su'wrettegi punktir sıızıq tu'rinde ko'rsetilgen), puwlanıw iymekliginin' kesip o'tiwi orın almaydı ha'm fazalıq o'tiw fazalar arasındag'ı shegara payda bolmay u'zliksiz o'tiw menen a'melge asadı.

O'zinin' fizika-ximiyaliq qa'siyetleri boyınsha bir tekli zatlarda bir waqıtta en' ko'p bolg'anında tek u'sh faza (misali zattın' u'sh agregat halı) ten' salmaqlıqta tura aladı. U'sh fazadan artıq sandag'ı fazalardıń bir waqıtta jasay alatug'ın noqattın' bolıwı mu'mkin emes.

U'sh ha'r kıylı agregat xalg'a sa'ykes keliwshi zatlardıń halları u'shlik noqatqa sa'ykes kelmeytug'ın basım menen temperaturanın' ma'nislerinde de bir waqıtta jasaytug'ın jag'daylar bar. Misali ta'biyatta ha'r kıylı hawa raylarında bir waqıtta muz, suw ha'm puwdı ko'riw mu'mkin (a'lbette puwdı tikkeley ko're almaymız, onı ko'riw ushın basqa a'sbaplardan paydalanamız). Biraq bul hallar ten' salmaqlıq hallar emes (u'shlik noqattag'ı hallar ten' salmaqlıq xallar edi). Sonlıqtan ta'biyattag'ı muz, suw ha'm puwlar arasında barlıq waqıtları o'tiwler bolıp turadı.

U'shlik noqattag'ı basım menen temperaturanın' ma'nisleri ko'pshilik zatlar ushın ju'da' turaqlı keledi. Sonın' ushın u'shlik noqatlar ha'r kıylı temperaturalıq shkalalardı kalibrovkalaw ushın paydalanıladı. Suwdın' u'shlik noqatı Kelvin ha'm TSelsiya shkalaları ushın tiykarg'ı reperlik noqattın' ornın iyeleydi.

Geliydin' diagrammasında u'shlik noqat bolmaydı (bul onın' en' tiykarg'ı o'zgesheligi bolıp tabıladı, su'wrette keltirilgen). Demek geliyde qattı, sıyıq ha'm gaz ta'rizli fazalar bir waqıtta jasmaydı degen so'z.



Geliydin' hal diagramması. 1- eriw iymekligi, 2-puwlaniw iymekligi, 3- Sıyıq He I ha'm He II sıyıq fazaların ayırıp turıwshı iymeklik, A ha'm B lar u'shlik noqatlar.

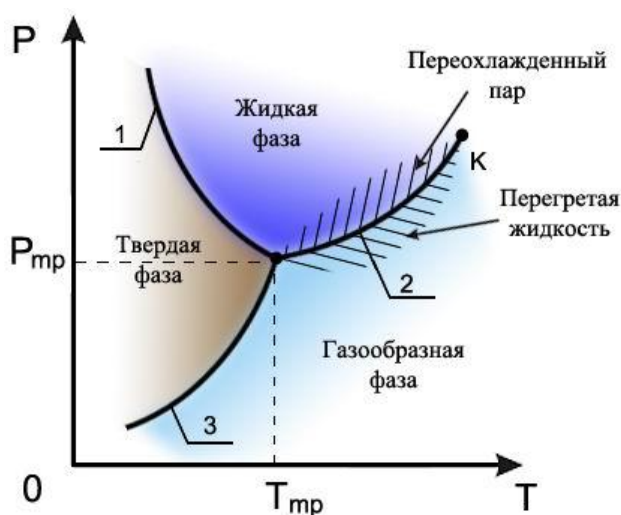
Su'wrette geliyde eriw ha'm puwlaniw iymekliklerinin' kesilispeytug'ınlıg'ı ko'rinip tur. Sebebi geliydin' qattı fazası tek 25 atm basımnan joqarı basımlarda gana payda boladı. Basım 25 atm nan kishi bolg'andı geliy teperaturanın' absolyut nolıne shekem sıyıq bolıp qaladı (geliydin' bul qa'siyeti kvant mexanikasın paydalanıp tu'sindiriledi). Biraq bul geliyde u'shlik noqattın' joq ekenligin tu'sindire almaydı. Ma'sele sonnan ibarat, geliy qa'siyetleri ha'r kıylı bolg'an eki sıyıq fazag'a iye: Ne I ha'm Ne II. Su'wrette keltirilgen A ha'm V noqatları u'sh faza da ten' salmaqlıq halda turatug'ın u'shlik noqatlar bolıp tabıladı ha'm bul noqatta u'sh faza ten' salmaqlıqta turadı: Ne I, Ne II ha'm (sa'ykes) kristallıq geliy (A nokatı) yamasa gaz ta'rizli geliy (V nokatı). B noqatına sa'ykes keliwshi temperatura shama menen 2,2 K ge ten'.

A'dette barlıq qattı zatlar bir neshe fazalıq xallarda bola aladı. Olar bir birinen strukturaları ha'r kıylı bolg'an *kristallıq modifikatsiyaları* menen ayrıladı. Bul fazalar o'z-ara da, ha'r kıylı agregat hallar menen baylanısqa fazalar menen de ten' salmaqlıq xallarda bola aladı. Hal diagrammasında usı fazalardıń ten' salmaqlıq sha'rti bolıp fazalıq o'tiwlerdegi ten' salmaqlıq iymeklikleri xızmet etedi. U'shlik noqatlar da boladı. Bunday noqatlarda u'sh faza ten' salmaqlıqta turadı. Olardıń ekewi kristallıq modifikatsiyalar bolıp, u'shinshisi gaz ta'rizli yamasa qattı faza bolıp tabıladı. Al bazı bir zatlarda u'shlik noqatta ten' salmaqlıqta turatug'ın fazalardıń barlıg'ı da qatta haldag'ı fazalar bolıp tabıladı.

Zatlardıń bir neshe kristallıq modifikatsiyalarg'a iye bolıw qa'siyeti *polimorfizm* dep ataladı. Usınday qa'siyetlerge, mısalı, ku'kirt, uglerod, qalayı, temir ha'm basqa zatlar iye boladı. Muz bir neshe kristallıq modifikatsiyag'a iye. Bir kristallıq modifikatsiyadan ekinshi modifikatsiyag'a fazalıq o'tiw *polimorfliq aylanıs* dep ataladı. Polimorfliq aylanısar ko'pshilik jag'daylarda birinshi a'wlad fazalıq o'tiwleri bolıp tabıladı ha'm fazalıq o'tiwdin' barısında jıllılıqtın' jutılıwı yamasa shıg'arılıwı orın aladı.

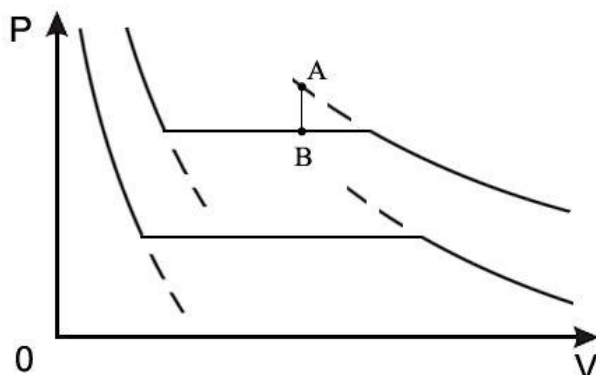
Ha'r kıylı kristallıq modifikatsiyalar ushın *metastabillik xallardıń* bar bolıwı ta'n (bunday hallarda bir faza ekinshi fazanın' temperaturalar ha'm basımları oblastında jasaydı). Tap usınday fazalıq o'tiwler u'shlik noqat janında bir agregat xaldan ekinshi agregat xalg'a o'tkende de orın aladı.

To'mendegi su'wrette suyıqlıq-gaz fazalıq o'tiwindegi metastabillik oblastları sxema tu'rinde ko'rsetilgen. 2-sızıqtan joqarıda *ko'birek salqınlatılǵ'an* puwg'a, al to'mende *ko'birek kızdırılǵ'an* suyıqlıqqa sa'ykes keliwshi oblastlar ko'rsetilgen. Usınday metastabil hallardag'ı zatlar Vilson kamerası ha'm ko'bikli kamera usag'an fizikalıq a'sbaplarda qollanıladı. Olardıń jumıs islew printsipleri to'mende keltirilgen.



Suyıqlıq-gaz fazalıq o'tiwindegi metastabillik hallar diagramması. 1-eriw iymekligi, 2-puwlanıw iymekligi, 3-vozonka iymekligi.

Eki fazalı suyıqlıq-gaz sistemasının' izotermaların sa'wlelendiretug'in bolsaq (to'mendegi su'wrette), izotermalardıń gorizont bag'ıtındag'ı bo'limi zattın' fazalıq o'tiwine sa'ykes keledi, gorizont bo'limnen on' ta'repte gaz ta'rizli fazanın' izotermaları, al shep ta'repine suyıq fazanın' izotermaları jaylasadı. Punktir sızıqlar metastabil hallarg'a sa'ykes keledi. On' ta'repte ko'birek salqınlatılǵ'an puw, shep ta'repte ko'birek kızdırılǵ'an suyıqlıq orın alg'an. Bul hallar eger baska fazanın' *zarodishları* (sa'ykes tamshılar, ko'biksheler) ele payda bolmag'an bolsa yamasa olarda joq bolıw tendentsiyası orın alg'an jag'dayda ju'zege keledi. Zarodishlardın' payda bolıwına ha'r kıylı qosımtalar ha'm bir tekiliktin' joqlıg'ı alıp keledi. Sonlıqtan metastabillik hallar jaqsı tazalang'an zatlar ushın ta'n.



Suyıqlıq-gaz eki fazalı sistemasının' izotermaları

Ko'birek salqinlatilg'an puwdin' basımı sol temperatudag'ı toying'an puwdin' basımınan joqarı bolatug'ın bolg'anlıqtan, bunday puw *ko'birek toying'an puw* dep ataladı. Bunday puwdag'ı suyıq fazanın' zarodışlarınan' payda bolıwı ha'm o'siwi ko'p faktorlarg'a baylanıslı boladı (birinshi gezekte zarodışlardın' o'lishemlerinen, temperaturadan, *ko'birek toyınıw da'rejesi* S_p dan). *Ko'birek toyınıw da'rejesi usınday puwdin' tıg'ızlıg'ının' toying'an puwdin' tıg'ızlıg'ına katnası tu'ride anıqlanadı*:

$$S_p = \frac{\rho}{\rho_{ko'b.toy.}}, \quad (4)$$

al, adiabatlıq ken'eyiwde onın' ma'nisi

$$S_p = \frac{P_1}{P_2} \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^\gamma \quad (5)$$

an'latpası menen anıqlanadı. Bul jerde P_1 , V_1 ha'm P_2 , V_2 puwdin' da'slepki ha'm aqırğ'ı basımları menen ko'lemneri.

XIX a'sirdin' ortalarında o'tkerligen ta'jiriybeler eger puwda shan'nın' bo'leksheleri bolsa ha'tte u'lken emes toyınıwda da dumannın' payda bolatug'ınlıg'ın ha'm A noqatınan B nokatına o'tiwdin' orın alatug'ınlıg'ın ko'rsetti (joqarıdag'ı su'wret). Usınday protsess konvektsiyanın' saldarınan payda bolg'an ag'ıslar suw puwları bar hawanı ko'tergende ju'redi. Usının' na'tiyjesinde temperaturanın' to'menlewi menen ol ken'eyedi. Bul dumannın' payda bolıwına ha'm jawın tamshılarnın' o'siwine alıp keledi (toying'an halg'a salıstırğ'anda puwdin' artıq kontsentratsiyanın' esabınan).

1870-jılı Tomson (lord Kelvin) ta'repinen bet kerimi saldarınan radiusı r bolg'an tamshının' betindegi toying'an puwdin' basımı ρ_r dın' suyıqlıqtın' tegis betindegi puwdin' basımı ρ_{bet} ten u'lken ekenligin ko'rsetildi. Sol eki basım to'mendegi qatnas penen baylanısqa:

$$\frac{\rho_r}{\rho_{bet}} = \exp \left(\frac{2\sigma}{r} \frac{\mu}{\rho RT} \right) \quad (6)$$

Bul an'latpadag'ı σ bet kerimi, μ menen ρ suyıqlıqtın' mollik massası menen tıg'ızlıg'ı, T absolyut temperatura, R universal gaz turaqlısı. Bul an'latpadan eger puwdin' ko'birek toyınıw da'rejesi (6)-an'latpa ta'repinen beriletug'ın shamadan artıq bolsa tamshılardıń u'lkeyetug'ınlıg'ı ha'm dumannın' payda bolatug'ınlıg'ı kelip shıg'adı.

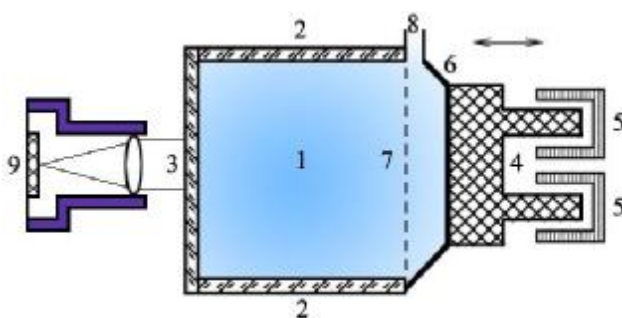
Tamshılar mayda bolg'an sayın usı tamshılardıń puwlanıp ketpewi, al o'siwi ushın ko'birek toyınıw kerek boladı. Suw ushın $r = 2 \cdot 10^{-8}$ sm de $S_p = 235$ ke iye bolamız, yag'nıy molekulalar a'dette kondensatsiya orayları bola almaydı. Biraq eksperimentler $S_p > 8$ bolg'anda suw puwlarında dumannın' payda bolatug'ınlıg'ın ko'rsetedi. Angliyalı fizik Djozef Djon Tomson (1856 - 1940) bul qubılıstı bilay tu'sindirdi: ta'sirlesiwidin' (kaogulyatsiyanın') saldarınan suw molekulaları tamshı payda etedi. Bul tamshılardıń en' u'lken o'lishemleri $r = 5 \cdot 10^{-8}$ sm, al bul shamag'a $S_p = 8$ shaması sa'ykes keledi. S_p nın' kishirek ma'nislerinde tek basqa «bo'leksheler» (mısalı shan') bolg'anda g'ana duman payda boladı.

Angliyalı fizik *SHarlz Tomson Ris Vilson* (1869 - 1959) eksperimente belgili bir sharayatlar payda etilgende dumannın' zaryadlang'an ionlarda effektivli tu'rde payda bolatug'ınlıg'ın ko'rsetti. Zaryadlang'an tamshının' betine jaqın orınlardag'ı basımdı o'zgetetug'ın elektrostatikalıq ku'shler ta'sir etedi. Bul o'z gezeginde kondensatsiya sha'rtlerin o'zgetedi. Bul jag'day Vilsong'a 1912-jılı yadrolıq

nurlanıw bo'lekshelerin registratsiya isleytug'ın a'sbaptı islep shıg'ıwg'a alıp keldi. Bul a'sbaptı *Vilson kamerası* dep ataymız⁷.

Bul a'sbapta ko'birek toying'an puw (a'dette suwdın, spirtin' ha'm inert gazlerdin' aralaspasınan turatug'ın) mo'ldir diywalları bar ıdıtıg'ı porshennin' ja'rdeminde adiabatlıq ken'eytiw jolı menen payda etiledi. İonlastırıwshı nurlar bo'leksheleri ıdısqa kelip tu'skende olardıń traektoriyaları boylap ionlardan turatug'ın iz kaladı. Bul ionlarda suyıqlıqtın' kondensatsiyası orm aladı ha'm suyıqlıqtın' tamshılarnan turatug'ın ko'zge ko'rinetug'ın trek (iz) payda boladı. Solay etip metastabil halda toplang'an energiya yadrolıq nurlanıwdı vizualizatsiya ushın paydalanıladı. Bo'lekshenin' izin ha'm onın' formasın ortalıqtın' fotosu wretin tu'siriw jolı menen a'melge asırıladı.

Vilson kamerasının' printsipiallıq sxeması to'mendegi su'wrette keltirilgen. 1 izolyatsiyalang'an jumıs ko'leminde ko'birek toying'an, biraq toying'an halg'a jaqın haldag'ı suw menen spirtin' puwları jaylastırıladı. 4 porshendi tartatug'ın 6 diaframanın' birden qozg'alıwı 1 ko'lemdegi usı puwlardıń tez adiabatlıq ken'eyiwge alıp kelinedi. Usı jol menen puwlardıń ko'birek toying'an da'rejesi jetiledi (a'dette 1,25 ten 1,37 ge shekem). Onı bahalaw ushın (5)-an'latpanın' qollanıwı mu'mkin.



Vilson kamerasının' sxeması. 1 izolyatsiyalang'an jumısshı ko'lem, 2 shiyshe tsilindr, 3 fotosu'wret tu'siriw ushın arnalg'an shiyshe ayna, 4 jılıwshı porshen, 5 porshennin' ju'risin retlewshı, 6 rezina diafragma, 7 diafragma qozg'alg'anda turbulentlikti kemeytetug'ın sim tor, 8 suw-spirt aralaspasın jiberiwshı tesikshe (jumıs waqtında jabıq turadı), 9 su'wretke alıwshı apparat.

1 ko'lemi arqalı bo'leksheler o'tkende olardıń traektoriyaları boylap dumannan turatug'ın trekler payda boladı ha'm bul trekler su'wretke tu'siriledi. Usınnan keyin Vilson kamerası da'slepki halına qayıtıp alıp kelinedi, yag'nıy onın' jumıs islewi protsessi tsikllıq bolıp tabıladı. Tsikllerdin' sanı minutına 1 den 6 g'a shekem boladı. Jumıs islewinin' kishi tezligi Vilson kamerasının' belgili bir kemshiliklerinen bolıp esaplanadı. Mısalı Angliyalı fizik *Patrik Meynard Styuart Blekettket* (1897 - 1974) α bo'lekshelerinin' azottag'ı millionday su'wretin tu'siriwge tuwrı keldi. Usı millionday su'wretin' ishinde α bo'lekshesinin' azot atomları ta'repinen uslap qalınıp, usının' na'tiyjesinde protondı shıg'arıwı 20 ret g'ana su'wretke aling'an.

Vilson kamerasının' basqa bir kemshiligi retinde onın' jumısshı kamerasının' u'lkenliginde (a'dette onın' diametri bir neshe onlag'an santimetrge jetedi). Bul jag'daydın' aqıbetinen joqarı energiyalı bo'lekshelerdin' treklerin izertlewge mu'mkinshilik bermeydi. Bul kemshilikten kutılıw ushın tıg'ızıraq jumısshı zattan paydalanıw kerek. Bunday zatlardag'a bo'lekshelerdin' ju'riw uzınlıg'ı a'dewir kishireyedi. Usıg'an baylanıslı *ko'biksheli kameralar* islep shıg'ılǵ'an. Bunday kameralarda bo'lekshelerdin' treklerinin' vizualizatsiyası ushın (ko'riniwi ushın) bo'lekshe ushıp o'tkende bo'linip shıg'atug'ın ko'birek qızdırılǵ'an suyıqlıqtın' ishki energiyası paydalanıladı. Suyıqlıq hal diagrammasındag'ı punktir sıızıqlar menen ko'rsetilgen xalda turadı. Usınday suyıqlıqqa zaryadlang'an bo'lekshe kelip tu'sse onın' traektoriyası boylap puwdın' ko'bikshelerinen turatug'ın iz payda boladı.

Ko'biksheli kameranın' printsipiallıq sxeması Vilson kamerasının' sxemasına uqsas. Metastabillik hal (ko'birek qızdırılǵ'an suyıqlıq) Vilson kamerasındag'ıday basımdı tez kishireytiw jolı menen alınadı. Treklerdi fotosu'wretke tu'siriw ushın suyıqlıq mo'ldir bolıwı sha'rt. Ko'biksheli kameralarda jumısshı dene retinde jaqsı tazartılǵ'an suyıq vodorod, propan ha'm ksenon paydalanıladı. Bunday kameralardıń tsikllerinin' jiyiligi minutına bir neshe ong'a jetedi.

⁷ Usınday kameranı do'retkeni ushın Vilsno 1927-jılı Nobel sıylıg'ın alıwǵ'a miyasar boldı.

Ekinshi a'wlad fazalıq o'tiwleri

Ekinshi a'wlad fazalıq o'tiwlerin bayanlawdı 1933-jılı fizik-teoretik Paul Erenfest (1880 - 1933) ta'repinen usınılg'an usıl menen alıp baramız. Bunday o'tiwler ushın Klapayron-Klauzius ten'lemesin qollanıwg'a bolmaydı. Sebebi salıstırmalı termodinamikalıq potentsialdın' birinshi ta'rtpi tuwındılarının' ten'ligi sha'rtinen

$$\left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial T}\right)_P = \left(\frac{\partial \varphi_2}{\partial T}\right)_P, \quad (1)$$

$$\left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial P}\right)_T = \left(\frac{\partial \varphi_2}{\partial P}\right)_T \quad (2)$$

qosımshalardag'ı «Hal diagrammaları» paragrafindag'ı (1)- ha'm (2)- formulalardan salıstırmalı entropiyalar menen ko'lemlerdin' ten'ligi kelip shıg'adı:

$$s_1 = s_2, \quad (3)$$

$$v_1 = v_2. \quad (4)$$

Bul jag'day mınag'an alıp keledi: $\frac{dP}{dT} = \frac{s_2 - s_1}{v_2 - v_1}$ ten'lemesinin' on' ta'repinin' alımı da, bo'limi de

bir waqıtta nolge aylanadı ha'm Klayperon-Klauzius ten'lemesinde de 0/0 tu'rindegi anıqsızlıq payda boladı.

(3)- ha'm (4)- formulalarg'a sa'ykes salıstırmalı entropiyalar menen salıstırmalı ko'lemlerdin' tolıq differentsialların tabamız ha'm olardı bir biri menen ten'lestireміz:

$$\left(\frac{\partial s_1}{\partial T}\right)_P dT + \left(\frac{\partial s_1}{\partial P}\right)_T dP = \left(\frac{\partial s_2}{\partial T}\right)_P dT + \left(\frac{\partial s_2}{\partial T}\right)_T dP, \quad (5)$$

$$\left(\frac{\partial v_1}{\partial T}\right)_P dT + \left(\frac{\partial v_1}{\partial P}\right)_T dP = \left(\frac{\partial v_2}{\partial T}\right)_P dT + \left(\frac{\partial v_2}{\partial T}\right)_T dP. \quad (6)$$

Aling'an an'latpalar ushın tu'rlandırıw o'tkeremiz. Qayıtlı protsesste salıstırmalı entropiyadan temperatura boyınsha aling'an tuwındı mına tu'rge iye boladı:

$$\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_P = \frac{1}{T} \left(\frac{\partial q}{\partial T}\right)_P = \frac{1}{T} c_P. \quad (7)$$

Bul anlatpada q salıstırmalı jıllılıq, c_P salıstırmalı izobaralıq jıllılıq sıyımlılıg'ı.

Salıstırmalı termodinamikalıq potentsialdın' ekinshi tuwındısı ushın mına ten'lik jazılatug'ın bolg'anlıqtan

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial P \partial T} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial T \partial P}, \quad (8)$$

to'mendegidey an'latpani jaza alamiz (qosimshalardag'ı «Hal diagrammaaları» paragrafindag'ı (1)- ha'm (2)- formulalardı qaran'ız):

$$-\left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_T = \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P. \quad (9)$$

(7)- ha'm (9)- an'latpalardı esapqa alg'anda (5)- ha'm (6)- an'latpalar beredi:

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dT} &= -\frac{(\partial s_2/\partial T)_P - (\partial s_1/\partial T)_P}{(\partial s_2/\partial P)_T - (\partial s_1/\partial P)_T} = \\ &= \frac{c_{P2} - c_{P1}}{T((\partial v_2/\partial T)_P - (\partial v_1/\partial T)_P)} = \frac{\Delta c_P}{T\Delta(\partial v/\partial T)_P}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\frac{dP}{dT} = -\frac{(\partial v_2/\partial T)_P - (\partial v_1/\partial T)_P}{(\partial v_2/\partial P)_T - (\partial v_1/\partial P)_T} = -\frac{\Delta(\partial v/\partial T)_P}{\Delta(\partial v/\partial P)_T}. \quad (11)$$

Bul an'latpalarda Δ simvoli menen sa'ykes shamalardıń ayırması belgilengen.

Aling'an an'latpalar basımnıń temperaturadan aling'an tuwındısıń (dP/dT , ten' salmaqlıq iymekliginin' qıyalıg'ı) *salıstırmalı izobaralıq jıllılıq sıyımlılıg'ı* c_P ha'm $\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P$, $\left(\frac{\partial v}{\partial P}\right)_T$ shamaları menen baylanıstıratug'ın ten'lemelerdi jazıwg'a mu'mkinshilik beredi. Bul shamalardıń o'zleri *ko'lemlik ken'eyiwdiń temperaturalıq koeffitsienti* ha'm

$$\alpha_P = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P \quad (11)$$

izotermalıq kısılıw koeffitsienti

$$\beta_T = -\frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial P}\right)_T. \quad (12)$$

menen baylanısqan. Bul ten'lemeler Erenfest ten'lemeleri dep ataladı ha'm mına tu'rge iye boladı:

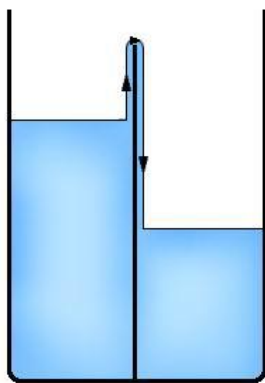
$$\Delta c_P = T \frac{dP}{dT} \Delta \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P, \quad (13)$$

$$\Delta \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P = -\frac{dP}{dT} \Delta \left(\frac{\partial v}{\partial P}\right)_T. \quad (14)$$

Ekinshi a'wlar fazalıq o'tiwlerinin' en' ko'rgizbeli mısalı 2,2 K temperaturadag'ı sıyıq He I din' sıyıq He II ge aylanıwı bolıp tabıladı (to'mendegi su'wrette ko'rsetilgen). Usı fazalıq o'tiw menen He II

de payda bolatug'ın *asa aqqışlıq* kvant qubılısı baylanısqa. Bul qubılıs 1938-jılı P.L.Kapitsa ta'repinen ashıldı ha'm onın' teoriyalıq tu'sindiriliwi *Lev Davidovich Landau* (1908 - 1968) ta'repinen berildi. Asa aqqışlıqtın' fenomenologiyalıq teoriyası He II nin' eki suyıqlıqtın' aralaspasınan turatug'ıllıg'ına tiykarlang'an (kvant fizikası boyınsha He II atomların eki tu'rge bo'liwge bolmasa da). Biraq klassikalıq analogiya ko'rgizbalilik ushın qolaylıraq ha'm usıg'an baylanısı He II nin' bir kurawshısı asa aqqış, al ekinshi qurawshısı normal (asa aqqış emes) bolıp tabıladı. Solay etip He II nin' ag'ısın eki suyıqlıqtın' ag'ısları tu'rinde ko'z aldımızg'a keltiremiz, sonın' ishinde asa aqqış qurawshısının' jabısqaqlıg'ı nolge ten'.

Asa aqqışlıq qubılısının' o'zi atap aytqanda He II nin' jabısqaqlıg'ının' joqlıg'ında. Jabısqaqlıqtın' joqlıg'ınan He II suyıqlıg'ı ju'da' jin'ishke kapillyarlar arqalı o'te aladı (P.L.Kapitsa He II nin' eki shlifovkalang'an shiyshe arqalı o'tiwi boyınsha ta'jiriybeler qoydı). Al diywal menen eki bo'limge ajratılğ'an ıdıstag'ı He II nin' qa'ddi sol diywal arqalı o'rmelewiniñ saldarınan ten'lesedi (su'wrette ko'rsetilgen).



He II quylg'an ıdıstag'ı o'rmelewshi plenkanın' payda bolıwı

O'rmelewshi plenka 10^{-5} sm den de kishi qalın'lıqqa iye boladı. Bul plenka sekundına bir neshe onlag'an santimetr tezlik penen qozg'aladı ha'm sonlıqtan suyıqlıq ıdıtın' bir ta'repinen ekinshi ta'repine o'tedi.

Normal qurawshı o'zinin' qozg'alıw barısında jıllılıqtı o'zi menen alıp ju'redi, al asa aqqış qurawshı bolsa jıllılıqtı alıp ju'rmeydi. He II juqa san'laq arqalı o'tkende tiykarınan asa aqqış qurawshı o'tedi. Sonlıqtan o'rmelewshi He II nin' temperaturası o'rmelew a'melge asatug'ın bo'limdegi He II din' temperaturasınan to'men boladı. Bul qubılıs asa to'men temperaturalarda alıw ushın qollanıldı (kelvinnin' onnan bir u'lesi).

Ekinshi a'wlad fazalıq o'tiwlerine ayırım zatların' asa o'tkizgishlik halına o'tiwi de kiredi. Bunday o'tiw *asa o'tkizgishlerdin'* elektrlik qa'siyetlerinin' nolge shekem to'menlewi menen ju'zege keledi.

Ekinshi a'wlad fazalıq o'tiwlerine misal retinde temirdin' Kyuri noqatında ferromagnit haldan paramagnit halına o'tiwin ko'rsetiwge boladı. Sonın' menen birge ekinshi a'wlad fazalıq o'tiwlerine ayırım kristallıq pa'njerenin' simmetriyasının' o'zgeriwi menen bolatug'ın o'tiwleri de kiredi. Bul jag'dayda fazalıq o'tiw noqatında pa'njerenin' simmetriyasının' tipi o'zgeredi (misalı kublıq pa'njerenin' tetragonallıq pa'njerege o'tiwi). A'dette temperatura to'menlegende ju'retug'ın ekinshi a'wlad fazalıq o'tiwlerinde kristallıq pa'njerenin' simmetriyası to'menleydi. Sonlıqtan joqarı temperaturalarda eiknshi a'wlad fazalıq o'tiwleri orın alatug'ın kristallarda mumkin bolg'an en' joqarı simmetriya orın aladı.

Ekinshi a'wlad fazalıq o'tiwlerinde zatların' barlıq qa'siyetleri zatların' barlıq ko'lemi boyınsha u'zliksiz tu'rde o'zgeredi. Sonlıqtan ekinshi a'wlad fazalıq o'tiwlerinde birinshi a'wlad fazalıq o'tiwleri ushın ta'n bolg'an metastabillik hallardın' payda bolıwı mu'mkin emes.