

L.D.Landaw, A.I.Axiezer, E.M.Lifshic.

Uliwma fizika kursı

Mexanika hám molekulalıq fizika

Russha ekinshi basılıwınan qaraqalpaq tiline
B.Ábdikamalov tárepinen 1996-jılı awdarılǵan.

Mazmunı

Birinshi basılıwına alǵı sóz

I BAP. Noqat mexanikası

- § 1. Qozǵalıstıń salıstırmalıq principı
- § 2. Tezlik
- § 3. Impuls
- § 4. Reaktiv qozǵalı
- § 5. Inerciya orayı
- § 6. Tezleniw
- § 7. Kúsh
- § 8. Fizikalıq shamalardıń ólshemleri
- § 9. Bir tekli maydandaǵı qozǵalı
- § 10. Jumıs hám potencial energiya
- § 11. Energiyanıń saqlanıw nızamı
- § 12. Ishki energiya
- § 13. Qozǵalı shegaraları
- § 14. Serpimli soqlıǵısıwlar
- § 15. Impuls momenti
- § 16. Oraylıq maydandaǵı qozǵalı

II Bap. Maydan

- § 17. Elektr tásirlesiwi.
- § 18. Elektr maydanınıń kernewliligi
- § 19. Elektrostatikalıq potencial
- § 20. Gauss teoreması
- § 21. Ápiwayı jaǵdaylardaǵı elektr maydanları
- § 22. Gravitaciyalıq maydan.
- § 23. Ekvivalentlilik principı.
- § 24. Kepler qozǵalı

III BAP. Qattı deneniń qozǵalı

- § 25. Qattı deneniń qozǵalıınıń túrleri
- § 26. Qozǵalıwshı qattı deneniń energiyası
- § 27. Aylanıw momenti

- § 28. Aylanıwshı deneniń qozǵalıǵ teńlemesi
- § 29. Teń tásir etiwshi kúsh
- § 30. Girooskop
- § 31. Inerciya kúshleri

IV BAP. Terbelisler

- § 32. Garmonikalıq terbelisler
- § 33. Mayatnik
- § 34. Sóniwshi terbelisler
- § 35. Májbúriy terbelisler
- § 36. Parametrlik rezonans

V BAP. Zatlardıń qurılısı

- § 37. Atomlar
- § 38. Izotoplar
- § 39. Molekulalar

VI BAP. Simmetriya haqqında tálimat

- § 40. Molekulalar simmetriyası
- § 41. Aynalıq izomeriya
- § 42. Kristallıq pánjere
- § 43. Kristallıq sistemalar
- § 44. Keńisliktegi toparlar
- § 45. Kristallıq klasslar
- § 46. Ximiyalıq elementlerdiń pánjereleri
- § 47. Birikpelerdiń pánjereleri
- § 48. Kristallıq tegislikler
- § 49. Kristallardıń tábiyiy qaptalları

VII BAP. Jılılıq

- § 50. Temperatura
- § 51. Basım
- § 52. Zatlardıń agregat halları
- § 53. Ideal gaz
- § 54. Sırtqı maydandaǵı ideal gaz
- § 55. Maksvell bólistiriliwi
- § 56. Jumıs hám jılılıq muǵdarı
- § 57. Gazlerdiń jılılıq sıyımlıǵı
- § 58. Kondensaciyalanǵan deneler

VIII BAP. Jılılıq processleri

- § 59. Adiabatalıq process
- § 60. Djoul-Tomson processı.
- § 61. Stacionar aǵıs
- § 62. Jılılıq processleriniń qaytımsızlıǵı

- § 63. Karno sikli
- § 64. Qaytımsızlıqtıń tábiyatı
- § 65 Entropiya

IX BAP. Fazalıq ótiwler

- § 66. Zatlardıń fazaları
- § 67. Klapeyron-Klauzius formulası
- § 68. Puwlanıw
- § 69. Kritikalıq noqat
- § 70. Van-der-Vaals teńlemesi
- § 71. Sáykes hallar nızamı
- § 72. Eriw noqatı
- § 73. Kristallıq modifikaciýalar
- § 74. Ekinshi áwlad fazalıq ótiwleri
- § 75 Kristallardıń tártipleskenligi
- § 76. Suyıq kristallar

X BAP. Eritpeler

- § 77. Eriwshilik
- § 78. Suyıqlıqlar aralaspası
- § 79. Qattı eritpeler
- § 80. Osmoslıq basım
- § 81. Raul nızamı
- § 82. Suyıqlıqlar aralaspasınıń qaynawı
- § 83. Keri kondensaciya
- § 84. Suyıqlıqlar aralaspasınıń qatıwı
- § 85 Fazalar qaǵıydası

XI BAP. Ximiyalıq reakciýalar

- § 86. Reakciya jıllılıǵı
- § 87. Ximiyalıq teń salmaqlıq
- § 88. Tásir etiwshi massalar nızamı
- § 89. Kúshli elektrolitler
- § 90. Ázzi elektrlitler
- § 91. Aktivaciya energiyası
- § 92. Reakciýalardıń molekullalıǵı
- § 93. SHinjirli reakciýalar

XII BAP. Betlik qubılıslar

- § 94. Bet kerimi
- § 95 Adsorbciya
- § 96. SHetki múyesh
- § 97. Kapıllırlıq kúshler
- § 98. Mayısqań bet astındaǵı puwdıń serpimliligi
- § 99. Asa qızıw hám asa salqınlaw qubılıslarınıń tábiyatı

§ 100. Kolloidlıq eritpeler

XIII BAP. Qattı deneler

- § 101. Ápiwayı sozıw
- § 102. Hár tárepleme qısıw
- § 103. Jılıw
- § 104. Elastiklik
- § 105. Kristallardağı defektler
- § 106. Elastikliktiń tábiyatı
- § 107. Qattı denelerdegi súykelis

XIV BAP. Diffuziya hám jıllılıq ótkizgishlik

- § 108. Diffuziya koefficienti
- § 109. Jıllılıq ótkizgishlik koefficienti
- § 110. Jıllılıq qarsılıǵı
- § 111. Teńlesiw waqıtı
- § 112. Erkin qozǵalıw uzınlıǵı
- § 113. Gazlerdegi diffuziya hám jıllılıq ótkizgishlik
- § 114. Jılıǵıshlıq
- § 115. Termodiffuziya
- § 116. Qattı denelerdegi diffuziya

XV BAP. Jabısqaqlıq

- § 117. Jabısqaqlıq koefficienti
- § 118. Gazler menen suyıqlıqlardıń jabısqaqlıǵı
- § 119. Puazeyl formulası
- § 120. Uqsaslıq usılı
- § 121. Stoks formulası
- § 122. Turbulentlik
- § 123. Siyrekletilgen gazler
- § 124. Asa ótkizgishlik

Predmetlik kórsetkish

Tiykargı fizikalıq qubılıslar hám áhmiyetli fizikalıq nızamlar haqqında oqıwshıda kóz-qaraslar payda etiw kitaptıń tiykargı maqseti bolıp tabıladı. Kitaptı dóretiwde L.D.Landau tárepinen Moskva mámleketlik universitetiniń fizika-texnikalıq fakultetinde oqılǵan lekciyalardıń stenografiyalıq kursı paydalanıldı. Ekinshi basılımǵa úlken emes dúzetiwler hám anıqlıqlar kirgizilgen. Kesteler sanı 11, illyustraciýalar 140.

Birinshi basılıwına kirisiw

Tiykargı fizikalıq qubılıslar hám áhmiyetli fizikalıq nızamlar haqqında oqıwshıda kóz-qaraslar payda etiw kitaptıń tiykargı maqseti bolıp tabıladı. Avtorlar tek ǵana baslı máselelerdi esapqa alıp úlken emes kólemdegi kitaptı jazıwǵa umtıldı. Sonlıqtan kitap keltirilgen materiallardı tolıq túsindiriwge umtılmaydı.

Formulalar qarap atırılǵan qubılıslar arasındaǵı baylanıslardı oqıwshılardıń túsiniwi ushın keltirilgen. Sonlıqtan formulalar múmkinshiliginiń bolǵanınsha eń ápiwayı mısallardıǵa baylanıslı keltirilip shıǵarıladı. Formulalar menen teńlemelerdi sistemalı túrde keltirip shıǵarıw teoriyalıq fizika kurslarında keltiriliwi kerek degen kóz-qarastı basshılıqqa alamız.

Bul kitaptı oqıw ushın algebra menen trigonometriya menen qatar differencial esaplaw hám vektorlıq algebra elementleri menen de tanıs bolıw kerek. Sonıń menen birge oqıwshı orta mektep kólemindegi tiykargı fizikalıq hám ximiyalıq túsinikler menen tanıs dep esaplanadı. Avtorlar bul kitaptı universitetlerdiń fizika fakultetleriniń hám fizika áhmiyetli orındı iyeleytuǵın texnikalıq joqarı oqıw orınlarınıń studentleri, sonıń menen birge orta mekteplerdiń fizika muǵallimleri ushın paydalı boladı dep úmit etedi.

Bul kitap 1957-jılı jazıldı. Biraq baspadan shıǵarılıwı usı waqıtlarǵa shekem sozılıp keldi. Baspadan shıǵıwı ushın kitap tolıqtırıldı hám pútkilley qaytadan jazıldı. Biraq kitaptıń planı menen tiykargı mazmunı ózgerissiz qaldırıldı.

Tilekke qarsı tragediyalıq avtomobil katastrofasına keyingi nawqaslanıwına baylanıslı biziń ustazımız hám dostımız L.D.Landau kitaptıń basılıp shıǵıwına qatnasa alǵan joq. Bizler onıń kórsetken jolları menen háreket etiwge tırıstıq.

Kitaptı jazıwdıń dáslepki variantındaǵıday hám 1947-jılı Moskva mámleketlik universiteti tárepinen L.D.Landaudıń fizika-texnikalıq fakultette oqıǵan lekciyalarınıń stenografiyalıq esabı túrinde shıqqan kitaptaǵıday eń dáslepki saylap alınǵan materiallarǵa súyendik.

Bayanlawdaǵı baylanıslardı buzlaw maqsetinde dáslepki plan boyınsha jıllılıq qubılısların eksperimentte izertlew kitaptıń keyinde óz aldına bapqa kóshiriliwi kerek edi. Tilekke qarsı bul plandı orınlaw múmkinshiligi bolmadı hám kitaptı baspadan shıǵarıwdı keshiktirmew ushın sol bapsız-aq kitaptı shıǵarıwdı maqul kórdik.

A.I.Axiezer, E.M.Lifshic. 1965-jıl, iyun.

I BAP. NOQAT MEXANIKASI

§ 1. Qozgálistırń salıstırmalıq principi

Qozgálıs, yaǵnıy bir deneniń basqa denelerge salıstırǵandaǵı orın almasıwı mexanikanıń tiykarǵı túsinigi bolıp tabıladı. Bul denelersiz biz barlıq waqıtta da salıstırmalı bolǵan qozgálıs haqqında ayta almaymız. Basqa denelerge salıstırmaǵandaǵı denelerdiń absolyut qozgálısı haqqındaǵı gápler mániske iye emes.

Qozgálistırń salıstırmalıǵı keńislik túsiniginiń óziniń salıstırmalı ekenligine baylanıslı. Bizler absolyut keńisliktegi awhal haqqında ayta almaymız, awhal haqqında ayılǵanda tek ǵana basqa denelerge salıstırǵandaǵı awhal názerde tutiladı.

Shártli túrde qozǵalmaydı dep esaplanatuǵın denelerdi fizikada *esaplaw sisteması* dep ataydı hám usı denelerge salıstırǵanda basqa denelerdiń qozgálısı izertleniledi. Esaplaw sistemasın iqtıyarlı túrde sheksiz kóp sanlı usıllar menen saylap alıw múmkin. Bunday jaǵdayda qanday da bir deneniń hár qıylı esaplaw sistemasına salıstırǵandaǵı qozgálısı ulıwma jaǵdaylarda hár qıylı bolıwı múmkin. Eger sistema usı deneniń ózi menen baylanıslı bolsa. Onda bunday sistemaǵa salıstırǵanda dene qozǵalmaydı. Biraq basqa esaplaw sistemalarına salıstırǵanda dene basqasha qozǵalatuǵın bolıp shıǵadı. Qala berse hár qıylı sistemalarda qozgálısı hár qıylı, yaǵnıy hár qıylı traektoriyalar boyınsha boladı.

Hár qıylı esaplaw sistemaları birdey huqıqqa iye hám qanday da bir deneniń qozgálısın izertlegende olardıń hár birin saylap alıw birdey múmkinshilikke iye boladı. Biraq ulıwma aytqanda fizikalıq qubılıs hár qıylı esaplaw sistemalarında hár qıylı bolıp ótedi. Sonlıqtan hár qıylı esaplaw sistemaların bir birinen ayırıw múmkinshiligi bar. Usıǵan baylanıslı qozgálısı arıwı túrde alınatuǵın esaplaw sistemaların saylap alıw tábiyiy nárseler bolıp tabıladı.

Basqa denelerden alısta turǵan deneni qarayıq. Bunday jaǵdayda bul denegge basqa deneler tásir etpeydi dep esaplawǵa boladı hám bunday deneni *erkin qozǵalıwshı* dene dep ataymız.

Álbette haqıyqatta erkin qozǵalıw shárti qanday da bir dálilikte júzege keliwi múmkin. Biraq principiallıq jaqtan deneni basqa deneler menen tásir etispeydi dep qálegen dálilikte esaplaw múmkin.

Qozgálistırń basqa túrlerindey, erkin qozgálıs ta hár qıylı esaplaw sistemalarında hár qıylı bolıp kórinedi. Biraq, eger biz erkin qozǵalıwshı basqa bir dene menen baylanısqa esaplaw sistemasın saylap alatuǵın bolsaq qozgálıs júdá arıwılasadı: qozgálıs tuwrı sızıqlı teń ólshewli qozgálısqa aylanadı. Basqa sóz benen aytqanda bunday jaǵdayda qozgálıs shaması da, baǵıtı da turaqlı tezlik penen boladı. Bul tastıyqlaw Galiley tárepinen ashılǵan *inerciya nızamı* dep atalatuǵın nızamnıń mánisin quraydı. Erkin qozǵalıwshı dene menen baylanısqa esaplaw sisteması *inercial esaplaw sisteması* dep ataladı. Inerciya nızamın *Nyutonnıń birinshi nızamı* dep te ataydı.

Fizikanı birinshi úyreniw barısında óziniń arıqsha qásiyetlerine iye inercial esaplaw sistemasın paydalanıw absolyut keńislik túsinigin arıqlawǵa múmkinshilik beredi degen nadurıs pikirdiń payda bolıwı múmkin. Inercial esaplaw sistemaları sheksiz kóp bolǵanlıqtan bunday dep oylawǵa bolmaydı. SHında da, eger bazı bir sistema qanday da bir inercial esaplaw sistemasına salıstırǵanda baǵıtı boyınsha da, shaması boyınsha da

turaqlı tezlik penen qozǵalatúǵın bolsa, onda bul sistemanıń ózi de inercial esaplaw sisteması bolıp tabıladı.

Inercial esaplaw sistemalarınıń bar bolatuǵınlıǵınıń logikalıq zárúrlık emes ekenligin atap aytıwımız kerek. Denelerdiń qozǵalıstı tuwrı sızıqlı hám teń ólshewli bolatuǵın usınday esaplaw sistemalarınıń bar ekenligin tastıyıqlaw principinde tábiyattıń tiykarǵı nızamlarınıń biri bolıp tabıladı.

Erkin qozǵalıstı izertlewdiń barısında biziń hár qıylı inercialıq sistemalardı bir birinen ayıra almaytuǵınlıǵımız anıq nárse. Basqa fizikalıq qubılıslardı izertlewdiń barısında bir inercial esaplaw sistemasın ekinshisinen ajratıwdıń, usınıń nátiyjesinde ayırıqsha bir inercial esaplaw sistemasın ajratıp alıwdıń múmkinshiligi bola mar degen soraw payda boladı. Eger usınday ajratıp alıw múmkin bolǵanda usı sistemaǵa salıstırǵandaǵı absolyut keńislik hám absolyut tınıshlıq halları boladı dep juwmaq shıǵarıwǵa bolar edi. Biraq usınday saylap alınǵan inercial esaplaw sisteması bolmaydı, sebebi barlıq inercial esaplaw sistemalarında barlıq fizikalıq qubılıslar birdey bolıp ótedi.

Barlıq inercial esaplaw sistemalarında tábiyattıń nızamları birdey túrge iye boladı. Sonlıqtan fizikalıq jaqtan inercial esaplaw sistemaları bir birinen parqqa iye bolmaydı hám bir biri menen ekvivalent boladı.

Bul fizikadaǵı eń áhmiyetli bolǵan nızamlardıń biri *salıstırmalıq princip*i dep ataladı. Bul princip absolyut keńislik, absolyut tınıshlıq hám absolyut qozǵalıstı túsiniqleriniń mániske iye bolmaytuǵınlıǵın ańlatadı.

Barlıq inercial esaplaw sistemalarında fizikanıń barlıq nızamları birdey, al inercial emes esaplaw sistemalarında hár qıylı bolatuǵınlıǵına baylanıslı fizikalıq qubılıslardı inercial esaplaw sistemalarında úyreniwdiń ańsat bolatuǵınlıǵın ańlatadı. Biz bunnan keyin talqılawlarımızda tiykarınan inercial esaplaw sistemaların paydalanamız. Al inercial emes esaplaw sistemaların paydalanıw zárúrligi payda bolǵan jaǵdaylarda bul haqqında atap ayıladı.

Haqıyqatında fizikalıq eksperimentlerde paydalanılatuǵın esaplaw sistemaları tek bazı bir dállikte ǵana inercial esaplaw sistemaları bolıp tabıladı. Eń ápiwayı bolǵan esaplaw sisteması sıpatında biz jasap atırǵan Jer menen baylanıslı bolǵan esaplaw sistemasın kórsetiwge boladı. Jer óz kósheri dógeresinde hám Quyashtıń dógeresinde aylanatuǵın bolǵanlıqtan bul sistema inercial esaplaw sisteması bolıp tabılamaydı. Hár bir noqat sol eki qozǵalıstı qatnasatuǵın bolǵanlıqtan Jer betindegi noqatlardıń tezlikleri de, qozǵalıstı baǵıtları da turaqlı bolıp qalmaydı. Sonlıqtan Jer menen baylanısqa esaplaw sisteması inercial emes esaplaw sisteması bolıp tabıladı. Biraq Jerdiń sutkalıq qozǵalıstı menen onıń Quyashtıń dógeresindegi aylanbalı qozǵalıstıń tezlikleriniń salıstırmalı kishi ekenligin esapqa alǵanda jerdi inercial esaplaw sisteması dep bir qatar fizikalıq eksperimentler ushın áhmiyetke iye bolmaytuǵınday kishi qáteleklerge jol qoyamız. Jer menen baylanısqa esaplaw sistemasındaǵı qozǵalıstı inercial esaplaw sistemasındaǵı qozǵalıstıń júdá az parqqa iye bolsa da ayırım eksperimentlerde sol parqtı ayqın baqlawǵa boladı. Buǵan mısıl retinde Fuko mayatnıǵın kórsetiwge boladı. Bul mayatnıqtıń terbelis tegisligi Jer betine salıstırǵanda áste-aqırınlıq penen burıladı.

§ 2. Tezlik

Qozğalıis nızamların úyreniwdi ólshemleri kishi bolğan denelerden baslağan tábiyiy. Bunday deneniń qozğalıis ápiwayı ámelge asadı, bul jaǵdayda deneniń aylanıwın hám usı deneniń bir bóliminiń ekinshi bólimine salıstırǵandaǵı orınlarınıń almasırganın esapqa almaymız.

Qozǵalǵanda ólshemlerin esapqa almawǵa bolatuǵın deneni materiallıq noqat dep ataymız hám bul noqat mexanikanıń úyrenetuǵın tiykarǵı obʼektleriniń biri bolıp tabıladı. Materiallıq noqat haqqında "bólekshe" haqqındaǵı sıyaqlı biz tez-tezden gáp etemiz.

Bazı bir denelerdi materiallıq noqat dep qaraw múmkinshiligi usı denelerdiń tek ǵana absolyut ólshemlerine baylanıslı emes, al fizikalıq eksperimentlerdiń ótkeriliw sharayatlarına baylanıslı. Mısalı Jerdiń Quyash dógeresinde qozǵalıis izertlegende Jerdi materiallıq noqat dep qarawǵa boladı. Biraq sutkalıq aylanısın izertlegenimizde Jerdi materiallıq noqat dep qarawǵa pútkilley bolmaydı.

Materiallıq noqattıń keńisliktegi awhalın úsh koordinatanıń járdeminde anıqlaw múmkin. Mısalı koordinatalar x, y, z dekart koordinataları bolıwı múmkin. Bunday jaǵdayda materiallıq noqattı *úsh erkinlik dárejesine* iye boladı dep aytadı.

x, y hám z sanlarınıń jıynaǵı koordinata basınan shıǵatuǵın hám usı materiallıq noqat ornasqan noqatqa barıp tireletuǵın bóleksheniń r radius-vektorın payda etedi.

Materiallıq noqattıń qozǵalıis onıń *tezligi* menen táriyiplenedi. Bir tekli qozǵalısta tezlik ápiwayı túrde waqıt birliginde ótilgen jol sıpatında anıqlanadı. Ulıwma jaǵdayda tezliktiń shaması da, baǵıtı da ózgermeli boladı. Bunday jaǵdayda tezlikti shaması bóleksheniń sheksiz kishi shamaǵa awısıw vektorı ds tiń sol sheksiz kishi awısıw orın alǵan waqıt dt ǵa qatnasına teń vektorlıq shama boladı. Tezlik vektorın v arqalı belgilep

$$v = \frac{ds}{dt}.$$

formulasına iye bolamız.

Tezlik vektorı v nıń baǵıtı ds vektorınıń baǵıtına sáykes keledi. YAǵnıy tezlik vektorınıń baǵıtı waqıttıń hár bir momentinde bóleksheniń traektoriyasına túsirilgen urınba baǵıtında boladı.

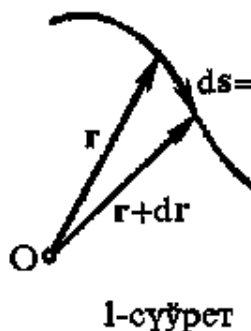
1-súwrette bazı bir materiallıq noqattıń qozǵalıis traektoriyası kórsetilgen hám t menen $t + dt$ waqıt momentlerindegi radius-vektorları r menen dr lar berilgen. Vektorlardı qosıw qaǵıydasınan paydalanıp noqattıń sheksiz kishi awısıwı ds tiń bóleksheniń radius-vektorınıń waqıttıń dáslepki hám keyingi momentlerindegi ayırması ekenligin kóriwge boladı, yaǵnıy $ds = dr$. Sonlıqtan tezlik v nı mına túrde kórsetiwge boladı

$$v = \frac{dr}{dt},$$

yaǵnıy tezlik qozǵalıwshı bóleksheniń radius-vektorınıń waqıt boyınsha alınǵan tuwındısı eken. Radius-vektor r dıń qurawshıları noqattıń x, y hám z koordinataları bolıp tabıladı. Sonlıqtan tezliktiń qurawshıları yamasa tezliktiń x, y, z kósherlerine túsirilgen proekciyaları

$$v_x = \frac{dx}{dt}, v_y = \frac{dy}{dt}, v_z = \frac{dz}{dt}$$

shamalarına teń boladı.



Tezlik materiallıq noqattırn qozǵalı halın táriyiplewshi tiykarǵı shama bolıp tabıladı. Demek bóleksheniń halı altı shamanıń járdeminde anıqlanadı eken: úsh koordinata hám tezliktiń úsh qurawshısı.

Bir materiallıq noqattırn hár qıylı bolǵan K hám K' esaplaw sistemalarındaǵı tezlikleri v hám v' arasındaǵı baylanıslardı tabamız. Eger d4 waqtı ishinde materiallıq noqat K esaplaw sistemasına salıstırǵanda ds shamasına jılssa hám K' sistemasınıń ózi K sistemasına salıstırǵanda dS shamasına jılssa $ds' = ds + dS$ ke iye bolamız. Bul teńliktiń eki tárepın de d4 ǵa bólip, K sistemasınıń K' sistemasına salıstırǵandaǵı tezligin V arqalı belgilep

$$v' = v + V$$

ekenligin alamız.

Bir materiallıq noqattırn hár qıylı esaplaw sistemasındaǵı tezliklerin baylanıstırıwshı bul formula *tezliklerdi qosıw qádesi* dep ataladı.

Birinshi ret qaraǵanda tezliklerdi qosıw qádesi óz-ózinen túsinikli sıyaqlı bolıp kórinedi. Biraq bul jerde waqtıń absolyutlıǵı haqqındaǵı naduris boljaw názerde tutilǵan. Atap aytqanda K sistemasındaǵı bóleksheniń ds shamasına jılıw ushın ketken waqt K' sistemasındaǵı sol materiallıq noqattırn ds' aralıǵına jılıw waqtına teń dep esaplandı. Waqtıń absolyut emesligine baylanıslı bunday boljaw qáte bolıp tabıladı. Biraq waqtıń absolyut emesligi tek jaqtılıqtıń tezligine jaqın tezliklerde ǵana sezile baslaydı. Joqarı tezliklerde keltirilip shıǵarılǵan tezliklerdi qosıwdıń qaǵıydası orınlanbaydı. Biz bunnan bılay tek ǵana jetkilikli dárejedegi kishi tezliklerdi qaraymız. Bunday jaǵdaylarda waqtıń absolyutlıligi haqqındaǵı boljawlar jaqsı orınlanadı.

Waqtıń absolyutlıligine tiykarlangan mexanika *nyuton mexanikası* yamasa *klassikalıq* mexanika dep ataladı. Bul kitapta biz tek usı mexanikanı úyrenemiz. Bul mexanikanıń tiykarǵı nızamları Nyutonniń 1687-jılı jariq kórgen "Natural filosofiyanıń matematikalıq baslamaları" dep atalatuǵın kitabında bayanlangan.

§ 3. Impuls

Materiallıq noqattırn basqa deneler menen tásir etispeytuǵın jaǵdaylardaǵı qozǵalısn erkin qozǵalı dep ataymız. Bunday jaǵdaylarda onıń tezligi inercial esaplaw sistemalarında ózgermeydi. Eger materiallıq noqat basqa deneler menen tásirlesetuǵın bolsa onıń tezligi waqtıń ótiwi menen ózgeredi. Bir biri menen tásir etisetuǵın bólekshelerdiń tezlikleriniń ózgeriwi bir birinen ǵárezsiz emes, al óz-ara baylanıslı. Usınday baylanıstı tabıw ushın *tuyıq sistema* túsinigin kirgizemiz. Tuyıq sistemadaǵı bóleksheler bir biri menen tásirlesedi, al sırttaǵı qorshap turǵan ortalıqtıń bóleksheleri yamasa deneleri

menen tásirlespeydi. Usınday tuyıq sistema ushın tezlikke baylanıslı, al waqıt boyınsha ózgermey qalatuǵın bir qatar shamalar bar. Bunday shamalar mexanikada áhmiyetli orınlardı iyeleydi.

Ózgermeytuǵın yamasa basqasha aytqanda *saqlanıw* qalatuǵın (*saqlanatuǵın*) bunday shamalardıń birin *sistemanıń tolıq impulsı* dep ataymız. Sistemanıń tolıq impulsı tuyıq sistemaǵa kiriwshi hár bir bóleksheniń impulslarınıń vektorlıq qosındısına teń. Materiallıq noqattıń impulsiniń vektorı onıń tezligi menen ápiwayı baylanısqa iye: impuls tezlikke proporcional. Proporcionallıq koefficienti hár bir materiallıq bólekshe ushın xarakterli turaqlı shama bolıp tabıladı hám materiallıq noqattıń *massası* dep ataladı. Impuls vektorın \mathbf{r} , materiallıq bóleksheniń massasın m hám tezligin \mathbf{v} arqalı belgilep

$$\mathbf{r} = m\mathbf{v}$$

ǵa iye bolamız. Barlıq bóleksheler ushın \mathbf{r} vektorlarınıń qosındısı sistemanıń tolıq impulsin beredi:

$$\mathbf{R} = \mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2 + \dots = m_1\mathbf{v}_1 + m_2\mathbf{v}_2 + \dots$$

Bul ańlatpadaǵı indeksler bólekshelerdiń nomerine sáykes keledi. Bul shama waqıttıń ótiwi menen ózgermey qaladı:

$$\mathbf{R} = \text{const.}$$

Solay etip tuyıq sistemanıń tolıq impulsı saqlanadı. Usı tastıyıqlaw *impulstıń saqlanıw nızamı* dep ataladı. Biz 15- paragrafta bul nızamnıń kelip shıǵıwına qaytıp kelemiz.

Solay etip impuls vektorlıq shama bolıp tabıladı. Sonlıqtan impulstıń saqlanıw nızamı úsh nızamǵa bólinedi hám bul úsh nızam tolıq impulstıń qurawshılarınıń waqıttan ǵárezsiz turaqlı bolıp qalatuǵınlıǵın ańlatadı.

Impulstıń saqlanıw nızamına *massa* dep atalatuǵın jańa shama kiredi. Bul nızamdı paydalanıp bólekshelerdiń massalarınıń qatnasların anıqlawǵa boladı. Meyli eki materiallıq bólekshe bir biri menen soqlıǵısatuǵın bolsın. Olardıń massaların m_1 hám m_2 arqalı belgileymiz. Meyli \mathbf{v}_1 hám \mathbf{v}_2 arqalı olardıń soqlıǵısqanǵa deyingi, \mathbf{v}_1' hám \mathbf{v}_2' arqalı soqlıǵısqannan keyingi tezlikleri belgilengen bolsın. Bunday jaǵdayda impulstıń saqlanıw nızamınan

$$m_1\mathbf{v}_1 + m_2\mathbf{v}_2 = m_1\mathbf{v}_1' + m_2\mathbf{v}_2'$$

ekenligi kelip shıǵadı. Bólekshelerdiń tezliginiń ózgerisin $\Delta\mathbf{v}_1$ hám $\Delta\mathbf{v}_2$ arqalı belgilep joqarıdaǵı teńlikti

$$m_1\Delta\mathbf{v}_1 + m_2\Delta\mathbf{v}_2 = 0$$

túrinde jazamız. Bunnan

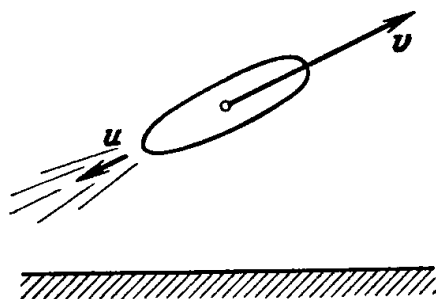
$$\Delta\mathbf{v}_2 = -\frac{m_1}{m_2}\Delta\mathbf{v}_1$$

ge iye bolamız.

Solay etip óz-ara tásirlesetuǵın eki bóleksheniń tezlikleriniń ózgerisi olardıń massalarına keri proporcional eken. Sol qatnas járdeminde tezliklerdiń ózgerisi boyınsha bólekshelerdiń massalarınıń qatnasın tabıwǵa boladı. Sonlıqtan biz qanday da bir deneniń massasın bir birlikke teń etip alıp basqa denelerdiń massasın anıqlawımız múmkin. Fizikada massanıń usınday birliǵi retinde gramm qollanıladı. (8-paragraftı qarańız).

§ 4. Reaktiv qozǵalı

Impulstıń saqlanıw nızamı tábiyattıń fundamentallıq nızamlarınıń biri bolıp tabıladı hám bir qatar qubılıslarda kórinedi. Dara jaǵdayda bul nızam reaktiv qozǵalıstıń tiykarında jatadı.



2-сүӊпет

Massasınıń ózgerisine baylanıslı raketanıń tezliginiń qalay ózgeretuǵınlıǵın tabıwdı kórsetemiz. Bazı bir t waqıt momentindegi raketanıń tezligin v , al massasını M arqalı belgileymiz. Meyli usı waqıt momentinde raketaǵa salıstırǵanda tezligi u bolǵan gaz raketa soplosınan qısılıp shıǵa baslasın. dt waqıtı ishinde raketanıń massası kemeyip $M+dM$ shamasına teń boladı. Bul jerde $-dM$ shıqqan gazdıń massası. Usınıń menen birge raketanıń tezligi ósedi hám $v + dv$ ǵa teń boladı. Endi t hám $t+dt$ waqıt momenlerindegi raketa+shıǵarılǵan gaz sistemasınıń impulsin salıstıramız. Raketanıń dáslepki impulsı Mv ǵa teń ekenligi anıq. Al $t+dt$ waqıt momentindegi raketanıń impulsı $(M+dM)(v+dv)$ ǵa (dM niń shaması teris), al shıǵarılǵan gazdıń impulsı $-dM(v-u)$ ge teń. Sebebi Jerge salıstırǵandaǵı gazdıń tezligi $v-u$ ǵa teń (2-súwret). Impulstıń saqlanıw nızamı boyınsha eki waqıt momentindegi impulslardı salıstırırıwımız kerek:

$$Mv = (M+dM)(v+dv) - dM(v-u).$$

Bul ańlatpadaǵı ekinshi tártipli kishi shama bolǵan $dMdv$ nı esapqa almay

$$Mdv + udM = 0$$

yamasa

$$\frac{dM}{M} = -\frac{dv}{u}$$

teńlemelerine iye bolamız.

Gazdıń tezligi waqıttıń ótiwi menen ózgermeydi dep esaplaymız. Sonlıqtan keyingi teńlemeni bilayınsha kóshirip jazamız:

$$d \ln M = -d \frac{v}{u}.$$

Bunnan

$$\ln M + \frac{v}{u} = \text{sonst.}$$

sonst tıń mánisi dáslep $v = 0$ bolǵandaǵı raketanıń massasınıń M_0 ge teń ekenliginen anıqlanadı:

$$\text{sonst} = \ln M_0.$$

Bul mánisti joqarıdaǵı teńlemege qoyamız

$$\ln M + \frac{v}{u} = \ln M_0.$$

Bunnan eń keyingi ańlatpamızdı alamız:

$$v = u \ln \frac{M_0}{M}$$

Bul formula raketanıń tezliginiń onıń massasınıń ǵárezliligin anıqlaydı.

§ 5. Inerciya orayı

Impulstıń saqlanıw nızamı menen *massanıń saqlanıw nızamı* dep atalatuǵın massanıń jáne de bir áhmiyetli qásiyeti baylanıslı. Bul nızamnıń mánisin túsindiriw ushın bólekshelerdiń tuyıq sistemasındaǵı sistemanıń *inerciya orayı* dep atalatuǵın noqattı qaraymız. Inerciya orayınıń koordinatası bólekshelerdiń koordinatasınıń ortasha mánisine teń bolıp, bóleksheniń massasında qanshama birlik massa bolsa sol bóleksheniń koordinatası sonshama ret esaplanadı. Basqa sóz benen aytqanda x_1, x_2, \dots shamaları massaları m_1, m_2, \dots bolǵan bólekshelerdiń x koordinataları bolsa, onda inerciya orayınıń x koordinatası

$$X = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2 + \dots}{m_1 + m_2 + \dots}$$

formulası járdeminde anıqlanadı. Usı formulaǵa sáykes formulalardı u hám z koordinataları ushın da jazıwǵa boladı. Bul formulalardıń barlıǵı da \mathbf{R} radius-vektori ushın jazılǵan bir ańlatpa túrinde jazılıwı múmkin:

$$\mathbf{R} = \frac{m_1 \mathbf{r}_1 + m_2 \mathbf{r}_2 + \dots}{m_1 + m_2 + \dots},$$

bul formulada $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots$ arqalı ayırım bólekshelerdiń radius-vektorları belgilengen.

Inerciya orayı júdá áhmiyetli bolǵan qásiyetke iye: tuyıq sistemanıń quramına kiriwshi bólekshelerdiń tezlikleri waqıttıń ótiwi menen ózgeretuǵın bolsa da, inerciya orayı turaqlı tezlik penen qozǵaladı. Haqıyqatında da inerciya orayınıń qozǵalıstı tezligin qarayıq. Ol mınaǵan teń:

$$\mathbf{V} = \frac{d\mathbf{R}}{dt} = \frac{m_1 \frac{d\mathbf{r}_1}{dt} + m_2 \frac{d\mathbf{r}_2}{dt} + \dots}{m_1 + m_2 + \dots}.$$

Bul formulada $\frac{d\mathbf{r}_1}{dt}, \frac{d\mathbf{r}_2}{dt}, \dots$ sáykes birinshi, ekinshi h.t.b. bóleksheniń tezlikleri. Bul tezliklerdi $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots$ arqalı belgilesek

$$\mathbf{V} = \frac{m_1 \mathbf{v}_1 + m_2 \mathbf{v}_2 + \dots}{m_1 + m_2 + \dots}$$

ańlatpasın alamız. Bul ańlatpanıń alımı sistemanıń tolıq impulsı bolıp tabıladı. Onı biz \mathbf{R} arqalı belgiledik. Sonlıqtan eń aqırında

$$\mathbf{V} = \frac{\mathbf{P}}{M}$$

formulasına iye bolamız. Bul jerde $M = m_1 + m_2 + \dots$ barlıq bólekshelerdiń massaları.

Bul jerde sistemanıń tolıq impulsı saqlanatuǵın bolǵanlıqtan inerciya orayınıń da tezligi waqıtqa baylanıslı ózgermeydi eken degen juwmaq shıǵaramız.

Alınǵan formulanı

$$\mathbf{R} = M\mathbf{V}$$

dep kóshirip jazıp sistemanıń tolıq impulsı, onıń inerciya orayınıń tezligi hám sistemaǵa kiriwshi bólekshelerdiń massalarınń qosındısı arasındaǵı qatnas ayırım bóleksheniń impulsı, tezligi hám massası arasındaǵı qatnastay bolatuǵınlıǵı kóremiz. Biz sistemanıń tolıq impulsın usı sistemanıń inerciya orayında jaylasqan massası usı sistemaǵa kiriwshi bólekshelerdiń massalarınń qosındısına teń bir materiallıq noqattıń impulsınday dep qabıl ete aladı ekenbiz. Inerciya orayınıń tezligin sistemadaǵı bólekshelerdiń tutası menen alǵandaǵı tezligi túrinde qarawǵa boladı, al ayırım bólekshelerdiń massalarınń qosındısı barlıq sistemanıń massasına teń.

Solay etip quramalı deneniń massasınıń onıń bólekleriniń massalarınń qosındısına teń ekenligin kóremiz. Bul tastıyıqlaw biziń ushın ádetke aylanǵan hám ózinen ózi

túsiniklidey bolıp kórinedi. Haqıyqatında bul ápiwayı nárese emes, al impulstıń saqlanıw nızamınıń nátiyjesi bolǵan fizikalıq nızamnıń mánisin quraydı.

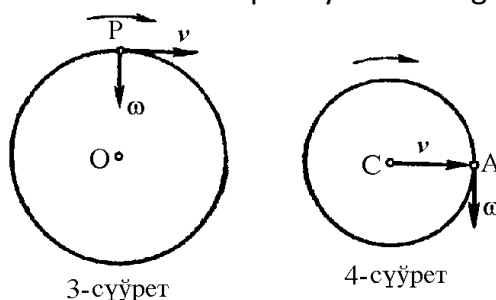
Tuyıq sistemalıń inerciya orayınıń tezligi waqıtqa baylanıslı ózgermeytuǵın bolǵanlıqtan, usı inerciya orayı menen esaplaw sistemasın baylanıstırıp biz bazı bir inerciallıq esaplaw sistemasın alamız. Bunday sistema *inerciya orayı sisteması* dep ataladı. Bólekshelerdiń tuyıq sistemasınıń tolıq impulsi bunday sistemada nolge teń. Bunday sistemadaǵı qubılıslardı táriyiplew ushın bólekshelerdiń tutası menen qozǵalıwınıń saldarınan payda bolatuǵın quramalasıwlar saplastırıladı hám sistema ishindegi processlerdiń qásiyetleri ayqınıraq kórinedi. Usı sebeplerge baylanıslı inerciya orayı sisteması fizikada jiıy paydalanıladı.

§ 6. Tezleniw

Materiallıq noqattıń qozǵalıwınıń ulıwma jaǵdaylarında onıń tezligi shaması boyınsha da, baǵıtı boyınsha da úzliksiz túrde ózgeredi. Meyli dt waqıtı ishinde tezlik $d\mathbf{v}$ shamasına ózgeretuǵın bolsın. Eger usı ózgeristiń waqıt birligine qatnasın alatuǵın bolsaq biz materiallıq *noqattıń* tezleniw vektorın alamız. Bul shamalı \mathbf{w} arqalı belgilep tezleniwdiń

$$\mathbf{w} = \frac{d\mathbf{v}}{dt}$$

ge teń bolatuǵınlıǵın kóremiz. Solay etip tezleniw bóleksheniń tezliginiń ózgerisin anıqlaydı hám shaması jaǵınan tezlikten waqıt boyınsha alınǵan tuwındıǵa teń.



Eger tezliktiń baǵıtı ózgermese, yaǵnıy materiallıq noqat tuwrı sıziq boyınsha qozǵalatuǵın bolsa tezleniwdiń ózi de usı baǵıtta baǵıtlanǵan bolıp shaması

$$w = \frac{dv}{dt}$$

ǵa teń.

Materiallıq noqattıń tezliginiń shaması ózgermey, tek baǵıtı boyınsha ózgeretuǵın jaǵdaydaǵı tezleniwdi ańsat anıqlawǵa boladı. Bul jaǵday materiallıq noqat sheńber boyınsha bir tekli qozǵalǵanda orın aladı.

Meyli, bazı bir waqıt momentinde bóleksheniń tezligi \mathbf{v} bolsın (3-súwret). 4-súwrette keltirilgen járdemshi grafikte \mathbf{v} vektorın S noqatınan baslanatuǵın etip qoyamız. Bóleksheni sheńber boyınsha teń ólsheuli qozǵalǵanda \mathbf{v} vektorınıń ushı da (A noqatı) radiusı tezliktiń absolyut mánisi v ǵa bolǵan sheńber boyınsha teń ólsheuli qozǵaladı. A noqatınıń orın almasıw tezliginiń dáslepki R bólekshesiniń tezleniwi bolıp tabılatuǵınlıǵı túsinikli. Sebebi A noqatınıń dt waqıtı ishinde orın almasıwı $d\mathbf{v}$ ǵa teń hám sonlıqtan A noqatınıń tezligi $\frac{dv}{dt}$ ǵa teń. Bul tezlik S sheńberine túsilgen urınbanıń baǵıtına iye bolıp \mathbf{v} ǵa perpendikulyar. Súwrette ol \mathbf{w} háribi menen belgilengen. Eger biz R noqatında \mathbf{w} vektorın dúzetuǵın bolsaq, onda onıń sheńberdiń orayı O ǵa qaray baǵıtlanatuǵınlıǵı anıq.

Solay etip sheńber boyınsha teń ólshewli qozǵalatuǵın materiallıq noqattıń tezleniw usı sheńberdiń orayına qaray baǵıtlangan, yaǵnıy bóleksheniń tezligine perpendikulyar boladı.

Tezleniw w nıń mánisin anıqlayıq. Bunıń ushın v radiusına iye sheńber boyınsha qozǵalıwshı A noqatınıń tezligin tabıw kerek. R noqatı sheńberdi T waqtında bir ret aylanıp shıqsın. Usınday waqıt ishinde A noqatı da sheńberdi bir ret aylanıp shıǵadı hám $2\pi r$ jolin ótedi. Sonlıqtan w ǵa teń bolǵan A noqatınıń tezligi

$$w = \frac{2\pi v}{dt}$$

ǵa teń. Bul ańlatpaǵa dáwirdiń mánisi $T = \frac{2\pi r}{v}$ di qoysaq (R bóleksheniń traektoriyasınıń radiusı arqalı belgilengen) aqırǵı ańlatpanı alamız:

$$w = \frac{v^2}{r}.$$

Solay etip eger tezliktiń mánisi tek shaması boyınsha ózgeretuǵın bolsa, onda tezleniw menen tezliktiń baǵıtları birdey boladı. Eger tezliktiń tek baǵıtı ózgeretuǵın bolsa (shaması turaqlı qalıp), onda tezleniw hám tezlik vektorları bir birine perpendikulyar.

Ulıwma jaǵdayda tezlik shaması boyınsha da, baǵıtı boyınsha da ózgeriske ushıraydı. Bunday jaǵdayda tezleniw eki qurawshıǵa iye boladı: birewi tezlik baǵıtında, ekinshisi tezlikke perpendikulyar. Tezlikke parallel bolǵan tezleniwdiń qurawshısı *urınba* yamasa *tangensial* qurawshı dep ataladı. Onıń shaması tezlikten waqıt boyınsha alınǵan tuwındıǵa teń:

$$w_{\tau} = \frac{dv}{dt}.$$

Tezleniwdiń ekinshi qurawshısı w_n *normal qurawshı* dep ataladı. Ol bóleksheniń tezliginiń kvadratına proporcional hám berilgen noqattaǵı traektoriyanıń iymeklik radiusına kerı proporcional.

§ 7. Kúsh

Eger materiallıq bólekshe erkin qozǵalatuǵın bolsa, yaǵnıy bul bólekshe qorshap alǵan basqa deneler menen tásirlespeytuǵın bolsa, onda onıń impulsı saqlanadı. Kerisinshe, eger bólekshe átiraptaǵı deneler menen tásirlesetuǵın bolsa, onda onıń impulsı waqıttıń ótiwi menen ózgeredi. Solay etip biz materiallıq noqattıń impulsiniń ózgerisin átiraptaǵı deneler tárepinen tásirdiń ólshemi sıpatında qabıl ete alamız. Bul ózgeris (waqıttıń bir birligindegi) qanshama úlken bolsa, tásir de intensivlirek boladı. Sonlıqtan tásirdi anıqlaw ushın materiallıq noqattıń impuls vektorınan waqıt boyınsha alınǵan tuwındını qarap shıǵıw kerek. Bul tuwındı materiallıq noqatqa tásir etiwshi *kúsh* degen atqa iye.

Bunday anıqlama tásirlesiwdiń bir tárepin táriyipleydi. Atap aytqanda bul anıqlama materiallıq noqattıń átiraptaǵı denelerdiń tásirin "seziwiniń" dárejesin belgileydi. Biraq materiallıq noqattıń átiraptaǵı deneler menen tásirlesiwın úyrene otırıp bul tásirlesiwdi materiallıq noqattıń halı menen átiraptaǵı denelerdiń halın táriyipleytuǵın shamalar menen baylanıstırıw múmkin.

Materiallıq noqatlar arasındaǵı tásir etisiw kúshleri tek ǵana sol bólekshelerdiń iyelegen orınlarına baylanıslı (klassikalıq mexanikada). Basqa sóz benen aytqanda bóleksheler arasındaǵı tásir etiwshi kúshler tek ǵana olar arasındaǵı qashıqlıqqa ǵárezli, al olardıń tezliklerine baylanıslı emes.

Materiallıq noqatlar arasındığı tásirlesiwdiń tiykarında jatqan fizikalıq qubılıslardı úyreniwdiń nátiyjesinde kúshtiń bóleksheler arasındığı qashıqlıqqa ġárezliginiń xarakterini ańqlanıwı múmkin.

Koordinatalarına hám átiraptağı denelerdiń qásiyetleri menen óz-ara ornalasıwlarına ġárezli bolǵan materiallıq noqatqa tásir etiwshi kúshti " arqalı belgileymiz. Bunday jaǵdayda biz kúsh ushın eki ańlatpanıń – materiallıq noqattıń impulsı \mathbf{r} nıń waqıt birligindegi ózgerisi hám kúsh \mathbf{G} tiń teńligin jazamız:

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \mathbf{G}.$$

Bul teńlik materiallıq noqattıń *qozǵalıstı teńlemesi* dep ataladı.

Impuls $\mathbf{r} = m\mathbf{v}$ bolǵanlıqtan materiallıq noqattıń qozǵalıstı teńlemesin bilayınsha jazalamız:

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{G}.$$

Solay etip materiallıq noqatqa tásir etiwshi kúsh materiallıq noqattıń tezleriwi menen massasınıń kóbeymesine teń boladı eken. Bul tastıyıqlaw *Nyutonnıń ekinshi nızamı* dep atalatuǵın nızamnıń mazmunın quraydı.

Bul nızamnıń " tiń bóleksheniń koordinatalarınan ġárezliliginiń anıq túri anıqlanǵan keyin ǵana ayqın mániske iye bolatuǵınlıǵın atap ótemiz. Bunday jaǵdayda (yaǵnıy " funkciyasınıń túri belgili bolsa) qozǵalıstı teńlemesiniń járdeminde materiallıq noqattıń tezligi menen koordinatalarınan ġárezliligini, basqa sóz benen aytqanda bóleksheniń traektoriyasını anıqlawǵa múmkinshilik tuwıladı. Usınday jaǵdaydarda " tiń túri menen birge *baslanǵısh shártler* (baslanǵısh dep qabıl etilgen waqıt momentindegi bóleksheniń awhalı menen tezligi) dep atalatuǵın shártler belgili bolıwı kerek. Qozǵalıstı teńlemesi hár bir dt waqıt intervalındaǵı tezliktiń ósimin ($d\mathbf{v} = \frac{\mathbf{F}}{m} dt$) beretuǵın, al tezlik boyınsha bóleksheniń keńisliktegi ornınıń ózgerisi anıqlanatuǵı bolǵanlıqtan ($d\mathbf{r} = \mathbf{v} dt$) bóleksheniń dáslepki tezligi menen dáslepki ornınıń beriliwi haqıyqatında da bóleksheniń bunnan bilayǵı qozǵalıstı anıqlaw ushın tolıq jetkilikli ekenligi túsiniqli. Atap aytqanda 2-paragraftaǵı bóleksheniń mexanikalıq halı onıń koordinataları hám tezligi menen anıqlanadı degen tastıyıqlawdıń mánisi usınnan ibarat boladı.

Qozǵalıstı teńlemesi vektorlıq teńleme bolıp tabıladı. Sonlıqtan onı kósherlerge túsirilgen tezleniwdiń proekciyaları menen kúshtiń proekciyaların baylanıstıratuǵın úsh teńleme túrinde kóshirip jazıw múmkin:

$$m \frac{dv_x}{dt} = F_x, \quad m \frac{dv_y}{dt} = F_y, \quad m \frac{dv_z}{dt} = F_z.$$

Materiallıq noqatlardıń tuyıq sistemasına qaytıp kelemiz. Bizler bunday noqatlardıń impulslarınıń qosındısınıń saqlanatuǵınlıǵın bilemiz:

$$\mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2 + \dots = \text{sonst.}$$

Bul ańlatpadaǵı \mathbf{r}_i arqalı i -materiallıq noqattıń impulsı belgilengen. Bul teńlemenı waqıt boyınsha differenciallaymız:

$$\frac{d\mathbf{p}_1}{dt} + \frac{d\mathbf{p}_2}{dt} + \dots = 0.$$

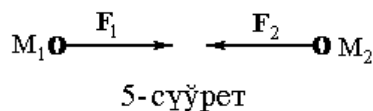
$$\frac{d\mathbf{p}_i}{dt} = \mathbf{F}_i$$

ekenligin esapqa alsaq (\mathbf{G}_i arqalı i -materiallıq noqatqa tásir etiwshi kúsh belgilengen)

$$\mathbf{G}_1 + \mathbf{G}_2 + \dots = 0$$

ekenligine iye bolamız.

Solay etip tuyıq sistemadaǵı barlıq kúshlerdiń qosındısı nolge teń boladı.



Eger sistema tek ǵana eki deneye iye bolsa, onda birinshi dene tárepinen ekinshi deneye tásir etetuǵın kúsh ekinshi dene tárepinen birinshi deneye tásir etetuǵın kúshke shaması jaǵınan teń. al baǵıtları boyınsha qarama-qarsı bolıwı kerek. Bul tastıyıqlaw *tásir menen qarsı tásirdiń teńligi nızamı* (yamasa *Nyutonnıń úshinshi nızamı*) dep ataladı. Bul jaǵdayda tek ǵana bir baǵıt bolǵanlıqtan (materiallıq noqatlardı baylanıstıratuǵın tuwrı menen baǵıtlas) "1 kúshi menen "2 kúshi bir tuwrınıń baǵıtında boladı (5-súwrette M_1 menen M_2 eki materiallıq noqatlardı bildiredi).

§ 8. Fizikalıq shamalardıń ólshemleri

Barlıq fizikalıq shamalar anıq ólshemlerde ólshenedi. Qanday da bir shamalı ólshew degenimiz sol ólshemdi birlik retinde qabıl etilgen ólshem menen salıstırıw bolıp tabıladı.

Principinde hár bir fizikalıq shama ushın iqtıyarlı túrde qanday da bir birlikti qabıl etiw múmkin. Biraq hár qıylı fizikalıq shamalar arasındadı qatnaslardı paydalanıw arqalı tiykarǵı dep qabıl etilgen bazı bir shamalar ushın tek shekli sandadı iqtıyarlı shamalardı saylap alıw múmkin. Al basqa shamalar ushın usı *tiykarǵı birlikler* menen baylanısqa birliklerdi dúziwge boladı. Bunday birliklerdi *tuwındı birlikler* dep ataymız.

Fizikada tiykarǵı birlikler retinde uzınlıq, waqıt hám massa qabıl etilgen.

Fizikada uzınlıq birligi retinde metrdiń júzden birine teń santimetr (sm) xızmet etedi. Házirgi waqıtları metr kripton gaziniń spektrindegı qızıl reńli sıziqtıń uzınlıǵınan $1\ 650\ 763,73$ ese úlken bolǵan shamaǵa teń.

Dáslep metr 1792-jılı ólshengen Parij qalası arqalı ótetuǵın meridiannıń on millionnan bir bólegi sıpatında qabıl etildi hám metrdiń etalonı dúzildi. Metrdi usınday etip "tábiiy" anıqlaw júdá qıyın, sonlıqtan keyinirek Parij qalasındadı %lshemler menen salmaqlardıń xalıqaralıq byurosında saqlanıp turǵan platina-iridiyden islengen metrdiń prototipi bolǵan bazı bir etalon qollanıla basladı. Biraq házirgi waqıtları usı usıdan da bas tartıldı hám joqarıda gáp etilgen "jaqtılıq" metriniń anıqlaması ("kripton gaziniń spektrindegı qızıl reńli sıziqtıń uzınlıǵınan $1\ 650\ 763,73$ ese úlken bolǵan shama") qollanıladı.

Kishi uzınlıqlardı ólshew ushın tómendegidey birlikler qollanıladı: mikron, $1\ mkm = 10^{-4}\ sm$ ~ millimikron, $1\ mmkm = 10^{-7}\ sm$ ~ angstrom, $1\ \overset{0}{A} = 10^{-8}\ sm$ ~ fermi, $1\ fermi = 10^{-13}\ sm$.

Astronomiyada qashıqlıqlar jaqtılıq jılı menen ólshenedi (jaqtılıq nurınıń bir jıldı ótken jolınıń uzınlıǵı). 1 jaqtılıq jılı $9,46 \cdot 10^{17}\ cm$. 3.25 jaqtılıq jılına, yaǵnıy $3,08 \cdot 10^{18}\ sm$ ge teń qashıqlıq *parsek* dep ataladı. Usınday qashıqlıqta Jerdiń orbitası $1''$ múyesh penen kórinedi.

Fizikada waqıt sekundlarda ólshenedi. Házirgi waqıtları sekund (*sek*) anıq tropikalıq jıldıń (1900-jıl) anıq bir bólegi sıpatında anıqlanadı. Tropikalıq jıl dep Quyashtıń báhargı kún teńlesiw arqalı izbe-iz eki ótiwi arasındadı waqıttı aytamız. 1900-jıldıń alınıwı tropikalıq jıldıń uzaqlıǵınıń turaqlı emes ekenligine baylanıslı. Tropikalıq jıldıń uzınlıǵı hár 100 jıldı $0.5\ sek$ qa uzaradı.

Dáslep sekund Quyash sutkasınıń bazı bir bólegi sıpatında qabıl etildi (1/86400 bólegi). Biraq Jerdiń sutkalıq aylanıwı teń ólshewli emes hám sutkanıń uzınlıǵı da ózgerissiz qalmaydı. Sutkanıń uzınlıǵınıń salıstırmalı terbelisi 10^{-7} ge teń. Texnikanıń házirgi waqıtlarındaǵı qáddi ushın bul shama júdá úlken hám sonlıqtan sekundtı Jerdiń sutkalıq aylanısınıń uzınlıǵına baylanıslı qabıl etiwge bolmaydı. Tropikalıq jıldıń uzınlıǵındaǵı salıstırmalı terbelistiń mánisi ádewir kishi, biraq Jerdiń Quyash dógeresinde aylanıp shıǵıwınıń uzınlıǵına qarap ta anıqlaw qanaatlandırarlıq nátiye bermeydi. Bul jaǵdayda da waqıttıń birliginiń etalonın jetkilikli dárejede dál ala almaymız. Bunday qıyınshılıqlar tek ǵana Jerdiń Quyash dógeresinde aylanıwına tiykarlanıp emes, al atomlarda orın alatuǵın dáwirli processlerge tiykarlanganda joǵaladı. Bunday jaǵdayda "jaqtılıq" sentimetrdiń uzınlıqtıń tábiyiy birligine aylanǵanıday waqıttıń da tábiyiy birligine iye bolamız.

Joqarıda esletilip ótilgenindey fizikada massa grammlarda ólshenedi. Bir gramm Parij qalasındaǵı ólshemler hám salmaqlar byurosındaǵı saqlanıp turǵan kilogrammnıń mıńnan birine teń.

Eń dáslep 1 kilogramm massa 4°S temperaturadaǵı bir decimetr kub suwdıń massası sıpatında qabıl etildi (usınday temperaturada suw eń úlken tıǵızlıqqa iye). Biraq ólshewlerdiń dálliginiń ósiwine baylanıslı metrdiń eń dáslepki anıqlamasında bul anıqlamanı da saqlap turıw múmkin bolmadı: eger bul anıqlamanı saqlap turǵanda tiykarǵı etalonlardı ózertip barıw zárúrliǵı payda boldı. Házirgi waqıtları distillyaciyalangan suwdıń massası 4°S da 1 g emes, al 0.999972 g ǵa teń.

Biraq kilogrammdı qanday da bir kilogrammnıń etalonı sıpatında anıqlaw da metrdi "shtrixlangan" ólshemge salıstırıp anıqlaǵanday kemshilikke iye. Kilogrammdı kilogrammnıń etalonına qarap emes, al qanday da bir atomnıń yadrosınıń massasına (mısalı protonnıń massasına) salıstırıp anıqlaǵanda bir qansha tábiyiylew bolǵan bolar edi.

Endi tuwındı birliklerdiń qalay dúziletuǵınlıǵın qarap shıǵamız. Birqansha mısallar keltiremiz.

Tezliktiń birligi sıpatında qanday da bir iqtıyarlı tezlikli alıwǵa bolar edi (mısalı jaqtılıqtıń vakuumdegi tezligi yamasa Jerdiń Quyash dógeresinde aylanıw tezligi). Biraq tezliktiń birligin anıqlaǵanda joldıń waqıtqa qatnası ekenligin basshılıqqa alıwǵa boladı. Usınday jaǵdayda tezliktiń birligi bir sekundta bir santimetr joldı ótetuǵın tezlikke teń bolǵan bolar edi. Bunday birlik ushın $1 \frac{\text{sm}}{\text{sek}}$ belgilewi qollanıladı. $\frac{\text{sm}}{\text{sek}}$ simvolı tiykarǵı birliklerdegi (uzınlıq santimetrde, waqıt sekundta) *tezliktiń ólshemi* dep ataladı. Tezliktiń ólshemi bilay jazıladı:

$$[v] = \frac{\text{sm}}{\text{sek}}.$$

Tezleniwde de másele usılay sheshiledi. Tezleniwdiń ólshemi sıpatında qálegen tezleniwdi qabıl etiwge bolar edi (mısalı erkin túsiw tezleniwi). Biraq tezleniwdiń waqıt birligindegi tezliktiń ózgerisi ekenligi haqqındaǵı anıqlamanı da basshılıqqa alıwǵa boladı hám birlik retinde bir sekundta tezlik $1 \frac{\text{sm}}{\text{sek}}$ qa ózgeretuǵın tezleniwdiń shamasın birlik retinde qabıl etedi. Tezleniwdiń bunday birli ushın $1 \frac{\text{sm}}{\text{sek}^2}$ belgilewi qollanıladı. $\frac{\text{sm}}{\text{sek}^2}$ simvolı tezleniwdiń ólshemi boladı:

$$[\omega] = \frac{\text{sm}}{\text{sek}^2}.$$

Endi kúshitiń ólshemin hám onıń birligin anıqlaymız. Bul ushın kúshitiń massa menen tezleniwdiń kóbeymesi ekenligi haqqındaǵı anıqlamadan paydalanamız. Qanday da bir G fizikalıq shamanıń ólshemi ushın $[G]$ belgisin qollanıp kúsh ushın mınaday anlatpa alamız:

$$[G] = [m][\omega] = \frac{g \cdot sm}{sek^2}.$$

Kúshitiń birligi retinde $1 \frac{g \cdot sm}{sek^2}$ dı alıw múmkin. Bunday kúsh *dina* dep ataladı. 1 *dina* kúsh massası 1 *g* bolǵan denegе $1 \frac{sm}{sek^2}$ ge teń tezleniw beredi.

Solay etip hár qıylı shamalar arasındaǵı baylanıslardı paydalanıw arqalı birlikleri ıqtıyarlı túrde saylap alınatuǵın tiykarǵı dep qabıl etiletuǵın kóp emes sandaǵı shamalardıń járdeminde barlıq fizikalıq shamalardıń ólshemlerin anıqlawǵa boladı eken. Tiykarǵı birlikler bolǵan uzınlıq ushın santimetrdi, massa ushın grammdı, waqıt ushın sekundtı óz ishine alatuǵın sistema *birliklerdiń fizikalıq sisteması* yamasa SGS (SGS) sisteması dep ataladı.

Bul sistemadaǵı ıqtıyarlı túrde alınǵan úsh tiykarǵı birliktiń bolıwı qanday da bir tereń fizikalıq mániske iye dep oylamaw kerek. Bul tek usı birliklerde dúzilgen sistemaniń praktikalıq jaqtan qolaylılıǵına baylanıslı. Principinde ıqtıyarlı túrde alınǵan basqa da sandaǵı birliklerge tiykarlanǵan birlikler sistemasın dúziw múmkin (bul máselege bizler 22-paragrafta qaytıp kelemiz).

Algebralıq shamalar menen qanday ámeller júrgiziletuǵın bolsa (yaǵnıy sanlar ústinde qanday ámeller júrgiziletuǵın bolsa), ólshemler menen de sonday matematikalıq ámellerdi júrgiziw múmkin. Hár qıylı fizikalıq shamalardı óz ishine alatuǵın qálegen teńliktiń eki tárepiniń de ólshemleriniń bardey bolıwınıń kerekligi óz-ózinen túsiniqli. Bul jaǵdaydı formulalardı teksergende paydalanıw kerek.

Fizikalıq kóz-qaraslar boyınsha kóplegen jaǵdaylarda qanday da bir fizikalıq shamanıń tek ǵana basqa bazı bir anıq shamalardan ǵárezli bolatuǵınlıǵın kóriwge boladı. Kópshilik jaǵdaylarda ólshemleri boyınsha-aq izlenip atırǵan baylanıslardıń xarakterin anıqlaw múmkinshiligi tuwıladı. Tógende usıǵan baylanıslı misallar menen tanısamız.

SGS birlikler sisteması menen qatar basqa da birlikler sistemaları qollanıladı. Bunday sistemalarda massa hám uzınlıq ushın *g* hám *sm* lerge qaraǵanda úlkenirek shamalar qollanıladı. Xalıq aralıq birlikler sisteması SI (SI) mına birliklerge tiykarlanǵan: uzınlıq ushın metr, massa ushın kilogramm hám waqıt ushın sekund. Bunday sistemadaǵı kúshitiń ólshemi *nyuton* (*n*) dep ataladı:

$$1 \, n = 1 \frac{kg \cdot m}{sek^2} = 10^5 \, din.$$

Texnikalıq esaplawlarda kúsh basqa birliklerde – kilogrammlarda (*kG*) ólshenedi. Bul massası 1 *kg* bolǵan deneniń teńiz qáddinde 45° keńliktegi Jerge qaray tartılıs kúshi bolıp tabıladı. Onıń shaması

$$1 \, kG = 9.8910^5 \, din = 9.8 \, n.$$

ǵa teń (dáliregi 980 665 *din*).

§ 9. Bir tekli maydandaǵı qozǵalıslar

Eger keńisliktiń hár bir noqatında bólekshege anıq kúsh tásir etetuǵın bolsa, onda bul kúshlerdiń jıynaǵın *kúsh maydanı* dep ataymız.

Ulıwma jaǵdaylarda maydan kúshleri keńisliktiń bir noqatınan ekinshi noqatına ótkende de, waqıttıń ótiwi menen de ózgeriwi múmkin.

Materiallıq noqattıń eń ápiwayı bolǵan bir tekli hám turaqlı maydandaǵı qozǵalısnı qaraymız. Bunday maydannıń kúshleri barlıq noqatlarda da birdey mániske jáne baǵıtqa iye bolıp waqıtqa baylanıslı ózgermeydi. Bunday maydanga misal retinde Jerdiń betindegi salmaq maydanın kórsetiwge boladı.

Materiallıq noqattıń qozǵalıstıń teńlemesi

$$m \frac{dv}{dt} = \vec{G}$$

ten $\vec{G} = \text{sonst}$ bolǵanda

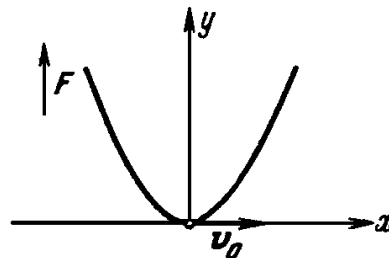
$$\vec{v} = \frac{1}{m} \vec{G}t + \vec{v}_0$$

ekenligi kelip shıǵadı. Bul ańlatpadaǵı \vec{v}_0 materiallıq noqattıń dáslepki tezligi. Solay etip bir tekli hám turaqlı maydanda tezlik waqıttıń sıızıqlı funkciyası bolıp tabıladı eken.

\vec{v} ushın alınǵan ańlatpadan materiallıq noqattıń kúsh vektorı \vec{G} penen dáslepki tezlik vektorı \vec{v}_0 jatatuǵın tegislikte qozǵalatuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Bul tegislikti x hám u koorinataları tegisligi sıpatında qabıl etemiz hám u kósherin kúsh \vec{G} tiń baǵıtında baǵıtlaymız. Bóleksheniń \vec{v} tezligin anıqlawshı teńleme tezliktiń proekciyaları v_x hám v_u eki teńlemege ayırıladı:

$$v_y = \frac{F}{m} + v_{y0}, \quad v_x = v_{x0}.$$

Bul ańlatpadaǵı v_{x0} hám v_{u0} tezliktiń proekciyalarınń baslanǵısh mánisleri.



6-сүрет

Tezliktiń proekciyalarınń bóleksheniń sáykes koorinatalarınan waqıt boyınsha alınǵan tuwındı ekenligin eske alıp keyingi teńlemelerdi ózgerтип kóshirip jazamız:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{F}{m}t + v_{u0}, \quad \frac{dx}{dt} = v_{x0}.$$

Bunnan mınaday ańlatpalardı alamız:

$$u = \frac{F}{2m}t^2 + v_{u0}t + u_0, \quad x = v_{x0}t + x_0.$$

Bul ańlatpada x_0 hám u_0 arqalı materiallıq bóleksheniń koorinatalarınń dáslepki (baslanǵısh) mánisleri belgilengen. Usı ańlatpalardıń járdeminde bóleksheniń traektoriyası anıqlanadı. Eger waqıttı tezliktiń proekciyası v_u nolge teń bolǵan momentten baslap esaplasa (yaǵnıy $v_{u0} = 0$ bolǵan momentten baslansa) bul ańlatpalar ápiwayılasadı. Usı waqıt momentindegi bólekshe turǵan noqatqa koorinata basın ornalastıramız. Bunday jaǵdayda $x_0 = u_0 = 0$. Eń aqırında tezliktiń eń baslanǵısh mánisi v_0 menen sáykes keletuǵın shamanı v_{x0} arqalı belgilep tómendegini alamız:

$$u = \frac{F}{2m}t^2, \quad x = v_0t.$$

Bul ańlatpalardan t nı joǵaltsaq

$$u = \frac{F}{2mv_0^2}x^2$$

parabolanıń teńlemesin alamız (6-súwret). Solay etip bir tekli maydanda bólekshe parabola tárizli orbita boyınsha qozǵaladı.

§ 10. Jumıs hám potencial energiya

Materiallıq noqattıń bazı bir \vec{G} kúsh maydanındaǵı qozǵalısnı qaraymız. Eger \vec{G} kúshiniń tásirinde materiallıq noqat sheksiz kishi ds jolın ótetuǵın bolsa, onda

$$dA = \vec{G} ds \cos \theta,$$

(θ arqalı \vec{G} hám ds vektorları belgilengen) ańlatpası \vec{G} kúshiniń ds jolındaǵı *jumısı* dep ataladı. Eki \mathbf{a} hám \mathbf{b} vektorınıń absolyut shamaların ular arasındaǵı múyeshtiń kosinusına kóbeymesi bul vektorlardıń *skalyar kóbeymesi* dep ataladı hám \mathbf{ab} túrinde belgilenedi. Sonlıqtan jumıstı kúsh vektorınıń bóleksheniń orın awıstırıwı vektorına skalyar kóbeymesi sıpatında anıqlaymız:

$$dA = "ds.$$

Bul ańlatpanı

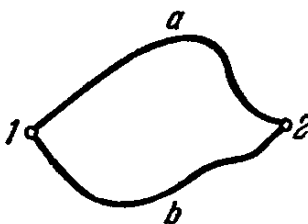
$$dA = "s ds$$

túrinde jazıw múmkin (bul ańlatpada \vec{G}_s arqalı \vec{G} kúshiniń bóleksheniń awısıwı ds baǵıtındaǵı proekciyası belgilengen).

Maydan kúshleriniń sheksiz kishi joldı ótkende emes, al bóleksheniń shekli jolında islegen jumısın anıqlaw ushın bul shekli joldı sheksiz kishi ds jollarına bólip hám hár bir usınday sheksiz kishi elementar joldı ótkende islegen jumıstı esaplap, keyin sol jollardıń barlıǵın bir birine qosıp shıǵıw kerek. Bul qosındı barlıq jol boyınsha islegen jumıstı beredi.

Jumıstıń anıqlamasınan jolǵa perpendikulyar baǵıtta tásir etetuǵın kúshniń jumıs islemeytuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Mısalı, materiallıq noqat sheńber boyınsha teń ólshewli qozǵalǵanda kúshlerdiń jumısı nolge teń.

Turaqlı kúsh maydanı, yaǵnıy waqıtqa ǵárezsiz kúsh maydanı mınaday áhmiyetli qásiyetke iye: eger usınday maydanda materiallıq noqat tuyıq jol boyınsha qozǵalatuǵın bolsa, basqa sóz benen aytqanda noqat óziniń dáslepki iyelegen ornına qaytıp keletuǵın bolsa, maydan kúshleri tárepinen islegen jumıs nolge teń boladı.



7-сүрет

Bul qásiyetten basqa da áhmiyetli tastıyıqlaw kelip shıǵadı: maydan kúshleriniń bóleksheni bir awhaldan ekinshi awhalǵa kóshirgendegi jumısı usı kóshiriw ámelge asırılatuǵın joldıń túrine ǵárezli emes, al tek kóshiriwdiń dáslepki hám aqırǵı noqatlarınıń ornı menen anıqlanadı. Mısal keltireyik. 1 hám 2 noqatların qarayıq hám olardı eki iymeklik penen tutastırıyıq (7-súwret). Bólekshe 1 noqatınan 2 noqatına a iymekligi menen alıp klinedi, al keyin 2 noqatınan 1 noqatına b iymekligi menen kóshiriledi dep esaplayıq. Usınday jaǵdaydaǵı maydan kúshleri tárepinen ulıwma jumıs nolge teń. Jumıstı A háripi járdeminde belgilep bilayınsha jazamız:

$$A_{1a2} + A_{2b1} = 0.$$

Kóshiriwdiń baǵıtı ózgertilse jumıs sózsiz belgisin ózgertedi hám sonlıqtan jazılǵan ańlatpadan

$$A_{1a2} = -A_{2b1} = A_{1b2}$$

ekenligi kelip shıǵadı. YAǵnıy jumıstıń mánisi dáslepki 1 hám aqırǵı 2 noqatların tutastıratuǵın iymekliktiń túrine baylanıslı emes eken.

Maydan kúshleriniń jumısınıń kóshiriwdegi joldıń túrine baylanıslı emesligi. Al tek ǵana joldıń dáslepki hám aqırǵı noqatlarınń awhallarına ǵárezziligi jumıstıń tereń fizikalıq mániske iye ekenligin bildiredi. Onıń járdeminde kúsh maydanınıń áhmiyetli xarakteristikasını anıqlawǵa boladı. Usı maqsette keńisliktiń bazı bir noqatın alamız, onı O menen belgileymiz hám esaplawdıń bası retinde qabıl etemiz. Bunnan keyin bóleksheni usı noqattan qanday da bir iqtıyarlı R noqatına maydan kúshleri kóshirgendegi jumıstı esaplaymız. Bul jumıstı $-U$ arqalı belgileymiz. Bólekshe O noqatınan R noqatına kóshirilgende islegen jumıstıń keri belgisi menen alınǵan U shamasın bóleksheniń R noqatındaǵı *potencial energiyası* dep ataymız. Bul potencial energiya R noqatınıń koordinataları x, u, z lerdiń funkciyası bolıp tabıladı:

$$U = U(x, u, z).$$

Maydan kúshleriniń bólekshe qanday da bir iqtıyarlı 1 noqatınan iqtıyarlı 2 noqatına kóshkende islegen jumısı A_{12} mınaǵan teń:

$$A_{12} = U_1 - U_2.$$

Bul ańtalpadaǵı U_1 menen U_2 ler sol eki noqattaǵı potencial energiyalar. Jumıs joldıń dáslepki hám aqırǵı noqatlarındaǵı potencial energiyalardıń ayırmasına teń.

Bir birine sheksiz jaqın jaylasqan R hám R' noqatların alamız. Bóleksheni R noqatınan R' noqatına kóshirgende maydan kúshleriniń islegen jumısı $-dU$ ǵa teń. Ekinshi tárepten bul jumıs "ds ke teń (ds arqalı R noqatınan R' noqatına júrgizilgen vektor belgilengen). 2-paragrafta ds vektorınıń R' hám R noqatlarınıń dr radius-vektorlarınıń ayırmasına teń ekenligi kórsetilgen edi.

Solay etip biz

$$\vec{G}dr = -dU$$

teńligine kelemiz. Kúsh hám potencial energiyanı baylanıstıratuǵın bul ańlatpa mexanikanıń áhmiyetli ańlatpalarınń biri bolıp tabıladı.

$$\vec{G}dr = \vec{G}ds = \vec{G}_s ds$$

dep kóshirip jazıp joqarıdaǵı qatnastı bılayınsha jaza alamız:

$$\vec{G}_s = \frac{dU}{ds}.$$

Bunnan kúshtiń bazı bir baǵıtqa túsirilgen proekciyasınıń sheksiz kishi dU ózgerisin usı baǵıttaǵı sheksiz kishi ds shamasına bólgenge teń bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı. $\frac{dU}{ds}$ ańlatpasın U dan baǵıt s boyınsha alınǵan tuwındı dep ataymız.

Bul qatnaslardıń mánisin ayqınlastırıw ushın bir tekli turaqlı maydandaǵı potencial energiyanı anıqlaymız. Maydan kúshleri \vec{G} tiń baǵıtın z ke parallel dep qabıl etemiz. Onda $\vec{G}dr = \vec{G}dz$. Bul ańlatpanı potencial energiyanıń ózgerisi menen teńlestirip $-dU = \vec{G}dz$ ańlatpasın alamız hám bunnan

$$U = -\vec{G}z + \text{sonst}$$

ekenligi kelip shıǵadı.

Biz potencial energiyanıń iqtıyarlı turaqlıǵa shekemgi dállikte anıqlanatuǵınlıǵın kóremiz. Bul jaǵday ulıwmalıq xarakterge iye hám jumıs esepplanatuǵın maydandıń baslanǵısh noqatı O nıń iqtıyarlı túrde qabıl etilgenligine baylanıslı. Ádette U ushın jazılǵan ańlatpadaǵı bul turaqlını nolge teń bolatuǵın etip aladı. Bul jaǵday bólekshe basqa bólekshelerden sheksiz úlken aralıqlarǵa qashıqlasqanda potencial energiya nolge teń bolatuǵınlıǵına kelip shıǵadı.

Kúshtiń proekciyaların potencial energiya menen baylanıstıratuǵın formulalardan kúshtiń baǵıtı haqqında juwmaqlar shıǵarıw múmkin. Eger bazı bir baǵıtlarda potencial energiya ósetuǵın bolsa ($\frac{dU}{ds} > 0$), onda kúshtiń proekciyası bul baǵıtta teris mániske iye boladı, yaǵnıy kúsh potencial energiya kemeyetuǵın baǵıt penen baǵıtlas boladı. Kúsh barlıq waqıtta da potencial energiya kemeyetuǵın baǵıtqa qaray baǵıtlangan boladı.

Funkciya maksimum yamasa minimumǵa iye bolatuǵın noqtalarda tuwındı nolge teń bolǵanlıqtan kúsh te potencial energiya maksimumǵa yamasa minimumǵa jetetuǵın noqatlarda nolge teń boladı.

§ 11. Energiyanıń saqlanıw nızamı

Turaqlı maydan kúshleri tárepinen bóleksheni bir noqattan ekinshi noqatqa kóshirgende islengen jumıstıń joldıń túrine ǵárezsizligi oǵada áhmiyetli bolǵan nızamǵa (qatnasqa) – energiyanıń saqlanıw nızamına alıp keledi.

Bul qatnastı alıw ushın bólekshege tásir etetuǵın kúsh " tiń bılay jazılatuǵınlıǵın eske túsiremiz:

$$\vec{G} = m \frac{d\vec{v}}{dt}.$$

Tezleniwdiń qozǵalıw baǵıtındaǵı proekciyası $\frac{dv}{dt}$ ǵa teń bolǵanlıqtan kúshtiń usı baǵıttaǵı proekciyası

$$G_s = m \frac{dv}{dt}$$

ǵa teń boladı.

Endi usı kúshtiń sheksiz kishi $ds = v dt$ jolındaǵı jumısın anıqlaymız.

$$dA = G_s ds = mv dv$$

yamasa

$$dA = d\left(\frac{mv^2}{2}\right).$$

Solay etip kúsh tárepinen islengen jumıs $\frac{mv^2}{2}$ shamasınıń ósimine teń eken. Bul shama bóleksheniń *kinetikalıq energiyası* dep ataladı.

Ekinshi tárepten jumıs potencial energiyanıń kemeyiwiniń esabınan islenedi, yaǵnıy $dA = -dU$. Sonlıqtan biz mınaday teńlikti jaza alamız:

$$-dU = d\left(\frac{1}{2}mv^2\right),$$

yaǵnıy

$$d\left(U + \frac{1}{2}mv^2\right) = 0.$$

Bul qosındını E háripini menen belgilep tómendegige iye bolamız:

$$E = \frac{mv^2}{2} + U = \text{const.}$$

Solay etip tek tezlikke baylanıslı bolǵan kinetikalıq energiya menen tek koordinatalarǵa baylanıslı bolǵan potencial energiyanıń qosındısı bólekshe qozǵalǵanda ózgermeydi eken. Bul qosındı bóleksheniń *tolıq energiyası* yamasa tek *energiyası* dep ataladı. Al alınǵan qatnas *energiyanıń saqlanıw nızamı* dep ataladı.

Bólekshe qozǵalatuǵın kúsh maydanı qanday da bir basqa deneler tárepinen payda etiledi. Maydanniń turaqlı bolıwı ushın sol basqa denelerdiń qozǵalmay turıwı kerek.

Sonlıqtan biz energiyanıń saqlanıw nızamın júdá ápiwayı jaǵday ushın (tek bir bólekshe qozǵaladı, al sol bólekshe tásir etisetuǵın basqa deneler qozǵalmay turadı) aldıq. Biraq energiyanıń saqlanıw nızamın kóplegen qozǵalıwshı bóleksheler qatnasatuǵın ulıwmalıq jaǵday ushın da alıwǵa boladı. Eger bul bóleksheler tuyıq sistemanı payda etetuǵın bolsa da energiyanıń saqlanıw nızamı orınlanadı. Bul jaǵdayda da barlıq materiallıq noqatlardıń kinetikalıq energiýalarınń óz aldına qosındısı menen olardıń óz-ara tásir etisiwine sáykes keletuǵın potencial energiyanıń qosındısı waqıttıń ótiwi menen ózgermey qaladı, yaǵnıy

$$E = \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} + U(r_1 + r_2 + \dots)$$

(m_i arqalı i -bóleksheniń massası, v_i arqalı i -bóleksheniń tezligi belgilengen, U bolsa bólekshelerdiń radius-vektorları r_i den ǵárezli bolǵan potencial energiýası) turaqlı bolıp qaladı.

Sırtqı maydanda bir bólekshe jaylasqan jaǵdaydaǵıday U funkciyası hár bir bólekshege tásir etiwshı kúsh penen baylanısqan. Atap aytqanda i -bólekshege tásir etiwshı kúsh \vec{G}_i di esaplaǵanda basqa bólekshelerdiń barlıǵı da qozǵalmay qaladı dep esaplap usı bólekshe sheksiz kishi dr_i aralıǵına jılısqanındaǵı (awısqandaǵı) potencial energiya U dıń ózgerisin qarap shıǵıw kerek. Usınday awısıwdaǵı bólekshe ústinen islengen jumıs \vec{G}_i dr_i potencial energiyanıń sáykes kemeyiwine teń.

Energiyanıń saqlanıw nızamı qálegen tuyıq sistema ushın orınlanadı hám impulstıń saqlanıw nızamı menen bir qatarda mexanikanıń eń áhmiyetli nızamlarınıń biri bolıp tabıladı.

Kinetikalıq energiya barlıq waqıtta da oń mániske iye shama. Tásirlesiwdiń potencial energiýası oń mánisti de, teris mánisti de qabıl etiwı múmkin. Eger eki bóleksheniń potencial energiýası usı bóleksheler bir birinen sheksiz úlken aralıqlarǵa qashıqlasqanda nolge teń etip alınatuǵın bolsa, onda potencial energiyanıń belgisi usı bólekshelerdiń tásirlesiwiniń (tartısıw yamasa iyterisiw) xarakterine ǵárezli boladı. Bólekshege tásir etiwshı kúsh barlıq waqıtta potencial energiyanıń kemeyiw baǵıtına qaray baǵıtlanǵanlıqtan bılayınsha juwmaqlar shıǵaramız: bir birine tartılıwshı bólekshelerdiń bir birine jaqınlasıwı potencial energiyanıń kemeyiwine alıp keledi hám sonlıqtan ol shama teris belgige iye bolıp shıǵadı. Bir birinen iyteriletuǵın bólekshelerdiń potencial energiýası oń mániske iye boladı.

Energiya (jumıs ta) tómendegidey ólshemge iye boladı:

$$[E] = [m][v]^2 = \frac{g \cdot \text{sm}^2}{\text{sek}^2}.$$

Sonlıqtan SGS birlikler sistemasındaǵı energiyanıń ólshem birligi $1 \frac{g \cdot \text{sm}^2}{\text{sek}^2}$ boladı hám bul birlik *erg* dep ataladı. Erg degenimiz 1 din kúshtiń 1 sm aralıqtı ótkende islegen jumısı bolıp tabıladı.

SI birlikler sistemasında *djoule* (*dj*) dep atalatuǵın úlkenirek ólshem birligi qollanıladı. Djoul dep 1 n kúshtiń 1 m joldı ótkendegi jumısına aytamız:

$$1 \text{ dj} = 1 \text{ n} \cdot \text{m} = 10^7 \text{ erg}.$$

Eger kúshtiń birligi retinde kilogramm qollanılatuǵın bolsa energiyanıń sáykes birligi 1 kG kúshtiń 1 m joldaǵı islegen jumısı kilogrammetr (*kGm*) boladı. Djoul menen kilogrammetr bılay baylanısqan: $1 \text{ kGm} = 9.8 \text{ dj}$.

Energiya derekleri bir birlik waqıt ishinde islegen jumısı menen táriyiplenedi. Bul jumısı *quwatlılıq* dep ataydı. Quwatlılıqtıń birligi bolıp *vatt* (*vt*) xızmet etedi:

$$1 \text{ vt} = 1 \frac{dj}{\text{sek}}.$$

Quwatlılıǵı 1 vt qa teń energiya deregi tárepinen bir saat dawamında islengen jumıs $vatt \cdot saat$ ($vt \cdot saat$) dep ataladı.

$$1 \text{ vt} \cdot saat = 3.6910^3 \text{ dj}$$

ekenligine ańsat kóz jetkeriwge boladı.

§ 12. Ishki energiya

5-paragrafta quramalı sistemanıń qozǵalıǵı ushın onıń tutası menen alǵandaǵı tezligi túsiniǵiniń kirgiziletuǵınlıǵı túsindirilgen edi. Bunday jaǵdayda usınday tezlik ushın sistemanıń inerciya orayınıń tezligi alınadı. Bul sistemanıń qozǵalıǵınıń eki túrli qozǵalıstan turatuǵınlıǵın bildiredi: sistemanıń tutası menen alǵandaǵı qozǵalıǵı hám sistemanıń inerciya orayına salıstırǵandaǵı sistemanı qurawshı bólekshelerdiń "ishki" qozǵalıǵı. Usıǵan sáykes sistemanıń energiyası E tutası menen alınǵan sistema ushın kinetikalıq energiya $MV^2/2$ (M sistemanıń massası, V onıń inerciya orayınıń tezligi) menen sistemanıń ishki energiyası E_{ishki} nıń qosındısınan turadı. Ishki energiya óz ishine bólekshelerdiń ishki qozǵalıǵına sáykes keliwshi kinetikalıq energiyanı hám olardıń tásirlesiwine sáykes keliwshi potencial energiyanı aladı.

$$E = \frac{MV^2}{2} + E_{ishki}.$$

Bul formulanıń kelip shıǵıwı óz-ózinen túsiniikli, biraq bir usı formulanı tuwrıdan tuwrı keltirip shıǵarıwda da kórsetemiz.

Qozǵalmaytuǵın esaplaw sistemadaǵı qanday da bir bóleksheniń tezligin (i-bóleksheniń tezligin) v_i+V dep jaza alamız (V sistemanıń inerciya orayınıń qozǵalıǵı tezligi, v_i bóleksheniń inerciya orayına salıstırǵandaǵı tezligi). Bóleksheniń kinetikalıq energiyası mınaǵan teń:

$$\frac{m_i}{2} (v_i+V)^2 = \frac{m_i V^2}{2} + \frac{m_i v_i^2}{2} + m_i (\mathbf{V} \mathbf{v}_i).$$

Barlıq bóleksheler boyınsha qosındı alǵanda bul ańlatpanıń birinshi aǵzaları $MV^2/2$ ni beredi (bul jerde $M = m_1+m_2+ \dots$). Ekinshi aǵzalırdıń qosındısı sistemadaǵı ishki qozǵalıslardıń tolıq kinetikalıq energiyasına sáykes keledi. Al úshinshi aǵzalırdıń qosındısı nolge teń boladı. Haqıyqatında da

$$m_1(\mathbf{V} \mathbf{v}_1) + m_2(\mathbf{V} \mathbf{v}_2) + \dots = V(m_1 \mathbf{v}_1 + m_2 \mathbf{v}_2 + \dots).$$

Keyingi qawsırma ishindegi qosındı bólekshelerdiń sistemanıń inerciya orayına salıstırǵanlaǵı anıqlama boyınsha nolge teń tolıq impulsı bolıp tabıladı. Eń aqırında kinetikalıq energiyanı bólekshelerdiń tásirlesiwiniń potencial energiyası menen qosıp izlep atırǵan formulamızdı alamız.

Energiyanıń saqlanıw nızamın qollanıp quramalı deneniń stabilligin (turaqlılıǵın) qarap shıǵa alamız. Bul másele quramalı deneniń ózinen ózi quramlıq bólimlerge ajıralıp ketiwiniń shártlerin anıqlawdan ibarat. Mısal retinde quramalı deneniń eki bólekke ıdırawın kóreyik. Bul bóleklerdiń massaların m_1 hám m_2 arqalı belgileyik. Jáne dáslepki quramalı deneniń inerciya orayı sistemasındaǵı sol bóleklerdiń tezlikleri \mathbf{v}_1 hám \mathbf{v}_2 bolsın. Bunday jaǵdayda usı esaplaw sistemasındaǵı energiyanıń saqlanıw nızamı mına túrge iye boladı:

$$E_{\text{ishki}} = \frac{m_1 v_1^2}{2} + E_{1\text{ishki}} + \frac{m_2 v_2^2}{2} + E_{2\text{ishki}}.$$

Bul jerde E_{ishki} dáslepki deneniń ishki energiyası, al $E_{1\text{ishki}}$ hám $E_{2\text{ishki}}$ deneniń eki bóleginiń ishki energiyaları. Kinetikalıq energiya barqulla oń mániske iye, sonlıqtan jazılğan ańlatpadan

$$E_{\text{ishki}} > E_{1\text{ishki}} + E_{2\text{ishki}}$$

ekenligi kelip shıǵadı. Bir deneniń eki denegge ıdırawınıń shárti usınnan ibarat. Eger dáslepki deneniń ishki energiyası onıń quramlıq bólimleriniń ishki energiyalarınıń qosındısınan kishi bolsa dene ıdıramaydı.

§ 13. Qozǵalısh shegaraları

Eger materiallıq bólekshe tek ǵana bir anıq iymeklik boyınsha qozǵalatuǵın bolsa, onda *bir ólshemli yamasa bir erkinlik dárejesine* iye qozǵalısh haqqında gáp etiledi. Bul jaǵdayda bóleksheniń awhalın (qay orında turǵanlıǵın) beriw ushın tek bir koordinata jetkilikli. Usınday koordinata sıpatında iymeklik boylap esaplaw bası retinde qabıl etilgen noqatqa shekemgi qashıqlıqtı paydalanıwǵa boladı. Bul koordinatanı x arqalı belgileymiz. Bir ólshemli qozǵalatuǵın bóleksheniń potencial energiyası bir koordinatanıń funkciyası boladı: $U=U(x)$.

Energiyanıń saqlanıw nızamı boyınsha mınaǵan iye bolamız:

$$E = \frac{mv^2}{2} + U(x) = \text{const.}$$

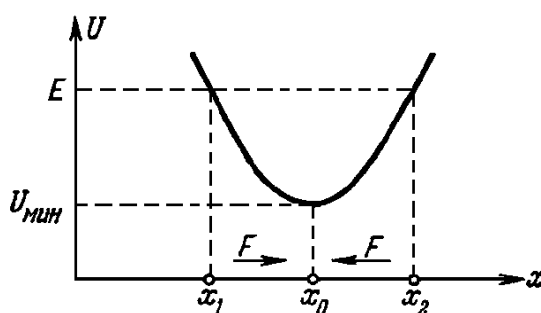
Kinetikalıq energiya teris mániske iye bola almaǵanlıqtan tómendegidey shárttiń orınlanıwı kerek:

$$U \leq E.$$

Bul teńsizlik bóleksheniń qozǵalıshınıń barısında tek potencial energiyası tolıq energiyadan úlken bolmaytuǵın noqatlarda ǵana jaylasa alatuǵınlıǵın kórsetedi. Eger biz usı energiyanı teńlestirsek materiallıq noqattıń shegaralıq awhalların anıqlaytuǵın

$$U(x) = E$$

teńlemesin alamız.



8-сүһре

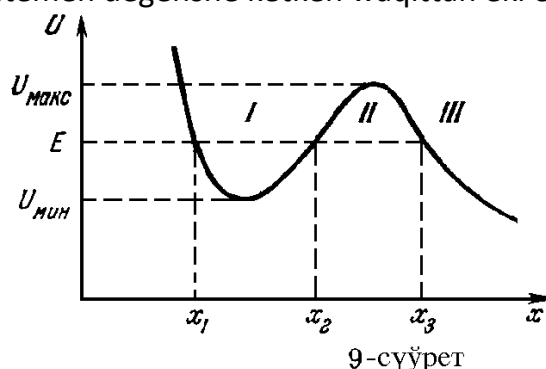
Bir neshe xarakterli misallar keltiremiz. 8-súwrette keltirilgen x tın ǵárezli bolǵan funkciyanıń túrindey túrge iye bolatuǵın potencial energiyadan baslaymız. Bunday kúsh maydanındaǵı qozǵalıstıń shegaraların tabıwımız ushın x kósherine parallel etip $U = E$ tuwrısın júrgizemiz. Bul tuwrı potencial energiyanıń iymekligi bolǵan $U=U(x)$ tı eki noqatta kesip ótedi. Usı noqatlardıń abscissaları x_1 hám x_2 arqalı belgilengen. Qozǵalıstıń múmkin bolıwı ushın potencial energiyanıń shaması tolıq energiyanıń shamasınan úlken bolmawı kerek. Bul energiyası E bolǵan bóleksheniń qozǵalıshınıń tek ǵana x_1 hám x_2 noqatları

arasında bolatugınlığı ańlatadı. Al x_1 noqatınan shep tárepke hám x_2 noqatınan oń tárepke bólekshe óte almaydı.

Keńisliktiń shekli oblastında qalatuǵın qozǵalı *finitlik* qozǵalı dep ataladı. Eger bólekshe sheksiz úlken aralıqlarǵa qashıqlasa alatuǵın bolsa bunday bóleksheniń qozǵalı *infinitlik* dep ataydı.

Demek finitlik oblastınıń energiyadan ǵárezli ekenligi óz-ózinen kórinip tur. Biz qarap ótken misalda bul oblast energiyanıń kemeyiwı menen kishireyedi hám $E=U_{\min}$ da bir noqatqa jaynaladı.

x_1 hám x_2 noqatlarında potencial energiya tolıq energiyaǵa teń hám sonlıqtan bul noqatlarda kinetikalıq energiya hám oǵan sáykes bóleksheniń tezligi nolge teń. x_0 noqatında potencial energiya minimal mánisine iye, al kinetikalıq energiya menen bóleksheniń tezligi bolsa maksimumlıq mánisine teń. Kúsh potencial energiya menen $G = -\frac{dU}{dx}$ arqalı baylanısqan bolǵanlıqtan x_0 hám x_1 noqatları arasında kúsh teris, al x_0 hám x_2 noqatları arasında oń mániske iye boladı. Bul óz gezeginde kúshitiń x_0 hám x_2 noqatları arasında x tır kishireyiw baǵıtında baǵıtlanǵanlıǵın, yaǵnıy shep, al x_0 hám x_1 noqatları arasında oń tárepke qaray baǵıtlanǵanlıǵın kórsetedi. Sonlıqtan, eger bólekshe ońǵa qaray baǵıtlanǵan kúshitiń tásirinde x_1 noqatınan qozǵala baslasa (bul noqatta tezliktiń nolge teń ekenligin eske túsiremez) onıń kem-kemnen tezligi artadı hám x_0 noqatında tezlik maksimumlıq mánisine jetedi. Endi shep tárepke qaray baǵıtlanǵan kúshitiń tásirinde x_0 noqatınan x_2 noqatına shekem qozǵalıw barısında bóleksheniń tezligi kemeyedi hám x_2 noqatında nolge teń boladı. Bunnan keyin x_2 noqatınan x_0 noqatın qaray kerı qozǵalıw baslanadı. Usınday qozǵalıslar waqıttır ótiwi menen qaytalanadı. Basqa sóz benen aytqanda bóleksheniń qozǵalıwı dáwirli qozǵalıw boladı, al qozǵalıw dáwiri bóleksheniń x_1 noqatınan x_2 noqatına jetemen degenshe ketken waqıttan eki ese úlken boladı.

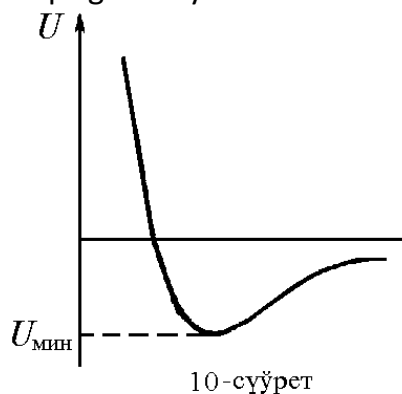


x_0 noqatında potencial energiya minimumǵa jetedi hám U dan x boyınsha alınǵan tuwındı nolge aylanadı. Sonlıqtan bul noqatta kúsh nolge teń hám usıǵan baylanıslı x_0 noqatı bóleksheniń *teń salmaqlıq* noqatı bolıp tabıladı. Sonıń menen birge bul noqat bóleksheniń *ornıqlı teń salmaqlıq* awhalı bolıp tabıladı. Sebebi bul awhaldan shıǵarılsa bóleksheni sol teń salmaqlıq halına qaytarıwǵa baǵıtlanǵan kúsh payda boladı. Bunday qásiyetke potencial energiyanıń tek ǵana minimum noqatları iye boladı. Potencial energiya maksimumǵa teń noqatlarda da kúsh nolge teń. Biraq usınday noqattan bóleksheni anaw yamasa mınaw baǵıtta qozǵaltıp jiberilgende payda bolǵan kúshler eki jaǵdayda da usı noqatlardan qashıqlasıw baǵıtında tásir etedi. Sonlıqtan potencial energiya maksimumǵa iye bolatuǵın orınlar *ornıqsız teń salmaqlıq* awhalları bolıp tabıladı.

Endi iymekligi 9-súwrette kórsetilgende quramalı maydandaǵı bóleksheniń qozǵalıwın qaraymız. Bul iymeklik minimumǵa da, maksimumǵa da iye. Eger bólekshe E

energiyasına iye bolatuǵın bolsa ol eki oblastta qozǵala aladı: x_1 hám x_2 noqatları arasındaqı I oblastı hám x_3 noqatınan ońda jaylasqan III oblastı (bul oblastlarda potencial energiya tolıq energiyaga teń boladı). Birinshi oblasttaǵı qozǵalı biz joqarıda qaraǵan mısaldadıay terbelis xarakterine iye boladı. III oblasttaǵı qozǵalı infinitlik bolıp bólekshe x_3 noqatınan oń tárepke qaray sheksiz aralıqlarǵa qashıqlasa aladı. Eger bólekshe x_3 noqatınan baslap qozǵala baslasa (bul noqatta bóleksheniń tezligi nolge teń), onda bul orındaǵı ońǵa qaray baǵıtlanǵan kúshniń tásirinde barlıq waqıtta da tezleniw aladı~ sheksiz úlken qashıqlıqta potencial energiya nolge aylanadı, al tezligi $v_\infty = \sqrt{2mE}$ ge teń boladı. Kerisinshe, eger bólekshe sheksiz qashıqlasqan orınnan x_3 noqatına qaray qozǵala baslasa, onıń tezligi x_3 noqatında nolge aylanatuǵınday bolıp kem-kemnen kemeyedi. Bul noqatta bólekshe qozǵalı baǵıtın ózgartip qaytadan sheksizlikke ketiwi kerek. Bólekshe I oblastqa óte almaydı, sebebi x_2 hám x_3 noqatları arasında jaylasqan II qadaǵan etilgen zonası bóleksheni ótkermeydi. Usınıń menen birge usı II oblast x_1 hám x_2 noqatları arasında jaylasqan terbeliwshi bóleksheni E energiyası menen qozǵalı múmkin bolǵan III oblastqa da ótkermeydi. Bul qadaǵan etilgen oblasttı *potencial tosǵınlıq (barer)*, al I oblasttı *potencial shuǵır* dep ataymız. Biz qarap atırǵan jaǵdayda bóleksheniń energiyasınıń ósiwi menen tosınlıqtıń kerligi kemeyedi hám $E = U_{\text{maks}}$ bolǵanda tolıǵı menen joǵaladı. Usınıń menen birge bóleksheniń terbelmeli qozǵalı da joǵaladı hám qozǵalı infinitlik qozǵalısqa aylanadı.

Biz energiyasına baylanıslı bóleksheniń birdey kúsh maydanındaǵı qozǵalısnıń finitlik bolıwınıń da, infinitlik bolıwınıń da múmkin ekenligin kórdik. Bul jaǵdaydı potencial energiyasınıń iymekligi 10-súwrette kórsetilgen maydandaǵı qozǵalı mısasında da anıq kórsetiw múmkin. Bul jaǵdaydaǵı oń mániske energiyaga infinitlik qozǵalı, al teris mánisli energiyalarǵa ($U_{\text{min}} < E < 0$) finitlik qozǵalı sáykes keledi.



Ulıwma alǵanda sheksizlikte potencial energiya nolge aylanatuǵın bolsa teris mánisli energiya menen qozǵalı sózsiz finitlik qozǵalı boladı. Sebebi sheksizlikte nollik potencial energiya tolıq energiyadan úlken boladı hám sonlıqtan bólekshe sheksizlikke shekem qashıqlasa almaydı.

§ 14. Serpimli soqlıǵısıwlar

Energiya menen impulstıń saqlanıw nızamların deneler soqlıǵısqandaǵı hár qıylı shamalar arasındaqı baylanıslardı anıqlaw ushın qollanıw múmkin.

Fizikada soqlıǵısıw dep aytqanda tek denelerdiń bir biriwine tiyisiwin emes, al deneler arasındaqı óz-ara tásir etisiw keń mániste túsiniledi. Soqlıǵısatuǵın deneler bir birinen sheksiz úlken qashıqlıqlarda turǵanda erkin deneler bolıp tabıladı. Bir biriniń tusınan ótip

baratırǵanda deneler bir biri menen tásirlesedi hám pútkilley hár qıylı processlerdiń baqlanıwı múmkin: denelerdiń birigiwi múmkin, jańa denelerdiń payda bolıwı da múmkin, sonıń menen birge *serpimli soqlıǵısıwdıń* da orın alıwı múmkin. Serpimli soqlıǵısıwda deneler bazı bir jaqınlasqannan keyin ózleriniń ishki halların ózertpey ajırasıp ketedi. Denelerdiń ishki hallarınıń ózgeriwi menen ótetuǵın soqlıǵısıwlar *serpimli emes soqlıǵısıwlar* dep ataydı.

!dettegi jaǵdaylardaǵı soqlıǵısıwlar derlik barlıq waqıtta da serpimli emes soqlıǵısıwlar bolıp tabıladı (eń keminde soqlıǵısıwdıń nátiyjesinde dene qızadı, yaǵnıy kinetikalıq energıyanıń bir bólegi jıllılıqqa aylanadı). Usıǵan qaramastan fizikada serpimli soqlıǵısıwlar haqqındaǵı túsinikler ayrıqsha áhmiyetke iye. Sebebi usınday soqlıǵısıwlar atomlıq qubılıslar boyınsha islengen eksperimentlerde kóplep kóriwge boladı. Biraq usıǵan qaramastan ádettegidey soqlıǵısıwlar *da* jetkilikli dállikte serpimli dep qarawǵa boladı.

Massaları m_1 hám m_2 bolǵan eki bóleksheniń serpimli soqlıǵısıwın qaraymız. Bólekshelerdiń soqlıǵısıwǵa shekemgi hám soqlıǵısıwdan keyingi tezliklerin sáykes v_1 , v_2 hám v_1' , v_2' arqalı belgileyemiz. Bólekshelerdi biri (meyli ol massası m_2 bolǵan bólekshe bolsın) soqlıǵısıwǵa shekem tınıshlıqta turdı dep esaplınsın (yaǵnıy $v_2=0$ bolsın).

Serpimli soqlıǵısıwda bólekshelerdiń ishki energiyaları ózgermeytuǵın bolǵanlıqtan energıyanıń saqlanıw nızamın qollanǵanda buni esapqa almawǵa boladı (ishki energiyalardıń ózgerisin nolge teń dep esaplaymız). Soqlıǵısıwǵa shekem hám soqlıǵısıwdan keyin bólekshelerdi tásir etispeydi dep esaplaǵanlıqtan energıyanıń saqlanıw nızamı kinetikalıq energıyanıń saqlanıw nızamına alıp kelinedi ($1/2$ ge teń ulıwmalıq kóbeytkishti jazbaymız):

$$m_1 v_1^2 = m_1 v_1'^2 + m_2 v_2'^2.$$

Impulstıń saqlanıw nızamı mınaday vektorlıq teńliktiń járdeminde beriledi:

$$m_1 \mathbf{v}_1 = m_1 \mathbf{v}_1' + m_2 \mathbf{v}_2'.$$

Dáslep tınısh turǵan bóleksheniń massası úlken, al ushın keliwshi bóleksheniń massası kishi bolǵan jaǵday (yaǵnıy $m_2 \gg m_1$) júdá ápiwayı.

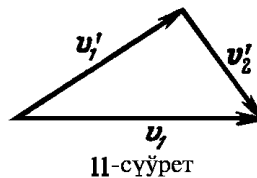
$$\mathbf{v}_2' = \frac{m_1}{m_2} (\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_1')$$

formulasınan $m_2 \gg m_1$ bolǵanda \mathbf{v}_2' tıń júdá kishi bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı. $m_2 v_2'^2$ kóbeymesiniń m_2 massasına keri proporcional bolǵanlıǵınan usınday juwmaqtı dáslep tınıshlıqta turǵan bóleksheniń energıyası haqqında da aytıwǵa boladı. Bunnan bılayınsha juwmaq shıǵaramız: ushıp keliwshi bóleksheniń energıyası soqlıǵısıwdıń saldarınan ózgermeydi, yaǵnıy usı bóleksheniń tezliginiń absolyut mánisi ózgerissiz qaladı. Solay etip jeńil bólekshe awır bólekshe menen soqlıǵısqanda jeńil bóleksheniń tezliginiń tek baǵıtı ózgeredi, al shaması ózgerissiz qaladı.

Eger bólekshelerdiń massaları óz-ara teń bolsa saqlanıw nızamları mınaday túrlerge iye boladı:

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_1 &= \mathbf{v}_1' + \mathbf{v}_2', \\ v_1^2 &= v_1'^2 + v_2'^2. \end{aligned}$$

Birinshi jazılǵan ańlatpadan \mathbf{v}_1 , \mathbf{v}_1' hám \mathbf{v}_2' vektorlarınıń úsh múyeshlikti payda etetuǵınlıǵı, al ekinshi ańlatpadan sol úsh múyeshliktiń gipetenezası v_1 bolǵan tuwrı múyeshli úsh múyeshlik ekenligi kelip shıǵadı. Solay etip massaları birdey bolǵan bóleksheler soqlıǵısqanda olar tuwrı múyesh boyınsha hár tárepke qaray ushıp ketetuǵınlıǵı kelip shıǵadı (11-súwret).



Eki bóleksheniń "mańlaydan" soqlıǵısıwın kóremiz. Usınday soqlıǵısıwdıń nátiyjesinde eki bólekshe de ushıp keliwshi bóleksheniń tezligi baǵıtına sáykes keliwshi tuwrınıń baǵıtında qozǵaladı. Bunday jaǵdayda biz impulstıń saqlanıw nızamındaǵı tezlikler vektorların olardıń san shamaları menen almastıra alamız, yaǵnıy mınalardı jazamız:

$$m_2 v_2' = m_1 (v_1 - v_1').$$

Bul ańlatpaǵa

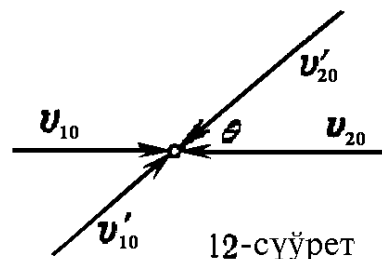
$$m_2 v_2'^2 = m_1 (v_1^2 - v_1'^2)$$

ekenliginen derek beriwshi energiyanıń saqlanıw nızamın qossaq v_1' penen v_2' lardı v_1 arqalı ańlatıw múmkinshiligine iye bolamız. Ekinshi teńlemeneni birinshi teńlemege bólip $v_2' = v_1 + v_1'$ ekenligi alamız hám soǵan sáykes

$$v_1' = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_1, \quad v_2' = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_1.$$

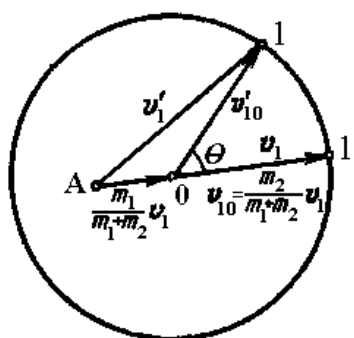
Ushıp keliwshi bólekshe (birinshi bólekshe) m_1 dıń tınısh turǵan bóleksheniń massası m_2 den úlken yamasa kishiligine baylanıslı ushıp kelgen baǵıtta qozǵalıwın dawam etedi yamasa keyin qaray qaytadı. Eger m_1 hám m_2 massaları óz-ara teń bolsa, onda $v_1' = 0$, $v_2' = v_1$, yaǵnıy eki bólekshe tezlikleri menen almasadı. Eger $m_2 \gg m_1$ bolsa, onda $v_1' = -v_1$ hám $v_2' = 0$.

Ulıwma jaǵdayda soqlıǵısıwdı soqlıǵısıwshi bólekshelerdiń inerciya orayı sistemasında qaraǵan qolaylı. Bunday sistemada bólekshelerdiń imppulslarınıń qosındısı soqlıǵısıwdan burın da, soqlıǵısıwdan keyin de nolge teń boladı. Sonlıqtan eger birinshi bóleksheniń soqlıǵısqanǵa shekemgi hám soqlıǵısqannan keyingi impulsların r hám r' arqalı belgilesek, ekinshi bóleksheniń soqlıǵısqanǵa shekemgi hám onnan keyingi impulsları $-r$ menen $-r'$ qa teń.



Bunnan keyin bólekshelerdiń soqlıǵısqanǵa shekemgi hám soqlıǵısqannan keyingi kinetikalıq energiyların teńlestiriw arqalı $r^2 = r'^2$ ekenligine iye bolamız, yaǵnıy bólekshelerdiń impulslarınıń shamalarınıń ózgeriske ushıramaytuǵınlıǵın kóremiz. Demek biz qarap atırǵan jaǵdayda bóleksheler soqlıǵısqanda tek ǵana bólekshelerdiń impulslarınıń baǵıtları ǵana ózgeredi eken. Impulslar menen birge bólekshelerdiń tezlikleri de ózgeredi: tezlikler shaması boyınsha turaqlı qalıp, tek ǵana baǵıtların ózgertedi (bul jaǵday 12-súwrette keltirilgen, bul súwrettegi 0 indeksleri inerciya orayı sistemasına tiyisli ekenligin kórsetedi).

Tezliklerdiń baǵıtlarınıń ózgeriw múyeshlerine kelsek, bul múyeshlerdiń shamaları tek ǵana energiya menen impulstıń saqlanıw nızamları boyınsha anıqlanbaydı, al bólekshelerdiń bir biri menen tásirlesiwiniń ayqın xarakteri jáne soqlıǵısıw momentindegi olardıń bir birine salıstırǵandaǵı iyelegen orınlarına baylanıslı.



13-сүрөт

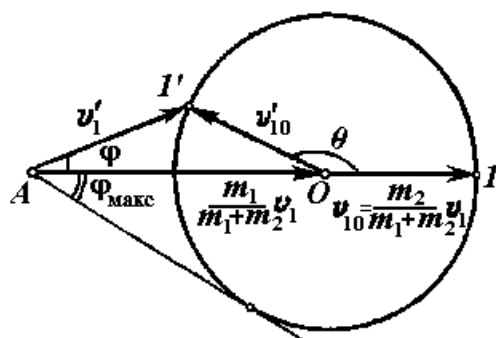
Dáslepki (yamasa *laboratoriyalıq*) esaplaw sistemasındaǵı tezliklerdiń ózgeriwiniń xarakterin anıqlaw ushın (bunday sistemada soqlıǵısqanǵa shekem bólekshelerdiń biri tınıshlıqta turdı) tómendegidey grafikalıq usıldı qollanamız: 13-súwrette kórsetilgendeı taqlette inerciya orayı sistemasında birinshi bóleksheniń tezligi v_{10} ge teń etip O1 vektorın júrgizemiz. Bul tezlik sol bóleksheniń esaplawdıń laboratoriyalıq sistemasındaǵı (bul sistemanıń tezligi eki bóleksheniń tezlikleriniń de salıstırmalı tezligi bolıp tabıladı) v_1 tezligi menen $v_{10} = v_1 - V$ arqalı baylanısqa. Bul jerde

$$V = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2} = \frac{m_1}{m_1 + m_2} v_1$$

inerciya orayınıń tezligi bolıp tabıladı. Alıw ámelin orınlaw arqalı mınaday formula alamız

$$v_{10} = \frac{m_2}{m_1 + m_2} v_1.$$

Birinshi bóleksheniń soqlıǵısqannan keyingi tezligi v_{10}' v_{10} tezligin bazı bir θ múyeshine burıw jolı menen alıadı (yaǵnıy 13-súwrette keltirilgen sheńberdiń qálegen O1' radiusı menen beriliwi múmkin). Laboratoriyalıq esaplaw sistemasına ótiw ushın barlıq tezliklerge inerciya orayı tezligi V nı qosıw kerek. 13-súwrette ol A0 vektorı járdeminde kórsetilgen. Bunday jaǵdayda A1 vektorı soqlıǵısqanǵa shekemgi ushıp keliwshi bóleksheniń tezligi v_1 menen sáykes keledi, al A1' vektorı sol bóleksheniń soqlıǵısqannan keyingi izlenip atırılǵan tezligin beredi. Tap usınday súwretlerdi ekinshi bóleksheniń tezligi ushın da salıw múmkin.



14-сүрөт

13-súwrette $m_1 < m_2$ dep bolǵanǵan hám sonlıqtan A noqatı sheńberdiń ishinde jaylasadı. Usınıń menen birge A1' vektorı (yaǵnıy v_1' tezligi) qálegen baǵıtqa iye bolıwı múmkin.

Eger $m_1 > m_2$ bolǵanda A noqatı sheńberdiń sırtında jaylasadı (14-súwret). Bunday jaǵdayda soqlıǵısqanǵa shekemgi hám onnan keyingi laboratoriyalıq sistemasındaǵı tezlikler arasındaǵı múyesh - bazı bir maksimallıq mánisten úlken bola almaydı (bul mánis A1'

tuwrısınıń sheńberge urınıwına sáykes keledi). Bunday jaǵdayda $A1'O$ úsh múyeshliginiń $A1'$ tárepi $O1'$ tárepine perpendikulyar boladı. Sonlıqtan

$$\sin \phi_{\text{maks}} = O1'/AO = m_2/m_1.$$

Usılar menen birge soqlıǵısqannan keyin bóleksheniń tázliginiń 13-swrettegi (yamasa 14-súwrettegi) 1 noqatında diametrlik qarama-qarsı bolǵan $1'$ noqatta orın alatuǵın bazı bir minimallıq shamadan kishi bolmaytǵınlıǵın da ańǵarıwımız kerek. Bul mańlaylıq soqlıǵısıwǵa sáykes keledi hám tezliktiń minimallıq mánisi

$$v'_{1\text{min}} = \frac{|m_1 - m_2|}{m_1 + m_2} v_1$$

shamasına teń boladı.

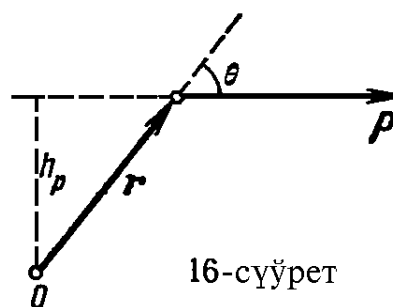
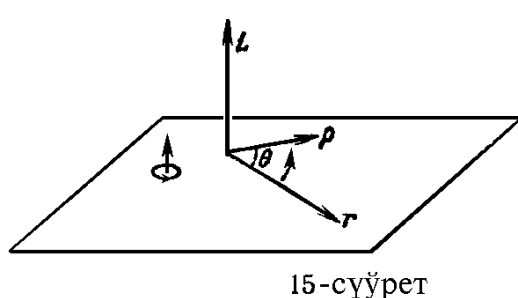
§ 15. Impuls momenti

Qálegen tuyıq sistemada energiya menen impulsten basqa *impuls momenti* yamasa tek *moment* dep atalatuǵın vektorlıq shama da saqlanadı. Bul shama ayırım materiallıq noqatlardıń momentleriniń qosındısınan turadı hám tómendegidey jollar menen anıqlanadı:

Meyli materiallıq noqat r impulsine iye bolsın hám onıń keńisliktegi awhalı bazı bir esaplaw bası bolǵan O noqatınan baslap túsirilgen r radius-vektorınıń járdeminde anıqlansın. Bunday jaǵdayda bul materiallıq noqattıń momenti L shaması boyınsha

$$L = rr \sin \theta$$

ǵa teń, baǵıtı r hám r vektorları jatqan tegislikke perpendikulyar vektor sıpatında anıqlanadı (θ arqalı r hám r vektorları arasındaǵı múyesh belgilengen). Bul shárt L diń baǵıtın anıqlamaydı, sebebi "joqarı" yamasa "tómenge" qaray baǵıtlanǵan baǵıtlar anıq emes bolıp qaladı. Bul baǵıttı anıqlawdıń mınaday qádesi qabıl etilgen: r den r ǵa qaray buralatuǵın vintti kóz aldımızǵa keltireyik, sonda vinttiń ilgerilew baǵıtı L diń baǵıtına sáykes keledi (15-súwret).



L shamasın basqa da kórgizbelirek usıl menen sáwlelendiriw múmkin: $r \sin \theta$ kóbeymesiniń O noqatınan bóleksheniń impulsı baǵıtına túsirilgen h_r perpendikulyarı ekenligine ańsat kóz jetkeriwge boladı. Kóp jaǵdaylarda bul aralıqtı O noqatına salıstırǵandaǵı impulstıń *iyini* dep ataladı. Bóleksheniń momenti iyinniń impulstıń shamasına kóbeymesine teń:

$$L = rh_r.$$

L vektorınıń joqarıda keltirilgen anıqlaması vektorlıq algebradaǵı *vektorlıq kóbeyme* túsiniǵi menen sáykes keledi: joqarıda keltirilgendey anıqlama boyınsha dúzilgen r hám r vektorlarınıń kóbeymesi bolǵan L vektorın r hám r vektorlarınıń vektorlıq kóbeymesi dep atap tómendegidey etip jazadı:

$$\mathbf{L} = [\mathbf{r}\mathbf{r}].$$

$\mathbf{r} = m\mathbf{v}$ bolǵanlıqtan

$$\mathbf{L} = m[\mathbf{r}\mathbf{v}].$$

Bul formulaniń járdeminde ayırım bóleksheniń momenti anıqlanadı. Bóleksheler sistemasiniń momenti dep ayırım bólekshelerdiń momentleriniń qosındısınan tutatuǵın

$$\mathbf{L} = [\mathbf{r}_1\mathbf{r}_1] + [\mathbf{r}_2\mathbf{r}_2] +$$

qosındısına aytamız. Qálegen tuyıq sistema ushın usınday qosındı waqıt boyınsha turaqlı bolıp qaladı. *Momenttiń saqlınaw nızamınıń* mánisi usınnan ibarat.

Momentti anıqlaǵanda ıqtıyarlı túrde saylap alınǵan baslanǵısh noqat 0 nıń bar ekenligine itibar beremiz. Usı 0 noqattan baslap bóleksheniń radius-vektori alınatuǵın edi. \mathbf{L} vektorınıń shaması da, baǵıtı da usı noqattıń saylap alınıwına baylanıslı bolsa da, bunday anıqsızlıqtıń momenttiń saqlanıw nızamı ushın áhmiyetke iye emes ekenligin ańsat kóriwge boladı. Haqıyqatında da, eger biz 0 noqatın bazı bir \mathbf{a} shamasına (shaması boyınsha da, baǵıtı boyınsha da) jılistırıp qoysaq, usı shamaǵa bólekshelerdiń barlıq radius vektorları ózgeredi hám sonlıqtan momentke

$$[\mathbf{a}\mathbf{r}_1] + [\mathbf{a}\mathbf{r}_2] + \dots = [\mathbf{a}(\mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2 + \dots)] = [\mathbf{a}\mathbf{R}]$$

shaması qosıladı. Bul jerde \mathbf{R} arqalı sistemanıń tolıq impulsı belgilengen. Biraq tuyıq sistema ushın \mathbf{R} turaqlı shama. Solay etip biz koordinata basın saylap alıwdıń ózgerisiniń tuyıq sistemanıń tolıq momentiniń ózgeriwine alıp kelmeytuǵınlıǵın kóremiz.

!dette bóleksheler sistemasiniń momentin anıqlaǵanda esaplaw bası retinde sistemanıń inerciya orayın alıw qabıl etilgen. Tap usınday saylap alıwdı biz bunnan keyin názerde tutamız.

Bóleksheniń impuls momentinen waqıt boyınsha alınǵan tuwındını anıqlaymız Kóbeymeni differenciallaw qádesinen mınanı alamız:

$$\frac{d\mathbf{L}}{dt} = \frac{d}{dt} [\mathbf{r}\mathbf{r}] = \left[\frac{d\mathbf{r}}{dt} \mathbf{r} \right] + \left[\mathbf{r} \frac{d\mathbf{p}}{dt} \right]$$

$\frac{d\mathbf{r}}{dt}$ bóleksheniń tezligi \mathbf{v} bolıp tabıladı, al $\mathbf{r} = m\mathbf{v}$. Olay bolsa birinshi aǵza $m[\mathbf{v}\mathbf{v}]$ ǵa teń (sebebi vektordıń ózine vektorlıq kóbeymesi nolge teń). Tuvındınıń ekinshi aǵzası bolǵan $\frac{d\mathbf{p}}{dt}$ da biz kúsh \mathbf{F} ti kóremiz. Solay etip

$$\frac{d\mathbf{L}}{dt} = [\mathbf{r}\mathbf{F}].$$

$[\mathbf{r}\mathbf{F}]$ vektorlıq kóbeymesin berilgen 0 noqatına salıstırǵandaǵı *kúsh momenti* dep ataymız. Onı \mathbf{K} háripi menen belgileymiz:

$$\mathbf{K} = [\mathbf{r}\mathbf{F}].$$

Joqarıda impuls momenti haqqında aytqanıımızday bul jaǵdayda da mınaǵan kewil bólemiz: kúsh momentiniń shaması kúsh \mathbf{F} tiń "iyinge" kóbeymesine teń (0 noqatınan kúштиń baǵıtına túsirilgen perpendikulyardıń uzınlıǵı):

$$K = \mathbf{r}h_{\mathbf{F}}.$$

Solay etip materiallıq noqattıń impuls momentiniń ózgeriw tezligi usı bólekshege tásir etetuǵın kúштиń momentine teń eken:

$$\frac{d\mathbf{L}}{dt} = \mathbf{K}.$$

Tuyıq sistemanıń impulsiniń tolıq momenti saqlanadı, bul sistemaǵa kiriwshi bólekshelerdiń momentleriniń qosındısınan waqıt boyınsha alınǵan tuwındınıń nolge teń bolatuǵınlıǵın kórsetedi:

$$\frac{d}{dt}(L_1 + L_2 + \dots) = \frac{dL_1}{dt} + \frac{dL_2}{dt} + \dots = 0.$$

Bunnan

$$K_1 + K_2 + \dots = 0$$

ekenligi kelip shıǵadı.

Biz bul jerde tuyıq sistemadaǵı bólekshelerge tásir etetuǵın kúshlerdiń qosındısı (7-paragraf) ǵana emes, al kúshlerdiń momentleriniń qosındısınıń da nolge teń ekenligin kóremiz. Usı tastıyıqlawlardıń birinshisi impulstıń saqlanıw nızamına, al ekinshisi impuls momentiniń saqlanıw nızamına tiyisli.

Tuyıq sistemanıń usınday qásiyetleri menen keńisliktiń óziniń tiykarǵı qásiyetleri arasında tereń baylanıs bar.

Keńislik *bir tekli*. Bul tuyıq sistemanıń qásiyetiniń keńisliktiń qay jerinde turǵanlıǵına baylanıssız ekenligi bildiredi. Keńislikte bóleksheler sisteması sheksiz kishi aralıqqa jılıssın hám usınıń menen birge sistemadaǵı bólekshelerdiń barlıǵı da birdey baǵıtta birdey aralıqqa jılıssın. Usı jılısıw vektorın $d\mathbf{R}$ arqalı belgileyik. Usınday jaǵdayda i -bólekshe ústinen $\mathbf{G}_i d\mathbf{R}$ jumısı islenedi. Barlıq jumıslardıń qosındısı sistemanıń potencial energiyasınıń ózgerisine teń bolıwı kerek. Biraq sistemanıń keńisliktiń qay jerinde turǵanlıǵınan ǵárezsizligine baylanıslı potencial energiyanıń bul ózgerisi nolge teń bolıwı kerek. Solay etip

$$\mathbf{G}_1 d\mathbf{R} + \mathbf{G}_2 d\mathbf{R} + \dots = (\mathbf{G}_1 + \mathbf{G}_2 + \dots) d\mathbf{R} = 0.$$

Bul teńlik $d\mathbf{R}$ vektorınıń qálegen baǵıtında orınlanatuǵın bolǵanlıqtan kúshlerdiń qosındısı $\mathbf{G}_1 + \mathbf{G}_2 + \dots$ nıń nolge teń ekenligi kelip shıǵadı.

Solay etip biz impulstıń saqlanıw nızamınıń keńisliktiń bir tekililigine baylanıslı ekenligin kórdik.

Tap sonday baylanıs impuls momentiniń saqlanıw nızamı hám keńisliktiń jáne de bir qásiyeti bolǵan izotropılıǵı (yaǵnıy keńisliktegi barlıq baǵıtlardıń ekvivalenttiligi) arasında orın aladı. Usınday izotropılıqtıń bar bolıwınıń saldarınan tuyıq sistemanıń qásiyetleri usı sistemanı tutası menen burǵanda ózgermeydi. Sonlıqtan usınday burıwlarda islengen jumıs nolge teń bolıwı kerek. Sonıń menen birge usınday shártten tuyıq sistemadaǵı kúshlerdiń momentleriniń qosındısınıń nolge teń ekenligi kelip shıǵadı (usı máselege biz 28-paragrafta qaytıp kelemiz).

§ 16. Oraylıq maydandaǵı qozǵalııs

Momenttiń saqlanıw nızamı tuyıq sistema ushın orınlanıp, usı sistemanıń quramına kiriwshi ayırım bóleksheler ushın orınlanbaydı. Biraq usı nızamnıń kúsh maydanında qozǵalıwshı bir bólekshe ushın da orınlanatuǵın jaǵday bar. Bul ushın maydanniń oraylıq maydan bolıwı kerek.

Oraylıq maydan dep potencial energiyası tek ǵana maydanniń orayı dep atalatuǵın noqatqa shekemgi r aralıǵınan ǵárezli bolǵan funkciya bolıp tabılatuǵın maydanǵa aytamız: $U=U(r)$. Usınday maydanda bólekshege tásir etetuǵın kúsh te r qashıqlıǵına ǵárezli bolıp, keńisliktiń hár bir noqatında usı noqatqa maydanniń orayınan júrgizilgen radius baǵıtında boladı.

Usınday maydanda qozǵalıwshı bólekshe tuyıq sistemanı payda etpese de bul bólekshe ushın eger moment maydanniń orayına qarata anıqlanǵan bolsa impuls momentiniń saqlanıw nızamı orınlanadı. Haqıyqatında da, bólekshege tásir etetuǵın

kúshitiń baǵıtı maydannıń orayı arqalı ótetuǵın bolǵanlıqtan usı noqatqa salıstırǵandaǵı kúshitiń iyini nolge teń hám sonlıqtan kúsh momenti de nolge teń. Bunnan $\frac{dL}{dt} = K$ teńlemesine sáykes $L = \text{sonst}$ ekenligi kelip shıǵadı.

Moment $L = m[rv]$ radius-vektor r ge perpendikulyar bolǵanlıqtan L diń baǵıtınıń turaqlılıǵınan bólekshe qozǵalǵanda onıń radius-vektorınıń barlıq waqıtta da L diń baǵıtına perpendikulyar bolǵan tegislikte qalıwınıń kerekligi kelip shıǵadı. Solay etip oraylıq maydanda bóleksheler tegis orbitalar boyınsha qozǵaladı. Bul orbitalar maydannıń orayı arqalı ótetuǵın tegisliklerde jatadı.

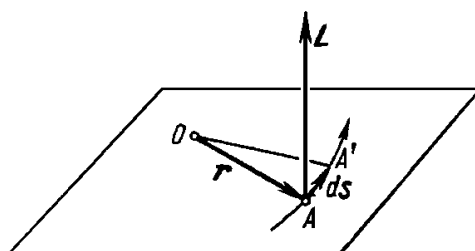
Usınday "tegis" qozǵalısta impuls momentiniń saqlanıw nızamına kórgizbeli túr beriw múmkin. Bul ushın L di bilayınsha jazamız:

$$L = m[rv] = \left[r \frac{ds}{dt} \right] = m \frac{[rds]}{dt}.$$

Bul jerde ds materiallıq noqattıń dt waqıtı ishindegi orın almasıwı. Eki vektordıń vektorlıq kóbeymesi geometriyalıq jaqtan usı vektorlar tárepinen dúzilgen parallelogramnıń maydanına teń. Al ds hám r vektorlarında dúzilgen parallelogramnıń maydanı dt waqıtı ishinde qozǵalıwshı noqattıń radius vektorı basıp ótken sheksiz kishi OAA' sektorınıń eki eselengen maydanına teń (17-súwret). Bul maydandı dS arqalı belgilep momenttiń shamasın bilayınsha jaza alamız:

$$L = 2m \frac{dS}{dt}.$$

$\frac{dS}{dt}$ shaması sektorlıq tezlik dep ataladı.



17-сүрет

Solay etip impuls momentiniń saqlanıw nızamın sektorlıq tezliktiń turaqlılıǵı túrinde aytıw múmkin eken: qozǵalıwshı noqattıń radius-vektorı birdey waqıtlar ishinde birdey maydandı basıp ótedi. Usı túrdegi bul tastıyıqlaw *Keplerdiń ekinshi nızamı* dep ataladı.

Oraylıq maydandaǵı qozǵalıw haqqındaǵı máseleniń áhmiyeti sonnan ibarat, bir biri menen tásir etisetuǵın materiallıq noqatlardıń bir birine salıstırǵandaǵı qozǵalıwı haqqındaǵı másele (*eki dene máselesi* dep atalıwshı másele) usı máselege alıp kelinedi.

Bunday qozǵalıstı eki bóleksheniń inerciya orayı sistemasında qaraymız. Bunday sistemada bólekshelerdiń impulslarınıń qosındısı noǵe teń:

$$m_1 \mathbf{v}_1 + m_2 \mathbf{v}_2 = 0.$$

Bul jerde \mathbf{v}_1 hám \mathbf{v}_2 ler bólekshelerdiń tezlikleri. Bólekshelerdiń salıstırmalı tezligin kiritemiz:

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2.$$

Bul teńliklerden hár bir bóleksheniń tezligin olardıń salıstırmalı tezligi arqalı ańlatatuǵın mına formulalardı ańsat alamız:

$$v_1 = \frac{m_2}{m_1 + m_2} v, \quad v_2 = -\frac{m_1}{m_1 + m_2} v.$$

Bul formulalardı bóleksheniń tolıq energiyası ańlatpalarına qoyamız:

$$E = \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} + U(r).$$

Bul jerde $U(r)$ bóleksheler arasındaqı salıstırmalı qashılıqtıń funkciyası túrinde jazılǵan bólekshelerdiń óz-ara potentsial energiyası (yaǵnıy $\mathbf{r} = \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2$ vektorınıń absolyut shamasınan). Aǵzalardı ápiwayı keltiriwden keyin $E = \frac{mv^2}{2} + U(r)$ ańlatpasın alamız, bul jerde

$$m = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$$

bólekshelerdiń keltirilgen massası dep ataladı.

Biz bul jerde eki bóleksheniń bir birine salıstırǵandaǵı qozǵalıstı energiyasınıń massası m bolǵan bóleksheniń $\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}$ tezligi menen potentsial energiyası $U(r)$ bolǵan oraylıq maydanda qozǵalǵanındaǵı bir bóleksheniń energiyasında bolatuǵınlıǵın kóremiz. Basqa sóz benen aytqanda eki bóleksheniń qozǵalıstı haqqındaǵı másele sırtqı maydandaǵı bir "keltirilgen" bóleksheniń qozǵalıstına alıp kelinedi.

Eger usı másele sheshilgen bolsa (yaǵnıy "keltirilgen" bóleksheniń traektoriyası $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$ anıqlanǵan bolsa)

$$\mathbf{r}_1 = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \mathbf{r}, \quad \mathbf{r}_2 = -\frac{m_1}{m_1 + m_2} \mathbf{r}.$$

formulaları járdeminde m_1 hám m_2 bóleksheleriniń traektoriyaların anıqlawǵa boladı. Bul formulalar bólekshelerdiń inerciya orayına salıstırǵandaǵı radius-vektorları \mathbf{r}_1 menen \mathbf{r}_2 lerdi anıqlaydı ($\mathbf{r} = \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2$, bul formulalar $m_1 \mathbf{v}_1 + m_2 \mathbf{v}_2 = 0$ teńlemesinen kelip shıǵadı hám joqarıda tezlikler ushın keltirilgen $\mathbf{v}_1 = \frac{d\mathbf{r}_1}{dt}$ hám $\mathbf{v}_2 = \frac{d\mathbf{r}_2}{dt}$ formulalarına sáykes). Bul jerde eki bóleksheniń de sistemaniń inerciya orayına salıstırǵanda tek ólshemleri boyınsha bir birinen ayrılatuǵın hám bólekshelerdiń massalarına keri proporsional bolǵan geometriyalıq uqsas orbitalar boyınsha qozǵalatuǵınlıǵın kórinip tur:

$$\frac{\mathbf{r}_1}{r_2} = \frac{m_2}{m_1}.$$

Qozǵalıstıń barısında bóleksheler inerciya orayı arqalı ótiwshi bir tuwrınıń eki ushında jaylasadı.

II Bap. MAYDAN

§ 17. Elektr tásirlesiwi

Joqarıdaǵı bapta biz kúshke anıqlama berdik hám onı potentsial energiya menen baylanıstırdıq. Endi biz hár qıylı fizikalıq qubılıslardıń tiykarında jatatuǵın bazı bir tásirlesiwlerdi ayqın túrde tallawǵa ótemiz.

Tábiyattaǵı eń áhmiyetli bolǵan tásirlesiwlerdiń biri *elektrlik tásirlesiw* bolıp tabıladı. Mısalı atomlar menen molekularındaǵı tásirlesiw kelip shıǵıwı boyınsha tiykarınan elektrlik tásirlesiw bolıp tabıladı; sonlıqtan bunday tásirlesiw hár qıylı denelerdiń ishki qurılısın anıqlaydı.

Elektr tásirlesiwi kúshleri bólekshelerdiń ayrıqsha fizikalıq xarakteristikası bolǵan *elektr zaryadınıń* bar ekenligi menen baylanıslı. Elektr zaryadı joq deneler bir biri menen elektrlik jaqtan tásirlespeydi.

Eger denelerdi materiallıq noqatlar dep qaray alatuǵın bolsaq, onda olar arasındaǵı elektrlik tásirlesiw kúshi bul denelerdiń zaryadlarınıń kóbeymesine tuwrı proporcional hám olar arasındaǵı qashıqlıqtıń kvadratına keri proporcional. Bunday awhal *Kulon nızamı* dep ataladı. Elektrlik tásirlesiw kúshin \acute{G} hárıpi menen, denelerdiń zaryadların e_1 hám e_2 hárıpleri menen, al olar arasındaǵı qashıqlıqtı r hárıpi menen belgilesek Kulon nızamın bılayınsha jazamız:

$$F = const * \frac{e_1 e_2}{r^2}.$$

\acute{G} kúshi zaryadlardı tutastırıwshı tuwrı baǵıtında baǵıtlanǵan hám tájiriybelardıń kórsetiwinshe bar qansha jaǵdaylarda zaryadlanǵan denelerdiń tartısıwına, bir qansha jaǵdaylarda iyterisiwine sáykes keledi. Usı sebepli hár qıylı belgige iye zaryadlar haqqında ayıladı: birdey belgige iye zaryadlar menen zaryadlanǵan deneler bir birinen iyteriledi, al hár qıylı zaryadlar menen zaryadlanǵan deneler bir birine tartısadı. Usınıń menen birge Kulon nızamındaǵı kúshtiń oń belgisi iyterisiwge, teris belgisi tartısıwǵa sáykes keledi. Qanday zaryadlardı oń belgige iye, al qanday zaryadlardı teris belgige iye dep esaplawdıń bir birinen parqı joq. Al házirgi waqıtları fizikadaǵı zaryadlardı saylap alıw shárti áyyemgi grekler tárepinen qabıl etilgen. Sózsiz esapqa alıw kerek bolǵan nárse sol zaryadlardıń belgileriniń hár qıylılıǵı yamasa birdeyligi bolıp tabıladı. Eger biz barlıq oń belgige iye zaryadlardı teris belgige iye, al teris belgige iye zaryadları bar bólekshelerdi oń zaryadlanǵan deneler dep esaplasaq fizika ilimi nızamlarında hesh qanday ózgeris bolmaǵan bolar edi.

Biz elektr zaryadları menen birinshi ret ushırastıq hám usıǵan baylanıslı olardıń ólshem birlikleri haqqında ele hesh nárse bilmeytuǵın bolǵanlıqtan Kulon nızamındaǵı proporcionallıq koefficientin birge teń etip alıwımızǵa boladı: $F = \frac{e_1 e_2}{r^2}$. Usınıń menen birge biz zaryadtıń anıq bir birliğin payda etemiz: bul bir birinen bir santimetr qashıqlıqta turǵan hám usınday qashıqlıqta bir dinaǵa teń kúsh penen zaryadtıń birliǵı boladı. Bul birlik *zaryadtıń elektrostatikalıq birliǵı* dep ataladı. Kulon nızamındaǵı proporcionallıq koefficientti birge teń alıwǵa tiykarlanǵan birlikler sistemasın elektrostatikalıq sistema yamasa SGSE sisteması dep ataladı. Bunday sistemadaǵı zaryadtıń ólshemi:

$$[e] = ([\acute{G}][r]^2)^{1/2} = \left(\frac{g * sm}{sek^2} sm^2 \right) = g^{1/2} sm^{3/2} sek^{-1}.$$

SI sistemasında *kulon* dep atalıwshı zaryadtıń tómendegige teń úlken ólshemi paydalanıladı:

$$1 \text{ kulon} = 1 \text{ k} = 3 * 10^9 \text{ zaryadtıń SGSE birliǵı}.$$

Elektr tásirlesiwı ushın jazılǵan ańlatpaǵa iye bola otırıp eki e_1 hám e_2 zaryadları arasındaǵı elektrlik tásirlesiwge sáykes keletuǵın potencial energiyanı tabıwǵa boladı. Eger usı eki zaryad arasındaǵı qashıqlıq dr shamasına ózgeretuǵın bolsa $dA = \frac{e_1 e_2}{r^2} dr$ jumısı islenedi. Ekinshi tárepten bul jumısı U potencial energiyanıń kemeyiwiniń esabınan islenedi. Sonlıqtan

$$-dU = \frac{e_1 e_2}{r^2} dr = -e_1 e_2 d\left(\frac{1}{r}\right).$$

Bunnan

$$U = \frac{e_1 e_2}{r}.$$

Durısın aytqanda bul jerde biz jáne bir turaqlı qosılıwshıǵa iye bolıwımız kerek; bólekshelerdi bir birinen sheksiz úlken aralıqlarǵa qashıqlastırǵanda potencial energiyanı nolge teń boladı dep esaplap bul turaqlılını biz nolge teń etip aldıq Solay etip eki zaryadtıń

bir biri menen tásir etisiwiniń potencial energiyası usı zaryadlar arasındaǵı qashıqlıqqa kerı proporcional eken.

§ 18. Elektr maydanınıń kernewliligi

Kulon nızamına zaryadlardıń kóbeymesi kiretuǵın bolǵanlıqtan qanday da bir e zaryadına basqa e_1 zaryadı tárepinen tásir etetuǵın kúshti bilayınsha jazıw múmkin:

$$\vec{G} = eE.$$

Bul jerde E arqalı e zaryadınıń shamasınan ǵárezsiz, al tek e_1 zaryadı menen e hám e_1 zaryadları arasındaǵı qashıqlıqtan ǵárezli bolǵan vektor. Bul vektordı *elektr maydanınıń kernewliligi* yamasa e_1 maydanı tárepinen payda etilgen elektr maydanı dep ataymız. SHaması jaǵınan ol mınaǵan teń

$$E = \frac{e_1}{r^2}$$

hám e_1 menen e zaryadları arasın tutastırıwshı tuwrı boylap baǵıtlangan. e zaryadına e_1 zaryadına tásir etiwshi kúsh e zaryadı turǵan orındaǵı e_1 zaryadı payda etken elektr maydanınıń kernewliligi menen e zaryadınıń kóbeymesine teń dep aytıwǵa boladı.

Solay etip biz elektrlik tásirlesiwdi táriyiplewdiń basqa usılına kelemiz. 1-bólekshe 2-bóleksheni tartadı yamasa iyteredi dep aytıwdıń ornına biz birinshi bólekshe e_1 elektr zaryadına iye bola otırıp qorshaǵan átirapında ayırıqsha kúsh maydanı bolǵan elektr maydanın payda etedi; ekinshi bólekshe bolsa 1-bólekshe menen tásir etispeydi, al oǵan tek 1-bólekshe tárepinen payda etilgen elektr maydanı tásir etedi dep aytamız.

Usınday etip eki túrli usıl menen táriyiplewdiń tek ǵana formal ayırmaǵa iyedey bolıp kóriniwi múmkin. Haqıyqatında bul onday emes hám elektr maydanı túsiniǵı formal xarakterge iye emes. Ǵaqtı boyınsha ózgermeli bolǵan elektr (hám magnit) maydanların úyreniw usı maydanlardıń elektr zaryadları bolmasa da bar bola alatuǵınlıǵın kórsetedi. Sonlıqtan tábiyattaǵı bólekshelerdiń haqıyqıy ekenligindey maydan da fizikalıq haqıyqatlıq bolıp tabıladı. Biraq bul máseleler usı jerde bayanlanatuǵın bólekshelerdiń tásirlesiwı haqqındaǵı tiykarǵı maǵlıwmalar sheklerinden sırtta jaylasqan.

Kóp sandaǵı elektr zaryadları tárepinen payda etilgen elektr maydanı elektrlik tásirlesidiń tómendegidey fundamentallıq qásiyetiege iye: eki zaryad arasındaǵı tásirlesiw úshinshi zaryadtıń qatnasıwınan ǵárezli emes. Bunnan áhmiyetli juwmaq shıǵaramız: eger kóp sandaǵı zaryadlangan deneler bar bolatuǵın bolsa, onda olar tárepinen payda etilgen elektr maydanı hár biz zaryad tárepinen payda etilgen elektr maydanlarınıń vektorlıq qosındısına teń. Basqa sóz benen aytqanda hár qıylı zaryadlar tárepinen payda etilgen elektr maydanı sol zaryadlar tárepinen payda etilgen elektr maydanlarınıń qosındısına teń eken. Elektr maydanınıń bul áhmiyetli qásiyeti *superpoziciya* qásiyeti dep ataladı.

Elektr maydanınıń superpoziciya qásiyetin elektr tásirlesiwı faktinen tikkeley kelip shıǵatuǵın nátiyje dep qarawǵa bolmaydı. Haqıyqatında elektr maydanınıń bul tereń qásiyeti tábiyattıń nızamı bolıp tabıladı. Bul qásiyettiń bolıwı tek ǵana elektr maydanına tiyisli bolıp qoymaytuǵınlıǵın hám fizikada júdá áhmiyetli orın iyeleytuǵınlıǵın ańǵarıwımız kerek.

Superpoziciya qásiyetin quramalı deneniń usı deneden alıs qashıqlıqlardaǵı elektr maydanın tabıwǵa qollanamız. Eger deneni quraytuǵın bólekshelerdiń zaryadları e_1, e_2, \dots . bolsa, onda r qashıqlıǵında payda bolatuǵın maydanlar bilay jazıladı:

$$E_1 = \frac{e_1}{r^2}, E_2 = \frac{e_2}{r^2}, \dots$$

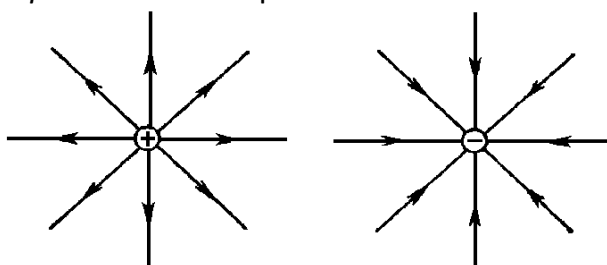
Deneden úlken qashıqlıqlarda barlıq qashıqlıqlardı birdey dep, al usı ayırım bólekshelerden berilgen noqatqa qaraǵan baǵıtlardı da birdey dep qarawǵa boladı. Sonlıqtan superpoziciya qásiyetin E qosındı maydandı tabıw ushın paydalanıp E_1, E_2, \dots maydanların algebralıq qosamız:

$$E = \frac{e_1 + e_2 + \dots}{r^2}.$$

Biz quramalı deneniń zaryadınıń zaryadı

$$e = e_1 + e_2 + \dots$$

bolǵan deneniń zaryadınan ayırmasınıń joq ekenligin kóremiz. Basqa sóz benen aytqanda quramalı deneniń zaryadı usı deneni quraytuǵın bólekshelerdiń zaryadlarınıń qosındısına teń hám bul zaryadlardıń óz-ara jaylasıwlarına hám qozǵalıısına baylanıslı emes eken. Bul tastıyıqlaw *zaryadtıń saqlanıw nızamı* dep ataladı.

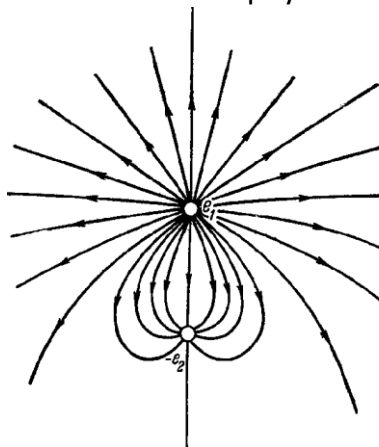


1-cyypet

Ulıwma jaǵdayda elektr maydanı noqattan noqatqa ótkende shaması jaǵınan da, baǵıtı boyınsha da ózgerip quramalı xarakterge iye bolıwı múmkin. Maydandı grafikalıq túrde súwretlew ushın *elektr kúsh sızıqlarınan* paydalanıw múmkin. Bul keńisliktiń hár bir noqatında bar bolǵan, usı noqatqa tásir etiwshi elektr maydanınıń baǵıtına iye sızıq bolıp tabıladı.

Eger maydan bir zaryad tárepinen payda etiletuǵın bolsa, onda kúsh sızıqları zaryadtıń belgisine baylanıslı usı zaryadtan baslanatuǵın yamasa usı zaryadqa kelip kiretuǵın tuwrı sızıqlar bolıp tabıladı (1-súwret).

Kúsh sızıqlarınıń anıqlamasınan keńisliktiń hár bir noqatınan (bul noqatta zaryadtıń bolmawı kerek) usı noqatta elektr maydanınıń tásir etiw baǵıtında tek ǵana bir kúsh sızıǵı ótetuǵınlıǵı óz-ózin túsiniwli. Basqa sóz benen aytqanda keńisliktiń elektr zaryadları joq noqatlarında kúsh sızıqları bir biri menen kesilispeydi.



2-cyypet

Turaqlı maydandaǵı elektr kúsh sızıqlarınıń tuyıq bolıwı múmkin emes. Haqıyqatında da kúsh sızıǵın boylap zaryadtı kóshirgende kúsh jol baǵdarında bolǵanlıqtan maydan kúshleri tárepinen oń mánisli jumıs islenedi. Sonlıqtan eger tuyıq kúsh sızıqları bolǵanda

usınday sızıqlardı boylap zaryadtı kóshirip dáslepki awhalğa alıp kelingende islengen jumıs nolge teń bolmağan bolar edi. Bul energiyasını saqlanıw nızamına qayshı keledi.

Solay etip kúsh sızıqlarınıń qanday da bir orında baslanıwı yamasa úziliwi yaki sheksizlikke ketiwi kerek. Kúsh sızıqlarınıń baslanıw yamasa úziliw noqatları maydandı payda etiwshi elektr zaryadları bolıp tabıladı. Al sheksizlikke keletuǵın bolsaq, maydan kúsh sızıqlarınıń eki ushınıń da sheksizlikke ketiwi múmkin emes. Eger usınday bolmaǵanda zaryadtı kúsh sızıǵı boylap sheksizlikten sheksizlikke shekem kóshirgende maydan kúshleri tárepinen bazı bir jumıs islengen bolar edi. Bunday jaǵdaydıń orın alıwınıń múmkinshiligi joq, sebebi sheksizlikte potencial energiyasınıń mánisi nolge teń.

Sonlıqtan kúsh sızıǵınıń bir ushı zaryad bolıp tabıladı, al ekinshi ushı yaki sheksizlikke ketedi, yaki basqa bir zaryadta ornasadı. Usı jaǵdayda illyustraciyalaw ushın 2-súwrette belgileri qarama-qarsı bolǵan eki $+e_1$ hám $-e_2$ zaryadlarınıń maydanı keltirilgen. Súwret e_1 zaryadınıń e_2 den úlken bolǵan jaǵdayına sáykes keledi. Sonlıqtan $+e_1$ zaryadınan shıqqan kúsh sızıqlarınıń bir bólegi $-e_2$ zaryadında tamam boladı, al basqa bólegi sheksizlikke ketedi.

§ 19. Elektrostatikalıq potencial

Kúsh sıyaqlı qanday da bir elektr maydanında turǵan e zaryadınıń potencial energiyası U da usı zaryadtıń shamasına tuwra proporcional, yaǵnıy

$$U = e \cdot \phi.$$

Bul ańlatpaǵa kiriwshi hám bir birlik zaryadtıń potencial energiyası bolǵan - shaması *elektr maydanınıń potencialı* dep ataladı.

Usı anıqlamanı elektr maydanınıń kernewliginiń anıqlamısı ($\vec{G} = e\vec{E}$, bul jerde \vec{G} arqalı e zaryadına tásir etetuǵın kúsh belgilengen) menen salıstırsaq hám kúsh penen potencial energiya arasındaqı qatnastıń $\vec{G}_s = -\frac{dU}{ds}$ ekenligin eske túsirsek, tap sonday ańlatpa boyınsha maydannıń kernewiligini menen potencialınıń baylanısqanlıǵın kóremiz:

$$E_s = -\frac{d\phi}{ds}.$$

Bir birinen r qashıqlıǵında turǵan eki e_1 hám e_2 zaryadlarınıń potencial energiyasınıń

$$U = \frac{e_1 e_2}{r}$$

ge teń ekenligin bilemiz. Sonlıqtan e_1 zaryadı tárepinen payda etilgen maydannıń usı zaryadtan r qashıqlıǵındaǵı potencialı

$$\phi = \frac{e_1}{r}$$

boladı. Zaryadtan qashıqlasqanda potencial qashıqlıqtıń birinshi dárejesine keri proporcional kemeyedi.

Eger maydan bir emes, al kóp sandaǵı e_1, e_2, \dots zaryadları tárepinen payda etiletuǵın bolsa, superpoziciya principinen keńisliktiń qanday da bir noqatındaǵı potencialdıń

$$\phi = \frac{e_1}{r_1} + \frac{e_2}{r_2} + \dots$$

formulası menen anıqlanatuǵınlıǵı kelip shıǵadı.

e zaryadın keńisliktiń potencialı ϕ_1 bolǵan noqatınan potencialı ϕ_2 bolǵan noqatına kóshirgende islengen jumıs zaryadtıń baslanǵısh hám aqırǵı noqatlardaǵı potenciallardıń ayırmasına kóbeymesine teń:

$$A_{12} = e(\phi_1 - \phi_2).$$

Keńisliktiń potencialları birdey bolǵan noqatları bazı bir betti payda etedi. Usınday betler *ekvipotencial* betler dep ataladı.

Zaryadtı ekvipotencial bet boyınsha kóshirgende maydan kúshleri tárepinen islengen jumıs nolge teń. Jumıstıń nolge teńligi kúshitiń orın almasıwǵa perpendikulyar ekenligin bildiredi. Sonlıqtan keńisliktiń hár bir noqatındaǵı elektr maydanınıń kernewliligi ekvipotencial betke perpendikulyar dep tastıyqlawǵa boladı. Basqa sóz benen aytqanda kúsh sıızqları ekvipotencial betlerge perpendikulyar. Mısalı noqatlıq zaryad jaǵdayında kúsh sıızqları zaryad arqalı ótetuǵın tuwrılar boladı, al ekvipotencial betler bolıp orayı usı noqatlıq zaryad bolǵan koncentrik betler xızmet etedi.

Elektr potencialı tómendegidey ólshemge iye:

$$[-] = [U]/[e] = g^{1/2} sm^{1/2} sek^{-1}.$$

1 $g^{1/2} sm^{1/2} sek^{-1}$ shaması SGSE birlikler sistemasındaǵı potencialdıń birliǵı bolıp tabıladı. SI sistemasında volt (v) dep atalatuǵın 1 $g^{1/2} sm^{1/2} sek^{-1}$ shamasınan 300 ese kishi bolǵan basqa birlik qullanıladı.

$$1 v = \frac{1}{300} \text{ potencialdıń SGSE birliǵı.}$$

Eger shaması 1 kulonǵa teń zaryad potenciallar ayırması 1 v bolǵan bir noqattan ekinshi noqatqa kóshirilgende maydan kúshleri tárepinen islengen jumıs $3910^9 \frac{1}{300} = 10^7$ erg, yaǵnıy bir djoulge teń jumıs islenedi:

$$1 k9v = 1 dj.$$

§ 20. Gauss teoreması

Endi áhmiyeti joqarı bolǵan elektr maydanınıń *aǵısı* túsiniǵin kirgizemiz. Bul túsinikke kórgizbeli túr beriw ushın maydan tárepinen iyelengen keńisliktiń kewlimizde hár noqatında tezligi usı noqattaǵı elektr maydanınıń kernewliginiń shaması menen teń keletuǵın bazı bir suyıqlıq penen toltırılǵan dep qabıl etemiz. Ǵaqtırlıqlıq qanday da bir bet arqalı aǵıp ótetuǵın suyıqlıqtıń kólemi usı bet arqalı aǵıp ótiwshi elektr maydanınıń aǵısın beredi.

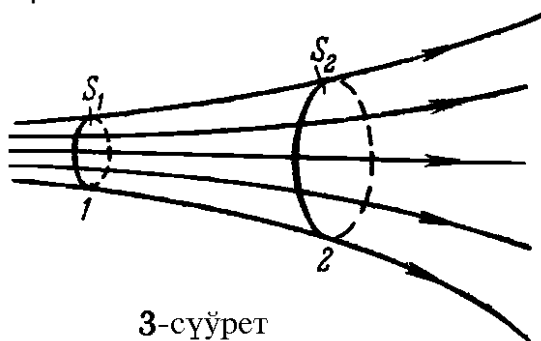
Noqatlıq e zaryadı tárepinen radiusı r bolǵan sferalıq bet arqalı aǵıp ótiwshi elektr maydanınıń aǵısın anıqlaymız (e zaryadı usı sferanıń orayında jaylasqan dep esaplaymız). Kulon nızamı boyınsha bul jaǵdaydaǵı maydanniń kernewliligi $E=e/r^2$ qa teń. Sonlıqtan kewlimizdeki suyıqlıqtıń da aǵısı da e/r^2 qa teń boladı, al aǵıs bolsa usı shamalı sferanıń beti $4\pi r^2$ qa kóbeytkenge teń. Solay etip maydanniń aǵısı mınaǵan teń:

$$E \cdot 4\pi r^2 = 4\pi e.$$

Bul jerde aǵıstıń sferanıń radiusınan ǵárezsiz, al tek zaryad boyınsha anıqlanatuǵınlıǵın kóremiz. Eger sferanı basqa bir tuyıq bet penen almastırǵanda da elektr maydanınıń aǵısınıń ózgermey qalatuǵınlıǵın hám $4\pi e$ ge teń bolatuǵınlıǵın kórsetiwge boladı. Bul jaǵday Kulon nızamında qashıqlıqtıń kvadratına keri proporcionalıqtıń turǵanlıǵınıń nátiyjesi bolıp tabıladı.

Endi bir emes, al bir qansha zaryadlar tárepinen payda etilgen elektr maydanınıń aǵısın qaraymız. Bul aǵıstı elektr maydanınıń superpoziciya qásiyetin qullanıw arqalı tabıwǵa boladı. Blqtıyarlı túrdegi tuyıq bet arqalı aǵıs usı bet ishinde jaylasqan ayırım zaryadlardan keletuǵın aǵıslardıń qosındısına teń ekenligi óz-ózinen túsiniqli. Hár bir aǵıs zaryadtı 4π ge kóbeytkenge teń bolatuǵın bolǵanlıqtan tuyıq bet arqalı tolıq aǵıs usı bettiń

ishinde joylashgan zaryadlarning algebralik summasini 4π ga kóbeytkenge teń. Bunday jaǵday *Gauss teoreması* dep ataladı.



Eger tuyıq bettiń ishinde zaryadlar bolmasa yamasa zaryadlarning qosındısı nolge teń bolsa, onda bul bet arqalı ótiwshi elektr maydanınıń aǵısı nolge teń boladı.

Kúsh sıızqlarınıń kishi dástesin qarayıq hám usı dásteniń ózi kúsh sıızqlarınan turatuǵın bet penen sheklengen bolsın (3-súwret). Usınday dásteni (bunday dásteni kúsh nayı dep te ataymız) 1 menen 2 arqalı belgilengen eki ekvipotencial betleri menen kesemiz jáne kúsh nayınıń qaptal beti hám sol ekvipotencial betler arqalı payda etilgen tuyıq bet arqalı aǵıstı anıqlaymız. Ekinshi tárepten qaptal betler arqalı aǵıs ta nolge teń ekenligi ayqın; sonlıqtan 1 hám 2 betleri arqalı aǵıslar óz-ara teń bolıwı kerek. Kórgizbelilik ushın biziń kúsh sıızqlarımızdıń dástesin suyıqlıqtıń aǵısı menen salıstıramız.

1 hám 2 kese-kesimlerdegi maydanniń qernewliliklerin E_1 hám E_2 arqalı, al sol kese-kesimlerdeń maydanların sáykes S_1 hám S_2 arqalı belgileybiz. Kúsh nayın kishi dep esaplaǵanlıqtan kese-kesimler boyınsha E_1 menen E_2 ler ózgermeydi dep boljawǵa boladı. Sonlıqtan 1 hám 2 betleri arqalı aǵıslardıń teńligin bilayınsha jazamız:

$$S_1 E_1 = S_2 E_2$$

(maydan ekvipotencial betlerge perpendikulyar bolǵanlıqtan aǵıs maydan kernewliligi menen bettiń maydanınıń kóbeymesine teń). Demek S_1 kese-kesimi arqalı ótetuǵın kúsh sıızqlarınıń sanı N_1 diń shaması S_2 kese-kesimi arqalı ótetuǵın kúsh sıızqlarınıń sanı N_2 ge teń hám sonlıqtan mına ańlatpanı jaza alamız:

$$\frac{N_1}{S_1 E_1} = \frac{N_2}{S_2 E_2}.$$

$n_1 = N_1/S_1$ menen $n_2 = N_2/S_2$ shamaları kúsh sıızqlarına perpendikulyar bolǵan 1 hám 2 betlerinin bir birligi arqalı ótiwshi kúsh sıızqlarınıń sanı. Solay etip kúsh sıızqlarınıń tıǵızlıǵınıń yamasa jıyılıǵınıń maydanniń kernewliligine proporcional ekenligin kóremiz:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{E_1}{E_2}.$$

Solay etip maydandı kúsh sıızqları járdeminde grafikalıq súwretlew maydanniń baǵıtın da kórsetedi hám onıń shaması haqqında aytıwǵa múmkinshilik beredi. Kúsh sıızqları jıyı orınlarda elektr maydanınıń kernewliligi úlken, al kúsh sıızqları sıyreke orınlarda elektr maydanı ázzi.

§ 21. Ápiwayı jaǵdaylardaǵı elektr maydanları

Bir qatar jaǵdaylarda Gauss teoreması quramalı zaryadlangan deneler tárepinen payda etilgen maydandı tabıwǵa múmkinshilik beredi. Bunday jaǵdaylarda usı quramalı denelerdegi zaryadlar jetkilikli dárejede simmetriyalı bolıp joylashqan bolıwı shárt.

Birinshi misal retinde biz simmetriyalı zaryadlangan shardıń maydanın anıqlaymız. Bunday shardıń maydanı onıń radiusları boyınsha baǵıtlangán bolıp, tek shardıń orayına shekemgi qashıqlıqtan ǵárezli boladı. Bunnan shardıń sırtındaǵı maydandı ańsat esaplawǵa boladı. Orayı zaryadlangan shardıń orayı menen bir noqatta jaylasqan radiusı r bolǵan sferalıq bet arqalı maydannıń aǵısın anıqlaymız. Bul aǵıstıń $4\pi r^2 E$ ekenligi óz-ózinen ayqın. Ekinshi tárepten Gauss teoreması boyınsha aǵıs $4\pi e$ ge teń (e arqalı shardıń zaryadı belgilengen). Sonlıqtan $4\pi r^2 E = 4\pi e$ hám bunnan

$$E = \frac{e}{r^2}.$$

Demek shardıń sırtındaǵı maydan zaryadı shardıń zaryadına teń hám usı shardıń orayında jaylasqan noqatlıq zaryadtıń maydanınday boladı eken. Usıǵan sáykes usınday maydannıń potencialı noqatlıq zaryadtıń potencialınday boladı:

$$- = \frac{e}{r}.$$

Shardıń ishindegi maydan usı sharda zaryadlardıń qalay jaylasqanlıǵına baylanıslı. Eger zaryadlar shardıń tek betinde jaylasqan bolsa shardıń ishindegi maydan nolge teń boladı.

Eger zaryad shardıń ishinde ρ tıǵızlıǵı menen teń ólshewli tarqalǵan bolsa (ρ degenimiz shardıń kólem birliginiń zaryadı bolıp tabıladı). Onda shardıń ishindegi maydan shardıń ishinde jaylasqan radiusı r bolǵan sharǵa qollanılǵan Gauss teoriyası járdeminde anıqlanadı:

$$E4\pi r^2 = 4\pi e_r.$$

Bul jerde e_r arqalı sferalıq bettiń ishinde jaylasqan zaryad belgilengen. Bul zaryad zaryadtıń tıǵızlıǵı menen r radiuslı sferanıń kóbeymesine teń, yaǵnıy $e_r = \frac{4\pi}{3} r^3 \rho$. Solay etip

$$E4\pi r^2 = 4\pi \frac{4\pi}{3} r^3 \rho.$$

Bunnan

$$E = \frac{4\pi}{3} r \rho.$$

Biz kólemi boyınsha teń ólshemli zaryadlangan shardıń ishindegi maydannıń onıń orayına shekemgi aralıqtan proporcional, al shardıń sırtında bolsa qashıqlıqtıń kvadratına kerı proporcional ekenligi kórdik. 4-súwrette usınday shardıń maydanınıń shardıń orayına shekemgi qashıqlıqqa ǵárezziligi kórsetilgen súwrette a arqalı shardıń radiusı belgilengen).

Ekinshi misal retinde tuwrı sıızılıq simniń maydanın anıqlaymız. Bul sim boyınsha zaryadlar teń ólshewli tarqalǵan bolsın. Simniń uzınlıǵın jetkilikli dárejede uzın dep esaplap onıń ushlarınń tásin esapqa almaymız, yaǵnıy simdi sheksiz uzın dep esaplaymız.

Simmetriya kóz-qarası boyınsha usınday sim tárepinen payda etilgen maydannıń simniń uzınlıǵı baǵıtında qurawshılardı iye bolıwı múmkin emes (sebebi tómén yamasa joqarı qaraǵan eki tárep te bir birine ekvivalent). Sonlıqtan maydan barlıq noqatlarda da simǵa perpendikulyar baǵıtlangán bolıwı kerek. Usı jaǵdaylardan paydalanıp simniń maydanın ańsat anıqlaymız. Bunıń ushın radiusı r hám uzınlıǵı l bolǵan kósheri usı sim bolǵan cilindrdiń beti arqalı aǵıstı anıqlaymız (5-súwret). Maydan cilindrdiń kósherine perpendikulyar bolǵanlıqtan cilindrdiń ultanları arqalı aǵıslar nolge teń. Sonlıqtan tolıq aǵıstı anıqlaw cilindrdiń qaptal betleri arqalı aǵıstı anıqlawǵa alıp kelinedi. Bul aǵıstıń $E92\pi r l$ ge teń ekenligi ayqın kórinip tur. Ekinshi tárepten Gauss teoreması boyınsha bul aǵıs $4\pi e$ ge teń (e arqalı l uzınlıǵındaǵı simniń zaryadı belgilengen). Eger q arqalı simniń

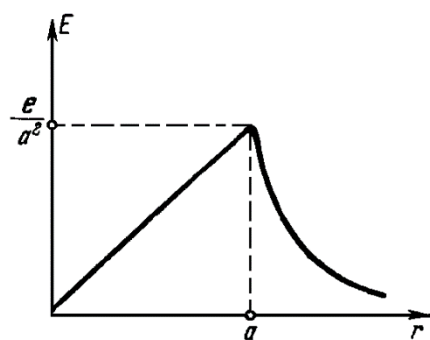
uzınlıgınıń bir birligindegi zaryad belgilengen bolsa $e = ql$ ekenligin túsiniw ańsat. Solay etip

$$2\pi r l E = 4\pi e = 4\pi ql.$$

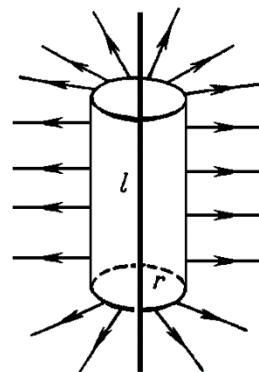
Bunnan

$$E = \frac{2q}{r}.$$

Solay etip teń ólshewli zaryadlangan simnıń maydanınıń usı simnan qashıqlıq r ge keri proporcional ekenligin kóremiz.



4-сүрет



5-сүрет

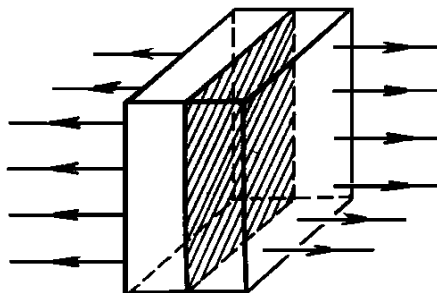
Endi bul maydannıń potencialın anıqlaymız. E niń radial bağıttaǵı proekciyası E_r usı E niń mánisi menen birdey. Kernewlilik penen potencial arasındǵı ulıwmalıq qatnastan

$$\frac{d\phi}{dr} = E = \frac{2q}{r}.$$

Bunnan

$$\phi = -2q \ln r + \text{const.}$$

Bul jaǵdayda potencialdıń simǵa shekemgi qashıqlıqtan logariflik ǵárezlilikke iye bolatuǵınlıǵı kóremiz. Bul formuladaǵı konstantanı anıqlaw ushın potencialdıń sheksizlikte nolge teń bolıw shártin qollana almaymız. Sebebi jazılǵan ańlatpa rKÇ te sheksizlikke aylanadı. Bul jaǵday simdı sheksiz uzın dep algannıń nátiyjesi bolıp tabıladı hám alınǵan formuladan simnıń uzınlıǵınan r kishi bolǵan jaǵdaylarda ǵana paydalanıwdıń múmkin ekenligin bildiredi.



6-сүрет

Endi bir tekli zaryadlangan sheksiz tegisliktiń maydanın tabamız. Simmetriya kóz-qarasınan bunday tegisliktiń maydanınıń tegislikke perpendikulyar hám usı tegisliktiń eki tárepinde de birdey qashıqlıqlarda birdey mániske iye (biraq baǵıtları bir birine qarsı) bolatuǵınlıǵı óz-ózinen túsiniikli.

6-súwrette kórsetilgendey tuwrı múyeshli paralelopipedtiń tuyıq beti arqalı maydannıń aǵısın qaraymız. Paralelopipedtiń eki qaptalı zaryadlangan tegislikke parallal

bolsın. Tek usı qaptalları ğana ağıs nolge teń bolmaydı. Sonlıqtan Gauss teoreması boyınsha

$$2SE = 4\pi e = 4\pi S\ddot{e}.$$

Bul jerde S qaptaldıń maydanı, \ddot{e} arqalı tegisliktiń maydan birligine sáykes keliwshi zaryad belgilengen (bunı zaryadtıń betlik tıǵızlıǵı dep ataymız). Solay etip

$$E = 4\pi\ddot{e}.$$

Biz sheksiz úlken tegisliktiń maydanınıń usı tegislikke shekemgi qashıqlıqtan ğárezli emes ekenligi kóremiz. Basqa sóz benen aytqanda zaryadlangan tegislik eki tárepinde de bir tekli maydan payda etedi. Al usınday tegisliktiń potencialı bolsa sol tegislikke shekemgi qashıqlıq r diń sıızıqlı funkciyası boladı:

$$- = -2\pi\ddot{e}x + \text{sonst.}$$

§ 22. Gravitaciyalıq maydan

Elektrlik tásir etisiw menen bir qatar tábiyatta *gravitaciyalıq tásirlesiw* úlken áhmiyetke iye. Gravitaciyalıq tásirlesiw denelerdiń elektrlik zaryadlarınan yamasa neytrallıǵınan ğárezsiz bolıp, bul tásirlesiw bárshe denelerge tán hám denelerdiń massaları boyınsha anıqlanadı. Gravitaciyalıq tásir etisiwdiń mánisi mınadan ibarat: barlıq deneler bir biri menen tartısađı, al tásir etisiw kúshi sol denelerdiń massalarınıń kóbeymesine tuwra proporcional.

Eger denelerdi materiallıq noqatlar dep qaraytuǵın bolsaq gravitaciyalıq tásir etisiw kúshi usı noqatlar arasındaqı qashıqlıqtıń kvadratına kerı proporcional, al olardıń massalarınıń kóbeymesine tuwra proporcional boladı. Denelerdiń massaların m_1 hám m_2 arqalı, al olar arasındaqı qashıqlıqta r arqalı belgilesek, onda usı eki dene arasındaqı gravitaciyalıq kúshti bılay jazamız:

$$\acute{G} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

Bul jerde G tásirlesiwshi denelerdiń tábiyatına baylanıslı emes universallıq proporcionallıq koefficienti. Minus belgisi \acute{G} kúshiniń tartısw kúshi ekenligin bildiredi. Jazılǵan formula *Nyutonnıń tartılıs nızamın* ańlatadı.

G shaması *gravitaciyalıq turaqlı* dep ataladı. Joqarıda jazılǵan formula boyınsha G shamasınıń massaları 1 g bolǵan deneler bir birinen 1 sm qashıqlıqta turǵandaǵı gravitaciyalıq tartısw kúshi ekenligi kórinip tur. Gravitaciyalıq turaqlı tómendegidey ólshemge iye:

$$[G] = \frac{[F][r]^2}{[m]^2} = \frac{(g \cdot \text{sm} \cdot \text{sek}^{-2}) \text{sm}^2}{g^2} = \frac{\text{sm}^3}{g \cdot \text{sek}^2}$$

hám

$$G = 6.67910^{-8} \frac{\text{sm}^3}{g \cdot \text{sek}^2}.$$

G nıń júdá kishi mánisi tek massalar úlken bolǵanda ğana gravitaciyalıq kúshlerdiń shamasınıń sezilerliktey bolatuǵınlıǵın kórsetedi. Usınday sebeplerge baylanıslı gravitaciyalıq tásirlesiw atomlar menen molekularardıń mexanikasında hesh qanday áhmiyetke iye bolmaydı. Massanıń ósiwi menen gravitaciyalıq tásirlesiwdiń tutqan ornınıń áhmiyeti joqarılaydı hám Ay, planetalar hám basqa da aspan deneleriniń qozǵalısları tolıǵı menen gravitaciyalıq kúshler tárepinen anıqlanadı.

Nyutonnıń tartılıs nızamınıń matematikalıq jazılıwı noqatlıq zaryadlar ushın Kulon nızamınıń matematikalıq jazılıwı menen uqsas. Gravitaciyalıq kúsh te, elektrlik kúsh te materiallıq noqatlar arasındaǵı qashıqlıqtıń kvadratına keri proporcional. Gravitaciyalıq tásirlesiwdegi massanıń ornında elektrlik tásirlesiwde zaryad turadı. Biraq zaryadlardıń belgisine ǵárezli tartılıs da, iytirisiw de kúshi bolıp tabılatuǵın elektrlik kúshlerden parqı, gravitaciyalıq kúshler barlıq waqıtta da tartılıs kúshleri bolıp tabıladı.

Kulon nızamındaǵı proporcionallıq koefficientin biz birge teń etip aldıq hám usınday jollar menen zaryadtıń birligin saylap aldıq. Nyutonnıń tartılıs nızamında da usınday jol menen júriwimiz múmkin. Gravitaciyalıq turaqlını birge teń etip alıp massa ushın bazı bir birlikti alǵan bolar edik. Álbette bul birlik *sm* hám *sek* larǵa salıstırǵanda tuwındı birlik bolıp shıqqan hám massanıń ólshemi $\frac{\text{sm}^3}{\text{sek}^2}$ bolar edi. Massası massanıń bunday jańa birligine teń bolǵan dene 1 *sm* qashıqlıqta turǵan tap sonday denege 1 $\frac{\text{sm}}{\text{sek}^2}$ tezleniw beredi. Massanıń usınday birligi μ arqalı belgilep biz bılayınsha jazamız:

$$G = 6.67910^{-8} \frac{\text{sm}^3}{g \cdot \text{sek}^2} = 1 \frac{\text{sm}^3}{\mu \cdot \text{sek}^2}.$$

Bunnan $\mu = 1.5910^7 g = 15$ tonna. Bul birliktiń qolaysız ekenligi túsinikli hám sonlıqtan ol qollanılmaydı. Biraq biz principinde birden bir ıqtıyarlı birlikler uzınlıq penen waqıt bolǵan birlikler sistemasın dúziwdiń múmkin ekenligin kórdik. Bunday jaǵdayda basqa shamalar ushın (massa ushın da) tuwındı birlikler dúziledi. Birliklerdiń usınday sisteması praktikada qollanılmaylı, biraq sonday sistemanı dúziwdiń múmkinshiligi SGS sistemasınıń shártli túrde saylap alınǵanlıǵın jáne bir ret kórsetedi.

Gravitaciyalıq tásirlesiwdegi kúsh ushın arlatpaǵa iye bola otırıp onıń potencial energiyası U dı ańsat anıqlawǵa boladı. Haqıyqatında da U menen \acute{G} ti baylanıstıratuǵın

$$-\frac{dU}{dr} = \acute{G} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

ulıwmalıq qatnasın jazıp

$$U = -G \frac{m_1 m_2}{r}$$

ekenligi alamız. Biz bul jerde sheksiz úlken qashıqlıqta potencial energiyanı nolge teń dep alıp ıqtıyarlı turaqlı qosılıwshını nolge teńedik. Bul alınǵan formula elektrlik tásirlesiwdegi potencial energiya ushın jazılǵan

$$U = \frac{e_1 e_2}{r}$$

formulasına uqsas.

Biz joqarıda eki materiallıq noqattıń gravitaciyalıq tásirlesiwdegi kúsh hám potencial energiyalar ushın formulalardı jazdıq. Bul formulalar eger ara qashıqlıqları ólshemlerinen ádewir úlken bolǵan qálegen formadaǵı deneler ushın durıs. Al sferalıq formaǵa iye deneler jaǵdayında jazılǵan formulalar qálegen qashıqlıqlar ushın durıs boladı (bunday jaǵdayda r sferalardıń orayları arasındaǵı qashıqlıqqa teń).

Bólekshege tásir etiwshi kúshtiń usı bóleksheniń massasına tuwrı proporcionallıǵı elektr maydanındaǵıday *gravitaciyalıq maydannıń kernewliligi* haqqındaǵı túsinikti kirgiziwge múmkinshilik beredi. Massası m bolǵan denege tásir etiwshi \acute{G} kúshin bılayınsha kóz aldımızǵa keltiremiz:

$$\acute{G} = mg.$$

Bul jerde g arqalı maydandı payda etiwshi denelerdiń massalarınan hám óz-ara ornalasıwlarınan ǵárezli bolǵan maydannıń kernewliligi belgilengen.

Gravitaciýalıq maydan matematikalıq jaqtan elektr maydanınıń Kulon nızamını uqsas Nyutonniń nızamına baǵınatuǵın bolǵanlıqtan gravitaciýalıq maydan ushın da Gauss teoreması durıs boladı. Bul jerdegi ayırma sonnan ibarat, Kulon nızamındaǵı zaryadtıń ornına massanıń gravitaciýalıq turaqlıǵa kóbeymesi turadı. Solay etip tuyıq bet boyınsha gravitaciýalıq maydanniń aǵısı $-4\pi mG$ ǵa teń bolıp. Bul jerde m arqalı bettiń ishindegi barlıq massalardıń qosındısı belgilengen; minus belgisi tartısıw kúshiniń tartısıw xarakterine iye bolıwınıń saldarınan payda bolǵan.

Usı teoremadan paydalanıp, mısalı, bir tekli shardıń ishindegi gravitaciýalıq maydanniń kernewliligini anıqlaw múmkin. Bul másele 21-paragrafta gáp etilgen bir tekli zaryadlangan shar haqqındaǵı máselege sáykes keledi. Sol jerde alınǵan nátiyjelerdi paydalanıp dárhál bilayınsha jaza alamız:

$$g = -\frac{4\pi}{3}G\rho r.$$

Bul jerde ρ arqalı shardıń massasınıń tıǵızlıǵı belgilengen.

Jer betiniń qasındaǵı tartılıs kúshin *deneniń salmaǵı* dep ataydı (onı R arqalı belgileymiz). Deneden Jerdiń orayına shekemgi qashıqlıqtı $R + z$ arqalı belgileymiz (R Jerdiń radiusı, z deneniń Jer betinen biyikligi). Eger deneniń biyikligi z Jerdiń radiusı R den salıstırmas dárejede kishi bolsa, onda z ti esapqa almawǵa boladı hám deneniń salmaǵı

$$R = G\frac{mM}{r^2},$$

bul jerde M arqalı Jerdiń massası belgilengen.

Eger bul formulanı

$$R = mg$$

túrinde jazsaq

$$g = -\frac{GM}{R^2}.$$

Bul jaǵdaydaǵı g turaqlı shamasın *salmaq kúshiniń tezleniwi* dep ataydı. Bul Jerdiń tartılıs maydanındaǵı *erkin túsiwdegi tezleniwge* (*erkin túsiw tezleniwi* dep te ataymız) teń.

Salmaq kúshi turaqlı dep esaplanatuǵın anıq bir z biyikligindegi deneniń potencial energiyası

$$U = Rz = mgz$$

formulası menen ańlatıladı. Bul bir tekli maydandaǵı potencial energiya ushın 10-paragrafta alınǵan formuladan kórinip tur. Bul jaǵdayda kúsh tómenge, yaǵnıy z tiń kemeyiw baǵıtına qaray baǵıtlangan.

Haqıyqatında salmaq kúshi tezleniw g Jer betiniń hár qıylı noqatlarında hár qıylı. Sebebi Jer dál sferalıq formaǵa iye emes. Bunnan basqa mınalardı da eske alıw kerek: Jerdiń óz kósheri dógeriginde aylanıwınıń saldarınan denegе salmaq kúshine qarama-qarsı baǵıtta oraydan qashıwshı kúsh te tásir etedi. Sonlıqtan biziń túsiniklerimizge qosımsha salmaq kúshiniń effektivlik tezleniwin kirgiziwimiz kerek. Bul tezleniwdiń mánisi gipotezalıq tınısh turǵan Jerdegi tezleniwden kishi boladı. Jer polyuslarında bul tezleniw $g = 983.2 \frac{\text{sm}}{\text{sek}^2}$, al ekvatorıda $g = 978.0 \frac{\text{sm}}{\text{sek}^2}$.

Geypara jaǵdaylarda g fizikalıq shamalardıń birliklerin anıqlawda qatnasadı (mısalı kúштиń hám jumıstıń birliklerin anıqlawda). Bunday maqsetlerde standart mánisi bolǵan

$$g = 980.665 \frac{\text{sm}}{\text{sek}^2}$$

mánisinen paydalanadı. Salmaq kúshiniń tezleniw bolǵan g nıń bunday mánisi 45° keńislikte alınadı.

§ 23. Ekvivalentlik principi

Tartılıs kúshiniń usı kúsh tásir etetuǵın bóleksheniń massasına proporcionallıǵı ($G=mg$) oǵada tereń fizikalıq mániske iye.

Bólekshe tárepinen alınatuǵın tezleniw usı bólekshege tásir etiwshi kúshti bóleksheniń massasına bólgenge teń bolǵanlıqtan gravitaciyalıq maydandaǵı bóleksheniń tezleniw w usı maydannıń kernewliligi menen sáykes keledi:

$$w = g,$$

yaǵnıy bóleksheniń massasınan ǵárezli emes. Basqa sóz benen aytqanda gravitaciyalıq maydan oǵada áhmiyetli qásiyetke iye boladı: bunday maydanda barlıq deneler massalarınan ǵárezsiz birdey tezleniw aladı (bul qásiyet birinshi ret Galiley tárepinen Jerdiń salmaq maydanındaǵı denelerdiń qulap túsiwin izertlewdiń nátiyjesinde anıqlandı).

Denelerdiń tap sol sıyaqlı qásiyetin eger olardıń qozǵalısların inercial emes esaplaw sisteması kóz-qarasında qaraǵanda sırtqı kúshler tásir etpeytuǵın keńislikte de baqlaǵan bolar edik. Juldızlar aralıq keńislikte erkin qozǵalatuǵın raketanı kóz aldımızǵa keltireyik. Bunday jaǵdaylarda raketaǵa tásir etetuǵın tartısıw kúshlerin esapqa almawǵa boladı. Usınday raketanıń ishindegi barlıq deneler raketanıń ózine salıstırǵanda qozǵalmay tınıshlıqta turǵan bolar edi (raketanıń ortasında hesh nársege tiymey-aq tınıshlıqta turǵan bolar edi). Eger raketa w tezleniw menen qozǵala baslasa barlıq deneler raketanıń artına qaray $-w$ tezleniw menen "qulap" túser edi. Raketanıń ishindegi deneler raketanıń tezleniwsiz-aq, biraq kernewliligi $-w$ ǵa teń bolǵan gravitaciyalıq maydanda qozǵalǵanda da $-w$ tezleniw menen tap joqarıdaǵıday taqlette "qulaǵan" bolar edi. *esh bir eksperiment biziń tezleniwshi raketada yamasa turaqlı gravitaciyalıq maydanda turǵanıımızdı ayıra almaǵan bolar edi.

Denelerdiń gravitaciyalıq maydan menen inercial emes esaplaw sistemasındaǵı qásiyetleri arasındaǵı uqsaslıq *ekvivalentlik principi* dep atalatuǵın principtiń mazmunın quraydı (bul uqsaslıqtıń fundamentallıq mánisi salıstırmalıq teoriyasına tiykarlanǵan tartılıs teoriyasında túsindiriledi).

Joqarıdaǵı bayanlawdıń barısında tartılıs maydanınan erkin bolǵan keńislikte qozǵalatuǵın raketa haqqında gáp ettik. Bul talqılawlardı, mısalı, Jerdiń gravitaciyalıq maydanında qozǵalıwshı raketanı qaraw arqalı dawam ettiriwimiz múmkin. Usınday maydanda "erkin" (yaǵnıy dvigatelsiz) qozǵalatuǵın raketa maydannıń kernewliligi g ǵa teń bolǵan tezleniw aladı. Bunday jaǵdayda raketa inercial emes esaplaw sisteması bolıp tabıladı. Bul jaǵdayda raketaǵa salıstırǵandaǵı qozǵalısqı inercial emesliktiń tásinin tartılıs maydanınıń tásiiri kompensaciyalaydı. Nátiyjede "salmaqsızlıq" halı júzege keledi, yaǵnıy raketadaǵı predmetler tartılıs maydanı joq jaǵdaydaǵı inercial esaplaw sistemasında qozǵalǵanday bolıp qozǵaladı. Solay etip saylap alınǵan inercial emes esaplaw sistemasın saylap alıw arqalı (biz qaraǵan jaǵdayda tezleniw menen qozǵalıwshı raketaǵa salıstırǵanda) gravitaciyalıq maydandı "joq" qılıw múmkin. Bul jaǵday sol ekvivalentlik principiniń basqa aspekti bolıp tabıladı.

Tezleniwshi qozǵalıstaǵı raketanıń ishindegi tartılıs maydanı bir tekli, yaǵnıy raketanıń ishindegi barlıq orınlarda kernewlilik w birdey mániske iye. Biraq usıǵan qaramastan

haqıyqıy gravitaciya maydanı barlıq waqıtta bir tekli emes. Sonlıqtan inercial emes esaplaw sistemalarına ótiw arqalı gravitaciyalıq maydandı joq etiw maydan júdá kishi ózgeriske ushıraytuǵın keńisliktiń úlken emes bólimlerinde ámelge asırıladı. Bunday mániste gravitaciyalıq maydan menen inercial emes esaplaw sistemasınıń ekvivalentligi "jergilikli" ("lokallıq") xarakterge iye.

§ 24. Kepler qozǵalı

Bir birine Nyutonniń tartılıs nızamı boyınsha tartısatuǵın eki deneniń qozǵalısqın qaraymız. Denelerdiń birewiniń massası M ekinshi deneniń massası m nen ádewir úlken dep boljaymız. Eger usı eki dene arasındaqı qashıqlıq r sol denelerdiń ólshemlerinen úlken bolsa, onda biz m materiallıq noqatınıń qozǵalmaytuǵın M noqatı payda etken oraylıq gravitaciyalıq maydanındaqı qozǵalısqı haqqındaqı máselege iye bolamız.

Orayı maydannıń orayında bolǵan (yaǵnıy M denesiniń orayında) sheńber boyınsha teń ólshemli qozǵalısqı bunday maydandaqı eń ápiwayı qozǵalısqı bolıp esaplanadı. Bunday jaǵdayda tezleniw (bizler tezleniwdiń v^2/r ge teń ekenligin bilemiz, v arqalı m noqatınıń tezligi belgilengen) orayǵa qaray baǵıtlanǵan. Eger usı tezleniwdi m ge kóbeytsek bólekshege M massalı dene tárepinen tásir etetuǵın kúshti alamız:

$$\frac{mv^2}{r} = G \frac{mM}{r^2}.$$

Bunnan

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}.$$

Bul formulanı paydalanıp Jer dógereginde aylanıp júrgen Jerdiń jasalma joldasınıń tezligin tabıw múmkin. Bul jaǵdayda r di Jerdiń radiusı R menen almastırıp, $\frac{GM}{R^2}$ tıń salmaq kúshiniń tezleniwi g ekenligi eske túsirsek Jerdiń jasalma joldası ushın (sputnik ushın) ańlatpa alamız (*birinshi kosmoslıq tezlik* dep atalatuǵın tezlikti tabamız):

$$v_1 = \sqrt{\frac{GM}{R}} = \sqrt{gR}.$$

Bul ańlatpaǵa $g = 980 \frac{cm}{sek^2}$, $R = 6500 \text{ km}$ mánislerin qoysaq $v_1 = 8 \frac{km}{sek}$ ekenligine iye bolamız.

Tezlik v ushın alınǵan formula orbitanıń radiusı r hám aylanıw dáwiri T arasındaqı qatnastı anıqlawǵa múmkinshilik beredi.

$$v = \frac{2\pi r}{T}$$

dep esaplap

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} r^3.$$

Biz bul jerde aylanıw dáwiriniń kvadratınıń orbita radiusınıń kubına proporcional ekenligin kóremiz. Bunday qatnas *Keplerdiń úshinshi nızamı* dep ataladı (astronom I. Kepler XVII ásirdiń basında planetalardıń qozǵalısqın baqlaw arqalı gravitaciyalıq tásiresiwdiń saldarınan eki deneniń qozǵalısqınıń tiykarǵı nızamların ashtı, bunday qozǵalısqırdı Kepler qozǵalısqıları dep ataydı). Bul nızamlar (oraylıq maydandaqı qozǵalıstaqı sektorlıq tezliktiń turaqlılıǵı nızamı 16-paragrafta qaraldı hám ol Keplerdiń ekinshi nızamı dep ataladı). Nyuton tárepinen pútkil dúnyalıq tartılıs nızamınıń ashılıwında áhmiyetli orın tuttı.

Endi massası m bolğan bóleksheniń energiyasın anıqlaymız. Bizlerdiń biliwimizshe onıń potencial energiyası

$$U = -\frac{GMm}{r}.$$

U ға $\frac{mv^2}{2}$ kinetikalıq energiyanı qosıp waqıt boyınsha ózgermeytuǵın bóleksheniń tolıq energiyasın alamız:

$$E = \frac{mv^2}{2} - \frac{GMm}{r}.$$

Sheńber boyınsha qozǵalǵanda

$$mv^2 = \frac{GMm}{r}$$

hám sonlıqtan

$$E = -\frac{mv^2}{2} = -\frac{GMm}{2r}.$$

Bul jerde biz sheńber boyınsha qozǵalǵanda bóleksheniń tolıq energiyasınıń teris mániske iye bolatuǵınlıǵın kóremiz. Bul 13-paragrafta alınǵan nátiyjeler menen tolıq sáykes keledi (eger sheksizlikte potencial energiya nolge teń bolsa, onda $E < 0$ de qozǵalıw finitlik, al $E > 0$ de qozǵalıw infinitlik boladı degen nátiyje).

Biz

$$\acute{G} = G \frac{mM}{r^2}$$

tartısıw kúshiniń tásirindegi ápiwayı sheńber tárizli qozǵalıstı qaradıq. biraq bunday maydanda bólekshe ellips, giperbola hám parabola tárizli orbitalar boyınsha da qozǵala aladı. Bul konuslıq kese-kesimlerdiń barlıǵı ushın fokuslardıń biri (parabola ushın birden bir fokus) kúshlerdiń orayında jaylasadı (*Keplerdiń birinshi nızamınıń* mazmunı usınnan ibarat). Ellips tárizli orbitalar ushın tolıq energiyasınıń teris mánisi sáykes keledi $E < 0$ (bul jaǵdayda qozǵalıw finitlik). Giperbolalıq orbitalarǵa tolıq energiyasınıń oń mánisi sáykes keledi ($E > 0$). Parabola tárizli orbita boyınsha qozǵalǵanda $E = 0$. Bunday jaǵdayda sheksizliktegi bóleksheniń tezligi nolge teń boldı.

Bóleksheniń tolıq energiyası ushın jazılǵan formulanı paydalanıp sputniktiń parabolalıq orbita boyınsha qozǵalıwı ushın (yaǵnıy sputniktiń Jerdiń tartısınan shıǵıp ketiwi ushın) zárúrli bolǵan minimallıq tezliktiń mánisin esaplaw múmkin.

$$E = \frac{mv^2}{2} - \frac{GMm}{r}$$

formulasında $r = R$ dep esaplap hám E ni nolge teńep *ekinshi kosmoslıq tezlik* dep atalatuǵın tezlikti alamız:

$$v_2 = \sqrt{2 \frac{GM}{R}} = \sqrt{2gR}.$$

Birinshi kosmoslıq tezlik ushın jazılǵan formula menen salıstırıw mınanı kórsetedi:

$$v_2 = \sqrt{2}v_1 = 11.2 \frac{\text{km}}{\text{sek}}.$$

Endi ellips tárizli orbitalardıń parametrleriniń qalay anıqlanatuǵınlıǵın kórsetemiz. Sheńber tárizli orbitanıń radiusın bóleksheniń energiyası arqalı ańlatıw múmkin:

$$R = \frac{\alpha}{2|E|}.$$

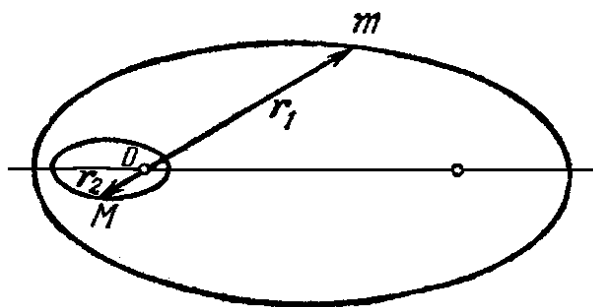
Bul jerde $\alpha = GmM$ belgilewi qabıl etilgen. Ellips tárizli orbita boyınsha qozǵalǵanda ellipstıń úlken yarım kósheri a da tap sonday formula boyınsha anıqlanadı:

$$a = \frac{\alpha}{2|E|}.$$

Al kishi yarım kósher b tek energiyaǵa emes, al moment L ge de ǵárezli:

$$b = \frac{L}{\sqrt{2m|E|}}.$$

L qanshama kishi bolsa ellips te sonshama sozilğan boladı (turaqlı energiyanıń mánisinde).



7-сүӱр

Ellips boyınsha aylanıw dáwiri tek energiyaǵan gárezli bolıp ellipstıń úlken yarım kósheri arqalı ańlatıladı:

$$T^2 = \frac{4\pi^2 m}{\alpha} a^3.$$

Usı waqıtqa shekem bir deneniń massası M ekinshi deneniń massası m nen ádewir úlken bolğan jaǵdaydı qaradıq. Sonlıqtan M massalı deneni qozǵalmaydı dep esapladıq. Haqıyqatında eki dene de qozǵaladı. Qala berse inerciya orayı sistemasında eki dene de geometriyalıq jaqtan bir birine uqsas bolğan inerciya orayında ulıwmalıq fokusqa iye konuslıq kese-kesimlerge sáykes keliwshi orbitalar boyınsha qozǵaladı. 7-sızılmaǵa ólshemleri denelerdiń massalarına keri proporcional bolğan geometriyalıq jaqtan bir birine uqsas ellipsler kórsetilgen. Joqarıda jazılğan a hám b yarım kósherleri ushın jazılğan ańlatpalar "keltirilgen" bólekshelerdiń traektoriyasına tiyisli bolıp, tek olardıǵı m di

$$\mu = \frac{mM}{m+M}$$

ge almastırıw kerek. Al α nıń mánisi burınǵısınsha qaladı ($\alpha = GmM$).

III Bap. Qattı deneniń qozǵalıǵı

§ 25. Qattı deneniń qozǵalıǵınıń túrleri

Usı waqıtlarǵa shekem berilgen jaǵdaylarda materiallıq noqat dep qarawǵa bolatuǵın denelerdiń qozǵalıǵın kórdik. Endi shekli ólshemleri áhmiyetli bolğan denelerdiń qozǵalıǵın kóremiz. Bunday jaǵdayda denelerdi *qattı deneler* dep qaraymız. Mexanikada qattı dene dep qozǵalıstıń barısında bóleksheleriniń arasındaǵı qashıqlıqlar ózgermeytuǵın denegе aytadı. Qozǵalısta bunday dene birden bir pútin túrinde qaladı.

Qattı deneniń qozǵalıstıń barısında óz-ózine parallel bolıp qalatuǵın qozǵalıǵı eń ápiwayı qozǵalıǵı bolıp tabıladı. Bunday qozǵalıǵı *ilgerilemeli qozǵalıǵı* dep ataladı. Mısalı kompastı gorizontallıq tegislik boyınsha áste aqırın qozǵaltatuǵın bolsaq, onda onıń strelkası túslikten arqaǵa qaray barlıq waqıtta da baǵıtın saqlap ilgerilemeli qozǵaladı.

Qattı deneniń ilgerilemeli qozǵalıǵında onıń barlıq noqatları birdey tezlikke, bir birinen bazı bir aralıqlarǵa awısқан birdey formadaǵı traektoriyalarǵa iye boladı.

Qattı deneniń basqa túrdegi ápiwayı qozǵalıǵı deneniń kósher dógeregindegi aylanısı bolıp tabıladı. Aylanıw barısında deneniń hár qıylı noqatları aylanıw kósherine perpendikulyar bolğan tegisliklerde sheńberler sızadı.

Eger dt waqıtı ishinde dene $d\phi$ múyeshine burılatuǵın bolsa, onda deneniń qanday da bir R noqatı júrip ótetuǵın jol $ds = r d\phi$. Bul ańlatpada r arqalı R noqatınan aylanıw kósherine shekemgi aralıq belgilengen. R noqatınıń tezligi v nı ds ti dt ǵa bólip tabamız:

$$v = r \frac{d\phi}{dt}$$

$\frac{d\phi}{dt}$ shaması deneniń barlıq noqatları ushın birdey hám deneniń waqıt birligindegi múyeshlik awısıwın beredi. Bul shama deneniń múyeshlik tezligi dep ataladı hám onı Ω arqalı belgileyemiz.

Solay etip bazı bir kósher dógeresinde aylanıwshı deneniń hár qıylı noqatlarınıń tezlikleri mına formula menen anıqlanadı eken:

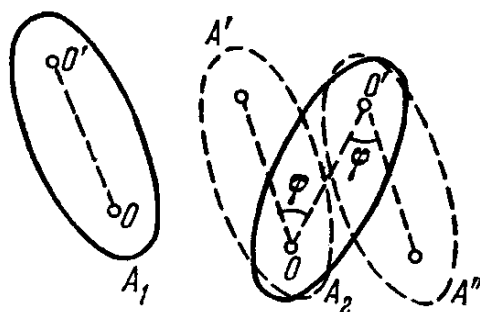
$$v = r\Omega.$$

Bul jerde r arqalı noqattan aylanıw kósherine shekemgi qashıqlıq; tezlik usı qashıqlıqqa tuwrı proporcional.

Ulıwma jaǵdaylarda Ω waqıttıń ótiwi menen ózgeredi. Eger aylanıw teń ólshewli ózgeretuǵın bolsa (yaǵnıy turaqlı múyeshlik tezlik penen), onda aylanıw dáwiri T nı bile otırıp minanı alamız:

$$\Omega = \frac{2\pi}{T}.$$

Qattı deneniń aylanıwı aylanıw kósheriniń baǵıtı hám múyeshlik tezliktiń shaması menen xarakterlenedi. Usı ayılǵanlardı múyeshlik tezlik vektorı Ω shamasın kirgiziw menen biriktiriw múmkin. Bul vektordıń baǵıtı aylanıw kósheriniń baǵıtına sáykes keledi, al san shaması múyeshlik tezliktiń mánisine teń. aylanıw kósheriniń eki baǵıtınan bir baǵıttı saylap alıw tómendegishe boladı: qattı dene menen birlikte aylanatuǵın vintti kóz aldımızǵa keltiremiz, usınday jaǵdayda vinttiń alǵa jılıw baǵıtı Ω vektorınıń baǵıtına sáykes keledi.



1-сүрет

Joqarıda qarap shıǵılǵan qattı deneniń qozǵalıwınıń ápiwayı túrleri (ilgerilemeli hám aylanbalı) ayırıqsha áhmiyetke iye. Sebebi qattı deneniń qálegen qozǵalıwı sol qozǵalıslarǵa alıp kelinedi.

Bunı bazı bir tegislikke parallel qozǵalatuǵın deneniń mısasında kórsetiw múmkin. Deneniń izbe-iz A_1 hám A_2 awhalların qaraymız. A_1 awhalınan A_2 awhalına deneni bılayınsha ótkeremiz: dáslep deneni A_1 awhalınan A' awhalına parallel kóshiriw menen alıp kelemiz. Usınday jaǵdayda deneniń qanday da bir O noqatı óziniń eń keyingi awhalına keledi. Eger usınnan keyin deneni O noqatınıń dógeresinde belgili bir - múyeshine bursaq, onda dene óziniń aqırǵı A_2 awhalına kelip jetedi.

Demek deneniń ulıwmalıq orın almasıwı deneni A_1 noqatınan A' noqatına kóshiriwshı ilgerilemeli qozǵalıstan hám O noqatındaǵı burıwdıń nátiyjesinde A' awhalınan aqırǵı A_2 awhalına ótkeretuǵın burıwdan turatuǵınlıǵın biz kórdik. O noqatınıń

pútkilley iqtıyarlı túrde alıńanlǵın biz kórdik: A_1 awhalınan deneni A'' awhalına parallel kúshiriw múmkin. Bunday jaǵdayda O' noqatı (O noqatı emes) óziniń aqırǵı awhalına kelip jetedi hám deneniń aqırǵı A_2 awhalına kelip jetiwi ushın usı O' noqatınıń dógeresinde deneni buriw kerek boladı. Biraq O noqatınıń dógeresinde A_2 awhalına ótkeriw ushın deneni qanday múyeshke buriw kerek bolǵan bolsa O' noqatınıń dógeresinde de deneni tap sonday múyeshke buriw kerek boladı; al O hám O' noqatlarınıń ilgerilemeli qozǵalıısında ótken jolları hár qıylı.

Joqarıda keltirilgen mısallarda qattı deneniń iqtıyarlı qozǵalıısın usı qattı denede alıńan O noqatınıń ilgerilemeli qozǵalıısı hám usı noqat arqalı ótiwshi kósher dógeresindegi aylanbalı qozǵalıstıń qosındısı túrindey qarawdıń múmkin ekenligin kórsetedi. Haqıyqatında bul jaǵday ulıwmalıq qaǵıyda bolıp tabıladı. Bul jaǵdayda ilgerilemeli qozǵalıstıń tezligi (onı V hárıpi menen belgileymiz) deneniń qaysı noqatınıń tiykarǵı noqat etip qabıl etilgenligine baylanıslı. Al múyeshlik tezlik Ω bolsa bunday saylap alıwdan gárezli emes: O noqatın qay orında saylap alsaq ta usı noqat arqalı ótetuǵın kósher bir baǵıtqa iye boladı hám usı kósher dógeresinde aylanıwdıń múyeshlik tezligi Ω birdey mániske iye boladı. Bunday mániste Ω múyeshlik tezlikti absolyut mániske iye boladı dep esaplawǵa boladı. Demek qattı deneniń aylanıwın táriyiplegende aylanıw kósheriniń qaysı noqattan ótetuǵınlıǵı áhmiyetke iye emes degen sóz. Al ilgerilemeli tezligi bolsa bunday absolyut xarakterge iye emes.

!dette "tiykarǵı" O noqatın saylap alǵanda deneniń inerciya orayın saylap aladı. Bunday jaǵdaydaǵı ilgerilemeli tezlik V bolsa inerciya orayınıń tezligi bolıp tabıladı. Usınday etip saylap alıwdıń basqa túrde saylap alıwlardan artıqmashlıǵı kelesi paragrafta ayqınlasadı.

V hám Ω vektorlarınıń hár qaysısınıń mánisleri óziniń qurawshıları arqalı beriledi (bazı bir koordinatar sistemasına qarata alıńan qurawshılar haqqında ayılıp atır). Sonıń ushın qattı deneniń qálegen noqatınıń tezligin biliw ushın bir birinen gárezsiz altı shamanıń beriliwi kerek. Usınday tiykarda qattı deneni altı erkinlik dárejesine iye mexanikalıq sistema túrinde qaraladı.

§ 26. Qozǵalıwshı qattı deneniń energiyası

Ilgerilemeli qozǵalatuǵın qattı deneniń kinetikalıq energiyası júdá ápiwayı túrde alınadı. Bunday qozǵalısta deneniń barlıq noqatları birdey tezlikke iye bolatuǵın bolǵanlıqtan kinetikalıq energiya mınaǵan teń:

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2}MV^2.$$

Bul jerde V arqalı deneniń tezligi, al M arqalı onıń tolıq massası belgilengen. Bul ańlatpa massası M bolǵan V tezligi menen qozǵalıwshı materiallıq noqattıń kinetikalıq energiyası ushın jazılǵan ańlatpa menen birdey. Qattı deneniń ilgerilemeli qozǵalıısınıń materiallıq noqattıń qozǵalıısınan parqınıń joq ekenligi óz-ózinen túsiniikli.

Endi aylanıwshı deneniń kinetikalıq energiyasın anıqlayıq. Bul ushın deneni materiallıq noqatlar dep qarawǵa bolatuǵınday kishi elementar bólimlerge bólemiz. Eger i -elementtiń massası m_i , usı elementtiń aylanıw kósherinen qashıqlıǵı r_i bolsa, onda onıń tezligi $v_i = r_i\Omega$ ge teń (Ω arqalı deneniń múyeshlik tezligi belgilengen). Bul elementtiń kinetikalıq energiyası $\frac{1}{2}m_iv_i^2$ shamasına teń. Bunday energiyalardı bir birine qosıp shıǵıp deneniń kinetikalıq energiyasın alamız:

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 + \dots = \frac{1}{2}\Omega^2(m_1r_1^2 + m_2r_2^2 + \dots).$$

Qawsırma ishinde turgan qosındınıń mánisi qanday dene menen is alıp baratırǵanlıǵımızǵa (onıń formasına, ólshemlerine hám ondaǵı massanıń tarqalıwına) hám usı denedegi kósherdiń qalay ornasqanlıǵına ǵárezli. Qattı deneni hám saylap alınǵan kósherdi táriyipleytuǵın bul shama sol kósherge salıstırǵandaǵı deneniń *inerciya momenti* dep ataladı. Onı I arqalı belgileymiz:

$$I = m_1r_1^2 + m_2r_2^2 + \dots$$

Eger qattı dene tutas bolsa, onda onı sheksiz kishi mayda bólimlerge bólemiz: joqarıda jazılǵan formuladaǵı qosındı alıw bul jaǵdayda integrallawǵa ótedi. Mısal ushın orayı arqalı ótiwshi kósherge salıstırǵandaǵı massası M , radiusı R bolǵan tutas shardıń inerciya momentiniń $I = \frac{2}{5}MR^2$ qa, uzınlıǵı l bolǵan jıńshke sterjenniń inerciya momentiniń onıń ortası arqalı ótetuǵın kósherge salıstırǵandaǵı inerciya momentiniń $\frac{1}{12}Ml^2$ qa teń ekenligin atap ótemiz.

Solay etip aylanıwshı deneniń kinetikalıq energiyası mına túrde jazıladı eken:

$$E_{\text{kin}} = \frac{I\Omega^2}{2}.$$

Bul ańlatpa formal túrde ilgerilemeli qozǵalıstaǵı kinetikalıq energiyanıń ańlatpasına uqsas (ayırma sonnan ibarat, tezlik V nıń ornında múyeshlik tezlik Ω , al deneniń massasınıń ornında deneniń inerciya orayı tur). Bul jerde aylanbalı qozǵalıstaǵı inerciya momentiniń ilgerilemeli qozǵalıstaǵı massanıń ornın iyeleytuǵınlıǵın kóremiz.

blqtıyarlı túrde qozǵalıwshı qattı deneniń kinetikalıq energiyasın ilgerilemeli hám aylanbalı qozǵalıslardıń qosındısı túrinde kórsetiw múmkin (tiykargı O noqatın deneniń inerciya orayında alamız). Bunday jaǵdayda noqatlardıń inerciya orayına salıstırǵandaǵı aylanbalı qozǵalısları deneniń aylanbalı qozǵalısları bolıp tabıladı. Olay bolsa 12-paragraftaǵı qarap ótilgendey bóleksheler sistemasınıń qozǵalısların ekige bólemiz: birinshisi sistemaniń tutası menen alǵandaǵı qozǵalısları, ekinshisi bólekshelerdiń inerciya orayına salıstırǵandaǵı qozǵalısları. Sol paragrafta sistemaniń energiyasınıń da eki bólimge bólinetuǵınlıǵın kórdik. "Ishki" qozǵalıslar ornın deneniń inerciya orayına salıstırǵandaǵı qozǵalısları iyeleydi. Sonlıqtan iqtıyarlı túrde qozǵalıwshı qattı deneniń kinetikalıq energiyası ushın tómendegidey ańlatpanı jazamız:

$$E_{\text{kin}} = \frac{MV^2}{2} + \frac{I_0\Omega^2}{2}.$$

"0" indeksi arqalı inerciya orayı arqalı ótetuǵın kósherge salıstırǵanda alınǵan deneniń inerciya momenti ekenligin bildiredi [Deneniń qozǵalısların barısında aylanıw kósheri denede turaqlı túrde óziniń baǵıtın saqlaytuǵın bolsa usınday túrde jazılǵan formulaniń mániske iye bolatuǵınlıǵın atap ótemiz. Eger bunday bolmaǵanda inerciya momenti turaqlı shama bolıwdan qaladı hám waqıttıń hár bir momentinde hár qıylı kósherlerge salıstırǵanda inerciya momenti esaplanadı].

Inerciya orayı arqalı ótpeytuǵın Z kósheri dógereginde aylanıwshı qattı deneni qaraymız. Bunday qozǵalıstıń kinetikalıq energiyası $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2}I\Omega^2$, I arqalı Z kósherine salıstırǵandaǵı inerciya momenti belgilengen. Ekinshi tárepten bunday qozǵalıstı deneniń inerciya orayınıń tezligi V bolǵan ilgerilemeli qozǵalısları menen Z kósherine parallel bolǵan inerciya orayınan ótetuǵın kósher dógeregindegi Ω múyeshlik tezligindegi aylanbalı qozǵalıslarınan turatuǵın qozǵalıslar dep qarawǵa boladı. Eger a arqalı inerciya orayınan Z

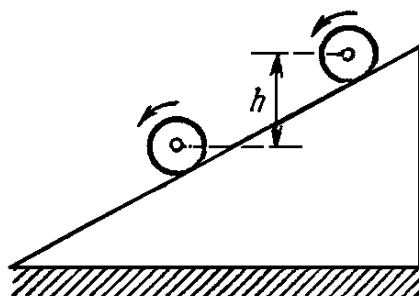
kósherine shekemgi aralıq belgilengen bolsa, onda onıń tezligi $V=a\Omega$. Sonlıqtan kinetikalıq energıyanı mına túrde jasa alamız:

$$E_{\text{kin}} = \frac{MV^2}{2} + \frac{I_0\Omega^2}{2} = \frac{1}{2} (Ma^2 + I_0)\Omega^2.$$

Eki ańlatpanı salıstırıp

$$I = I_0 + Ma^2$$

ańlatpasın alamız. Bul formula deneniń qanday da bir kósherge salıstırǵandaǵı inerciya momentin sol kósherge parallel hám inerciya orayı arqalı ótetuǵın basqa bir kósherge salıstırǵandaǵı inerciya momenti menen baylanıstıradı. I dıń I_0 den barlıq waqıtta úlken bolatuǵınlıǵı kórinip tur. Basqa sóz benen aytqanda berilgen baǵıttaǵı kósherge salıstırǵandaǵı inerciya momentiniń minimallıq mánisi inerciya orayı arqalı ótiwshi kósher ushın alınadı.



2-сүрет

Eger dene salmaq maydanında qozǵalatuǵın bolsa, onda onıń tolıq energıyası E potencial energıya menen kinetikalıq energıyalardıń qosındılarınan turadı. Mısal retinde shardıń qıya tegislik boyınsha qozǵalısnı qaraymız (2-súwret). SHardıń potencial energıyası Mgz ke teń, bul jerde M shardıń massası, z onıń orayınıń biyikligi. Sonlıqtan energıyanıń saqlanıw nızamı mınaday túrge iye boladı:

$$E = \frac{1}{2}MV^2 + \frac{1}{2}I_0\Omega^2 + Mgz = \text{const.}$$

SHar súykelissiz domalap túsedı dep esaplaymız. Onda onıń qıya tegislik penen tiyisetuǵın noqatınıń tezligi v nolge teń. Ekinshi tárepten bul tezlik tegislik boyınsha tómengen qaray shardıń tolıǵı menen tezligi V dan hám qarama-qarsı tárepke qarap baǵıtlanǵan (tegislik boyınsha joqarıǵa) shardıń orayına salıstırǵandaǵı tezliginen turatuǵın tezlikten turadı. Keyingi tezlik ΩR ge teń. $v = V - \Omega R = 0$ shártinen

$$\Omega = \frac{V}{R}.$$

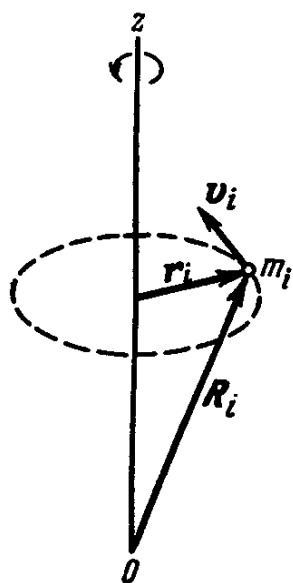
Bul ańlatpanı energıyanıń saqlanıw nızamına qoyamız hám waqıttıń baslanǵısh momentinde shardıń tezliginiń nolge teń ekenligin esapqa alamız. Sonıń nátiyjesinde shardıń inerciya orayınıń h aralıǵına túskendegi tezligin tabamız:

$$V = \sqrt{\frac{2gh}{1 + \frac{I_0}{MR^2}}}$$

Bul tezlik materiallıq bóleksheniń yamasa aylanbaytuǵın deneniń sonday h biyikliginen erkin túsiwindegi tezliginen kem (jaǵdaydıń bunday bolatuǵınlıǵın kútiw múmkin). Sebebi potencial energıyanıń kemeyiwi Mgh tek ǵana ilgerilemeli qozǵalıstı tezliginiń artıwına emes. al shardıń aylanısınıń kinetikalıq energıyasınıń ósiwine de jumsaladı.

§ 27. Aylanıw momenti

Deneniń aylanbalı qozǵalıında onıń impulsiniń momenti materiallıq noqat qozǵalǵandaǵı impulstıń ornın iyeleydi. Bekitilgen kósher dógerinde aylanıwshı dene jaǵdayında (bul eń ápiwayı jaǵday) usınday orındı usı kósher (bul kósherdi Z kósheri dep esaplaymız) boylap baǵıtlanǵan momenttiń qurawshısı iyeleydi. Bul shamanı esaplaw ushın deneni ayırım elementar bóleklerge bólemiz (kinetikalıq energiyanı esaplaǵandaǵı deneni elementar bóleklerge bólgenimizdey). Ayırım (i-) elementtiń impuls momenti $m_i[\mathbf{R}_i\mathbf{v}_i]$. Bul jerde \mathbf{R}_i arqalı Z kósheri boyındaǵı bazı bir O noqatınan esaplanǵan usı elementtiń radius-vektori belgilengen (3-súwret). Hár bir noqat aylanıw kósheri átirapında sheńber tárizli orbita boyınsha qozǵalatuǵın bolǵanlıqtan tezlik \mathbf{v}_i usı sheńberge túsilgen urınba baǵıtında baǵıtlanǵan.



3-сүрет

\mathbf{R}_i vektorın eki vektorga jikleymiz: birewi kósher baǵıtında, ekinshisi (\mathbf{r}_i) kósherge perpendikulyar. Bunday jaǵdayda $m_i[\mathbf{r}_i\mathbf{v}_i]$ kóbeymesi Z kósherine parallel bolǵan impuls momentin beredi (eki vektordıń vektorlıq kóbeymesiniń usı eki vektor jatqan tegislikke perpendikulyar ekenligin eske túsimiz). \mathbf{r}_i menen \mathbf{v}_i vektorları óz-ara perpendikulyar bolǵanlıqtan (sheńberdiń radiusı hám usı sheńberge túsilgen urınba) $[\mathbf{r}_i\mathbf{v}_i]$ kóbeymesi tek $r_i v_i$ bolıp tabıladı. Bul jerde r_i arqalı m_i elementiniń aylanıw kósherinen qashıqlıǵı belgilengen. Eń aqırında $v_i = \Omega r_i$ bolǵanlıqtan aylanıw kósheri baǵıtındaǵı impuls momentiniń $m_i r_i^2 \Omega$ ekenligine kóz jetkeremiz.

$$m_1 r_1^2 \Omega + m_2 r_2^2 \Omega + \dots$$

qosındısıń payda etip biz izlenip atırılǵan impulstıń tolıq momentiniń Z kósherine túsilgen L_z proekciyasın alamız. Bush shamanı *berilgen kósherge salıstırǵandaǵı impuls momenti* (yamasa *aylanıw momenti*) dep ataymız.

Qawsırma ishindegi ulıwmalıq Ω kóbeytiwshisin qawsırmadan shıǵarsaq biz inerciya momenti I ushın jazılǵan ańlatpanı alamız. Solay etip eń aqırında

$$L_z = I\Omega$$

ańlatpasın alamız, yaǵnıy deneniń aylanıw momenti múyeshlik tezlik penen aylanıw kósherine salıstırǵandaǵı deneniń inerciya momentiniń kóbeymesine teń. Usı ańlatpa menen bóleksheniń impulsı $m\mathbf{v}$ arasındaqı uqsaslıqqa kewil bólemiz: tezlik \mathbf{v} nıń ornında múyeshlik tezlik, al massanıń ornında inerciya momenti tur.

Eger denege sırtqı kúshler tásir etpese, deneniń aylanıw momenti turaqlı bolıp qaladı: dene inerciyası boyınsha turaqlı Ω múyeshlik penen aylanıwın dawam ete beredi. Ω nıń turaqlılıǵı L_z tiń turaqlılıǵına baylanıslı (yaǵnıy deneniń inerciya momentiniń ózgermesligine baylanıslı). Eger deneniń bólimleriniń óz-ara jaylasıwları ózgeriske ushıraytuǵın bolsa (sonıń menen birge inerciya momenti ózgeretuǵın bolsa), onda $I\Omega$ kóbeymesiniń turaqlı bolıp qalıwı ushın erkin aylanısta múyeshlik tezlik te ózgeriske ushıraydı. Misal ushın, eger súkelissiz aylanıp turǵan otırǵısha qollarında girleri bar adam otırǵan bolsa hám bul adam qolların qaptallarına sozıp óziniń inerciya momentin

úlkeytedi; bunday jaǵdayda $I\Omega$ kóbeymesiniń turaqlılıǵı aylanıstırnıń múyeshlik tezligin kemeytedi.

§ 28. Aylanıwshı deneniń qozǵalıstı teńlemesi

Bizler materiallıq noqattırnıń qozǵalıstı teńlemesiniń onıń tezliginiń ózgeriw tezligi menen oǵan tásir etetuǵın kúshti baylanıstıratuǵınlıǵın bilemiz (7-paragraf). Qattı deneniń ilgerilemeli qozǵalıstı materiallıq noqattırnıń qozǵalıstınan parqı az hám bunday qozǵalıstırnı teńlemesi tolıq impuls $\mathbf{R} = M\mathbf{V}$ penen oǵan tásir etiwshı tolıq kúsh \mathbf{G} ti bılayınsha baylanıstıradı:

$$\frac{d\mathbf{P}}{dt} = M \frac{d\mathbf{V}}{dt} = \mathbf{G}.$$

Aylanbalı qozǵalıstı ushın usınday orındı deneniń impuls momentiniń ózgeriw tezligin usı denegge tásir etiwshı kúshtiń momenti menen baylanıstıratuǵın teńleme iyeleydi. Bunday baylanıstırnı qanday bolatuǵınlıǵın kóremiz hám bul jaǵdayda da bekitilgen kósher dógeregindegi aylanıstı qaraw menen sheklenemiz (Z kósheri).

Aylanıw kósherine salıstırǵandaǵı deneniń impuls momentin biz anıqladıq. Endi denegge tásir etiwshı kúshlerge kewil bólemiz. Aylanıw kósherine parallel bolǵan kúshlerdiń tek ǵana deneni usı kósher baǵıtında ısırwı múmkin, biraq deneni aylandıra almaydı. Sonlıqtan biz bunday kúshlerdi itibarǵa almaymız hám tek aylanıw kósherine perpendikulyar bolǵan tegislikte jatqan kúshlerdi ǵana inabatqa alamız.

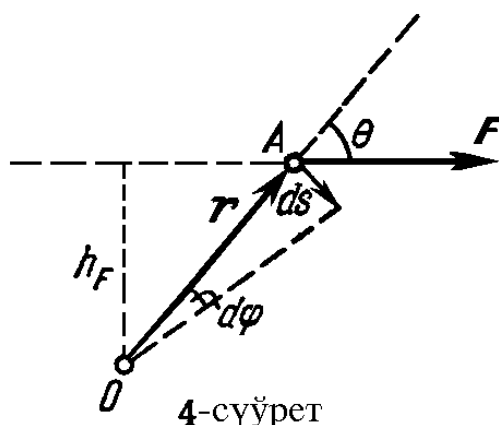
Z kósherine salıstırǵandaǵı usınday \mathbf{G} kúshiniń momenti K_z vektorlıq kóbeyme bolǵan $[\mathbf{r}\mathbf{G}]$ túrinde beriledi (r kúsh túsilgen noqat penen kósher arasındaǵı qashıqlıq). Vektorlıq kóbeymeniń anıqlamasınan

$$K_z = Gr \sin \theta.$$

ekenligi kelip shıǵadı. Bul jerde θ arqalı \mathbf{r} menen " vektorları arasındaǵı múyesh belgilengen (4-súwrette Z sızilma tegisligine perpendikulyar hám O noqatı arqalı ótedi; A bolsa kúshtiń túsiw noqatı). Basqasha bılayınsha jazamız:

$$K_z = h_G G.$$

Bul jerde $h_G = r \sin \theta$ kósherge salıstırǵandaǵı kúshtiń iyini (kósherden kúsh tásir etetuǵın baǵıtqa shekemgi qashıqlıq).



15-paragrafta anıqlanǵan impuls momentiniń ózgeriw tezligi menen tásir etiwshı kúshler momenti arasındaǵı baylanıstan biz endi mınaday teńlik jaza alamız:

$$\frac{dL_z}{dt} = K_z \text{ yamasa } I \frac{d\Omega}{dt} = K_z.$$

Bul aylanıwshı deneniń qozǵalıǵı teńlemesi bolıp tabıladı. $\frac{d\Omega}{dt}$ tuwındısıń múyeshlik tezleniw dep atawǵa boladı. Biz bul jerde ilgerilemeli qozǵalıstıń tezleniwiniń kúsh tárepinen anıqlanatuǵınlıǵı sıyaqlı, múyeshlik tezleniwdiń denegge tásir etiwshi kúshtiń momenti tárepinen anıqlanatuǵınlıǵın kóremiz.

Eger denegge bir neshe kúsh tásir etetuǵın bolsa, onda K_z haqqında gáp bolǵanda sol kúshlerdiń momentleriniń qosındısıń túsiniwimiz kerek. Sonıń menen birge K_z tiń kelip shıǵıwınıń vektorlıq ekenligin hám bir birine qarama-qarsı baǵıtlarda deneni aylanıwǵa iytermeleytuǵın kúshlerge hár qıylı belgi jazıwdı umıtpaymız. Deneni kósher dógeresinde ω diń ósiw baǵıtında burıwǵa májbúrleytuǵın kúsh momentiniń mánisi oń belgige iye boladı (ω degenimiz waqıt boyınsha alınǵan tuwındısı deneniń aylanıwınıń múyeshlik tezligi bolıp tabılatuǵın múyesh: $\Omega = \frac{d\phi}{dt}$).

Qattı denede kúsh túsetuǵın noqattı usı kúshtiń baǵıtında qálegen túrde ózertsek te qozǵalıstıń qásiyetleriniń ózgermey qalatuǵınlıǵın atap ótemiz. Kúsh túsirilgen noqattı usınday etip ózertken menen kúshtiń iyini ózgermeydi hám sonlıqtan kúshtiń momenti de ózgeriske ushıramaydı.

Bazı bir kósher dógeresinde aylana alatuǵın deneniń teńsalmaqlıq shárti usı denegge tásir etiwshi kúshlerdiń momentleriniń qosındısıń nolge teń ekenliginde. Bul *momentler nızamı* dep atalatuǵın nızam bolıp tabıladı. Bul nızamniń dara jaǵdayı belgili rırag qádesi bolıp tabıladı. Bul qáde óziniń bir noqatı dógeresinde aylana alatuǵın rıragtıń teń salmaqlıqta turıwın anıqlaydı.

Denegge tásir etetuǵın kúshtiń momenti menen usı kúsh tárepinen deneni aylandırıwda islengen jumıs arasında ápiwayı baylanıs bar. Kósherde dógeresinde deneni sheksiz kishi $d\omega$ múyeshine burǵanda \vec{G} kúshi tárepinen islengen jumıs (4-súwret) A noqatınıń orın almasıwı $dS = r d\omega$ menen qozǵalıǵı baǵıtındaǵı kúshtiń qurawshısı $\vec{G}_s = \vec{G} \sin \theta$ tiń kóbeymesine teń:

$$\vec{G}_s ds = \vec{G} r \sin \theta d\omega = K_z d\omega.$$

Bizler kósherge salıstırǵandaǵı kúsh momentiniń usı kúsh tárepinen islengen jumıstıń birlik múyeshlik awısıwǵa qatnasına teń ekenligin kóremiz. Ekinshi tárepten dene ústinen islengen jumıs onıń potencial energiyasınıń kemeyiwine teń. Sonlıqtan $K_z d\omega = -dU$. Bunnan

$$K_z = -\frac{dU}{d\phi}.$$

Solay etip, keri belgisi menen alınǵan kúsh momenti potencial energiyanıń berilgen kósher dógeresindegi aylanıw múyeshi boyınsha alınǵan tuwındısına teń. Usı jaǵday hám dene ilgerilemeli qozǵalgandaǵı usı denegge tásir etetuǵın kúshlerdiń qosındısı menen potencial energiyanıń ózgerisin baylanıstıratuǵın $\vec{G} = -\frac{dU}{dx}$ formulası arasındaǵı uqsaslıqtıń bar ekenligine kewil bólemiz.

Aylanıwshı deneniń qozǵalıǵı teńlemesiniń energiyanıń saqlanıw nızamı menen sáykes keletuǵınlıǵın ańsat kórsetiwge boladı. Toliq energiya mınaǵan teń:

$$E = \frac{I\Omega^2}{2} + U.$$

Al onıń saqlanıwı

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{I\Omega^2}{2} + U \right) = 0.$$

Funkciyanı differenciallaw qádesi boyınsha iye bolamız:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{dU}{d\phi} \frac{d\phi}{dt} = -K_z \Omega.$$

Tuwındı $\frac{d}{dt} \Omega^2 = 2 \Omega \frac{d\Omega}{dt}$. Bul ańlatpalardı joqarıdaǵı ańlatpaǵa qoyıp hám ulıwmalıq Ω kóbeytiwshisine bólip bizge tanıs bolǵan $I \frac{d\Omega}{dt} = K_z$ teńlemesin alamız.

15-paragraftıń aqırında tuyıq sistemadaǵı impuls momentiniń saqlanıw nızamı hám keńisliktiń izotropiyası arasında baylanıstır bar ekenligi haqqında ayılǵan edi. Usınday baylanıstır bar ekenligin anıqlaw sistemadaǵı tásir etiwshi kúshlerdiń momentleriniń qosındısıń nolge teń bolıwı tutası menen qálegen múyeshlerge buriwda tuyıq sistemanıń qásiyetleriniń ózgermey qalatuǵınlıǵınıń nátiyjesi bolıp tabılatuǵınlıǵınıń dáliline alıp kelinedi (yaǵnıy bul sistema qattı dene bolıp tabılatuǵın bolsa). Eger $\frac{dU}{d\phi} = -K_z$ qatnasın sistemanıń ishki potencial energiyasına qollanatuǵın bolsaq (K_z dep sistemanıń barlıq bólekshelerine tásir etetuǵın kúshlerdiń momentlerin túsinemiz), onda tuyıq sistemanı qálegen kósherdiń dógereginde qálegen múyeshke burǵandaǵı potencial energiyanıń ózgermey qalatuǵınlıǵı haqıyqatında da kúshlerdiń momentleriniń nolge teń ekenligin bildiredi.

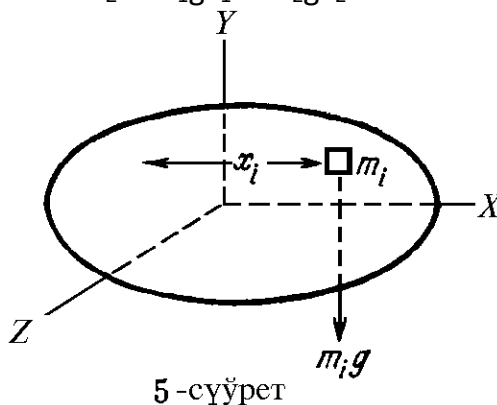
§ 29. Teń tásir etiwshi kúsh

Eger qattı denegе kóp sandaǵı kúshler tásir etetuǵın bolsa, onda bul deneniń qozǵalıstı tek usı kúshlerdiń qosındısınan hám sol kúshlerdiń momentleriniń qosındısınan ǵárezli boladı. Bul jaǵday denegе tásir etiwshi kúshlerdiń qosındısın bir kúsh penen almasırwǵa múmkinshilik beredi. Bul bir kúshti teń *tásir etiwshi kúsh* dep ataydı. SHaması hám baǵıtı boyınsha teń tásir etiwshi kúsh barlıq kúshlerdiń qosındısına teń. Al bul teń tásir etiwshi kúshtiń túsirilgen noqatı usı teń tásir etiwshi kúshtiń momenti barlıq kúshlerdiń momentleriniń qosındısına teń bolatuǵınday etip saylap alınadı.

Usınday jaǵdaylardıń eń áhmiyetlileriniń biri óz-ara parallel bolǵan kúshlerdi qosıw bolıp tabıladı. Buǵan qattı deneniń barlıq bólimlerine tásir etetuǵın salmaq kúshin jatqarıwǵa boladı.

Qanday da bir qattı deneni qaraymız hám iqtıyarlı túrde saylap alıńǵan gorizont baǵıtındaǵı kósherge salıstırǵandaǵı salmaq kúshleriniń tolıq momentin anıqlaymız (5-súwrettegi Z kósheri). Qattı denede alıńǵan m_i elementine tásir etiwshi kúsh $m_i g$ ǵa teń, al usı kúshtiń iyini m_i elementiniń x_i koordinatası bolıp tabıladı. Sonlıqtan barlıq kúshlerdiń qosındı momenti mınaǵan teń:

$$K_z = m_1 g x_1 + m_2 g x_2 + \dots$$



Teñ tásir etiwshi kúsh shaması jaǵınan deneniń tolıq salmaǵına teń $(m_1+m_2+. . .)g$. Eger usı kúsh túsken noqattıń koordinatasın X arqalı belgilesek, onda sol moment K_z mına túrde jazıladı:

$$K_z = (m_1+m_2+. . .)gX.$$

Eki ańlatpanı teńlestirsek

$$X = \frac{m_1x_1 + m_2x_2 + \dots}{m_1 + m_2 + \dots}$$

formulasın alamız. Bul deneniń inerciya orayınıń x koordinatası bolıp tabıladı.

Solay etip biz denegе tásir etiwshi barlıq salmaq kúshleriniń qosındısı onıń inerciya orayına túsirilgen deneniń tolıq salmaǵına teń kúsh penen almasırwdıń múmkin ekenligin kórdik. Usıǵan baylanıslı deneniń inerciya orayın deneniń salmaq orayı dep te ataydı.

Eger kúshlerdiń qosındısı nolge teń bolmaytuǵın bolsa, onda parallel kúshlerdiń sistemasın bir teń tásir etiwshi kúshke alıp keliw múmkin emes. Kúshlerdiń bunday jıynaǵınıń tásiрі shaması boyınsha birdey, al baǵıtı boyınsha qarama-qarsı eki kúsh bolǵan *qos kúshke* alıp keliniwi múmkin. Usınday eki kúshtiń tásir etiw baǵıtına perpendikulyar bolǵan Z kósherine salıstırǵandaǵı momentleriniń qosındısı K_z eki kúshlerdiń baǵıtları arasındaqı qashıqlıq h (qos kúshtiń iyini) penen G shamalarınıń kóbeymesine teń:

$$K_z = Gh.$$

Qos kúshtiń deneniń qozǵalısqına tásiрі tek ǵana usı *qos kúshtiń momentinen* ǵárezli.

§ 30. Giroskop

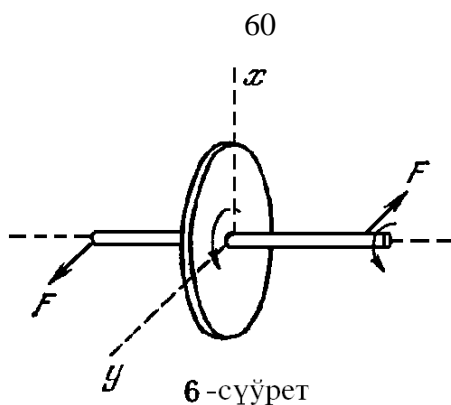
27-paragrafta biz deneniń impuls momenti L_z tiń aylanıw kósherine túsirilgen proekciyasın taptıq. Bekitilgen aylanıw kósherine iye dene ushın L vektorınıń tek sol proekciyası ǵana áhmiyetke iye. Onıń aylanıwdıń múyeshlik tezliginen ápiwayı túrdegi ǵárezlilik ($L_z = I\Omega$) barlıq qozǵalıslardıń da júdá ápiwayı bolatuǵınlıǵına alıp keledi.

Eger aylanıw kósheri bekitilmegen bolsa, onda L vektorınıń barlıq qurawshıların hám olardıń múyeshlik tezlik vektorı Ω dan ǵárezlilikin qarap shıǵıw zárúr boladı. Biraq bul ǵárezlilik quramalı xarakterge iye boladı: L vektorınıń qurawshıları Ω vektorınıń qurawshılarınıń sızıqlı funkciyaları boladı, biraq ulıwma jaǵdaylarda bul vektorlardıń baǵıtları hár qıylı. Bul jaǵday deneniń qozǵalısqın ádewir quramalastıradı.

Biz bul jerde tek *giroskop* dep atalıwshı deneniń bir mısılın keltiremiz: giroskop erkin baǵıtlanatuǵın kósherge hám usı kósherge qarata simmetriyaǵa iye boladı hám óziniń geometriyalıq kósheri dógeresinde úlken tezlikte aylanadı.

Bunday aylanısta moment vektorı L de (múyeshlik tezlik vektorı Ω sıyaqlı) deneniń kósheri baǵıtında baǵıtlanǵan boladı. Bul simmetriyalıq kóz-qaraslardan-aq túsiniكلي: bunday dene kósherge qarata simmetriyaǵa iye bolǵanlıqtan L vektorı baǵıtlanǵanday basqa belgili bir baǵıt joq.

Giroskopqa sırttan kúshler tásir etpese onıń kósheri keńisliktegi baǵıtın saqlaydı: momenttiń saqlanıw nızamı boyınsha L vektorınıń baǵıtı da, shaması da ózgerissiz qaladı. Eger giroskopqa sırttan kúshler tásir etetuǵın bolsa, onda onıń kósheri awısa baslaydı. Atap aytqanda giroskoptıń tap usınday qozǵalısqı bizdi qızıqtıradı; bunday qozǵalıstı *precessiya* dep ataladı.

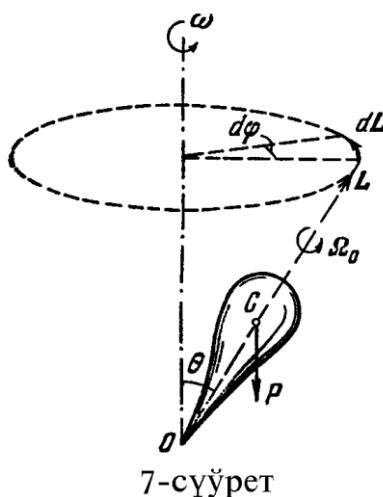


Giroskoptiń kósheriniń baǵıtınıń ózgerisi onıń basqa kósher dógerindegi aylanısın támiyinleydi. Sonlıqtan qosındı múyeshlik tezlik vektorı endi deneniń geometriyalıq kósheri baǵıtında bolmaydı. Sonıń menen birge usı (geometriyalıq) kósher menen moment vektorı L de parallel bolmay qaladı (sonıń menen Ω vektorı da). biraq giroskoptıń tiykarǵı aylanısınıń tezligi úlken hám sırtqı kúshler onsha úlken emes bolsa, onda giroskoptıń kósheriniń burılıw tezligi salıstırmalı úlken bolmaydı hám Ω vektorı, al sonıń menen birge L vektorı da baǵıtı boyınsha giroskoptıń kósherine jaqın boladı. Sonlıqtan L vektorınıń ózgerisin bile otırıp biz giroskoptıń qalay qozǵalatuǵınlıǵın shama menen bile alamız. Momenttiń ózgerisi

$$\frac{dL}{dt} = K$$

teńlemesi boyınsha anıqlanadı, bul jerde K arqalı denegе tásir etiwshi kúshlerdiń momenti belgilengen.

Mısal retinde meyli giroskoptıń kósherleriniń ushlarına (6-súwrettegi z kósheri) uz tegisliginde tásir etetuǵın " qos kúshi túsirilsin. Bunday jaǵdayda qos kúshtiń momenti M x kósheri baǵıtında baǵıtlanǵan, $\frac{dL}{dt}$ tuwındısı da usı tárepke baǵıtlanǵan. Basqa sóz benen aytqanda L momenti, al onıń menen birge giroskoptıń kósheri de x kósheri baǵıtında burıladı.



Solay etip giroskopqa bazı bir kúsh túsirilgende giroskoptıń kósheri usı kúshtiń baǵıtına perpendikulyar baǵıtta burıladı eken.

Giroskopqa óziniń tómengi noqatında súyenip turǵan zırıldawıq (volчок) mısál bola aladı (zırıldawıqtıń súyenip turǵan noqatına súykelisin esapqa almaymız). Zırıldawıq barlıq waqıtta da tómén qaray baǵıtlanǵan salmaq kúshiniń tásirinde boladı. Bul kúsh zırıldawıqtıń salmaǵı $R=Mg$ ǵa (M arqalı onıń massası belgilengen) teń hám onıń salmaq orayına túsirilgen (7-súwrettegi S noqatı). O noqatına salıstırǵanda bul kúshtiń

momentiniń shaması $K = R \cdot l \cdot \sin \theta$ (l arqalı OS qashıqlıǵı, θ vertikal baǵıt penen zırıldawıqtıń kósheri arasındaqı múyesh belgilengen), al baǵıtı zırıldawıqtıń kósheri hám vertikal baǵıtlar jatatuǵın tegislikke perpendikulyar. Usı momenttiń tásirinde L vektorı (sonıń menen birge zırıldawıqtıń kósheri de) shaması boyınsha ózgermey qalıp hám vertikal baǵıt penen turaqlı θ múyeshinde aylanadı, yaǵnıy usı baǵıt dógereginde konuslıq bet boyınsha aylanbalı qozǵaladı.

Zırıldawıqtıń precessiyasınıń múyeshlik tezligin ańsat esaplawǵa boladı. Bul múyeshlik tezlikti ω arqalı belgileybiz (usıǵan baylanıslı óziniń menshikli kósheri dógeregindegi zırıldawıqtıń aylanıwınıń múyeshlik tezligin Ω_0 arqalı belgileybiz).

SHeksiz kishi dt waqıt aralıǵında L vektorı gorizontallıq tegislikte jatatuǵın $dL = K dt$ perpendikulyar ósim aladı. Bul shamanı usı tegislikke túsirilgen L vektorınıń proekciyasına bólip usı proekciya dt waqtı ishinde burılatuǵın $d\omega$ múyeshin alamız:

$$d\omega = \frac{K}{L \sin \theta} dt.$$

$d\omega/dt$ tuwındısı precessiyanıń biz izlegen tezligi bolıp tabıladı. Solay etip

$$\omega = \frac{K}{L \sin \theta}.$$

Bul ańlatpaǵa $K = Mgl \sin \theta$ hám $L = I\Omega_0$ tı qoysaq keyingi ańlatpanı alamız:

$$\frac{Kgl}{I\Omega_0}$$

Zırıldawıqtı jetkilikli dárejede tez aylanadı dep esaplaǵanıǵızdı eske túsiremez. Endi biz usı shártti ayqınlastıra alamız: $\Omega_0 \gg \omega$ shártiniń orınlanıwı kerek.

$$\frac{\omega}{\Omega_0} = \frac{Kgl}{I\Omega_0^2}$$

bolǵanlıqtan biz zırıldawıqtıń salmaq maydanındaǵı potencial energiyası ($Mgl \cos \theta$) onıń kinetikalıq energiyasınan ($I\Omega^2/2$) kishi bolıwı kerek.

§ 31. Inerciya kúshleri

Usı waqıtlarǵa shekem biz inerciallıq esaplaw sistemalarına salıstırǵandaǵı denelerdiń qozǵalısların qaradıq. Tek 23-paragrafta ǵana tezleniwshi ilgerilemeli qozǵalıstaǵı esaplaw sisteması haqqında gáp etildi (tezleniwshi qozǵalatuǵın raketa). Raketa menen birge qozǵalıwshı baqlawshınıń kóz-qarası boyınsha sistemanıń inerciallıq emesligi bir tekli salmaq maydanına ekvivalent bolǵan kúsh maydanınıń payda bolıwı sıpatında qabıl etiledi.

Inercial emes esaplaw sistemalarında payda bolatuǵın qosımsha kúshler ulıwma túrde *inerciya kúshleri* dep ataladı. Bunday kúshlerdiń ózine tán ózgeshelikleriniń biri usı kúshler tásir etetuǵın denelerdiń massalarına proporcionalıǵı bolıp tabıladı. Atap aytqanda tap usı qásiyet inerciya kúshleri menen salmaq kúshleri arasında uqsaslıq payda etedi.

Endi aylanıwshı sistemaǵa salıstırǵanda qozǵalıstıń qalay júzege keletuǵınlıǵın hám bunday jaǵdayda payda bolatuǵın inerciya kúshleriniń qanday ekenligin qaraymız. Jerdiń ózi usınday esaplaw sistemasına mısál bola aladı. Óz kósheri dógereginde sutkalıq aylanısınıń saldarınan Jer menen baylanısqa esaplaw sisteması inerciallıq emes esaplaw sisteması bolıp tabıladı. Tek ǵana Jerdiń óz kósheri dógereginde aylanıwınıń ásteliginin saldarınan payda bolatuǵın inerciya kúshleri salıstırmalı hálisiz.

!piwayılıq ushın Ω múyeshlik tezligi menen teń ólsheuli aylanıwshı disk esaplaw sisteması bolsın dep kóz aldımızǵa keltireyik hám disktiń sheti menen teń ólsheuli qozǵalıwshı bóleksheni qaraymız. Usı bóleksheniń diskke salıstırǵandaǵı tezligin v_{ie} dep belgileyik ("ie" indeksi esaplaw sistemasınıń inerciallıq emes ekenligin bildiredi). Usı bóleksheniń qozǵalmay turǵan baqlawshıǵa salıstırǵandaǵı tezligin v_i dep belgileyik (bul jerde "i" indeksi inerciallıq esaplaw sistemaǵa salıstırǵandaǵı tezlikti bildiredi). Bul v_i tezligi v_{ie} tezligi menen disktiń shetiniń tezliginiń qosındısına teń. Bul tezlik óz gezeginde Ωr ge teń (r arqalı disktiń radiusı belgilengen). Sonlıqtan

$$v_i = v_{ie} + \Omega r.$$

Bóleksheniń inerciallıq esaplaw sistemasına salıstırǵandaǵı w_i tezleniwin ańsat anıqlawǵa boladı. Bólekshe radiusı r bolǵan sheńber boyınsha v_i tezligi menen teń ólsheuli qozǵalatuǵın bolǵanlıqtan

$$w_i = \frac{v_i^2}{r} = \frac{v_{ie}^2}{r} + 2\Omega v_{ie} + \Omega^2 r.$$

Bul tezleniwdi bóleksheniń massası m ge kóbeytsek inercial esaplaw sistemasındaǵı bólekshege tásir etiwshi kúsh " \dot{G} " ti tabamız:

$$\dot{G} = m w_i.$$

Endi diskte otırǵan baqlawshınıń hám sonlıqtan diskti qozǵalmaydı dep esaplaytuǵın baqlawshınıń kóz-qarası boyınsha qozǵalıstır qalay júzege keletuǵınlıǵın qaraymız. Onıń ushın da bólekshe radiusı r bolǵan sheńber boyınsha teń ólsheuli qozǵaladı, biraq onıń tezligi v_{ie} ke teń. Sonlıqtan bóleksheniń tezleniwi diskke salıstırǵanda

$$w_{ie} = \frac{v_{ie}^2}{r}$$

shamasına teń hám disktiń orayına qaray baǵıtlanǵan. Diskti qozǵalmaydı dep esaplap baqlawshı w_{ie} ti bóleksheniń massasına kóbeytedi hám alınǵan

$$\dot{G}_{ie} = m w_{ie}$$

kúshin bólekshege tásir etiwshi kúsh dep esaplaydı.

$$w_{ie} = w_i - 2\Omega v_{ie} - \Omega^2 r$$

ekenligin ańlap hám $m v_i = \dot{G}$ ekenligin esapqa alıp

$$\dot{G}_{ie} = \dot{G} - 2m\Omega v_{ie} - m\Omega^2 r$$

ańlatpasına iye bolamız.

Solay etip aylanıwshı esaplaw sistemasında bólekshege "haqıyqıy" \dot{G} kúshinen basqa eki qosımsha $-m\Omega^2 r$ hám $-2m\Omega v_{ie}$ kúshleriniń tásir etetuǵınlıǵın kóremiz. Inerciya kúshleriniń birinshisin *orayǵa umtılıwshı* kúsh dep, al ekinshisin *Koriolis kúshi* dep ataymız. "Minus" belgileri usı eki kúshtiń de disktiń aylanıw kósherinen sırtqa qaray baǵıtlanǵanlıǵın kórsetedi.

Oraydan qashıwshı kúsh v_{ie} tezliginen ǵárezli emes. Basqa sóz benen aytqanda bunday kúsh bólekshe diskke salıstırǵanda qozǵalmasa da bar boladı. Esaplaw sistemasınıń aylanıw kósherinen r qashıqlıǵında turǵan bólekshege tásir etiwshi bunday kúsh barlıq waqıtta da $m\Omega^2 r$ ge teń hám aylanıw kósherinen baslap radiustıń baǵıtında baǵıtlanǵan.

Oraydan qashıwshı kúsh túsiniǵi menen birge biz oraydan qashıwshı maydanı kúshleriniń potencial energiyası sıpatında oraydan qashıwshı energiya túsiniǵin de kirgiziwimiz múmkin. Kúsh penen potencial energiyanı baylanıstırıwshı ulıwmalıq formuladan

$$-\frac{dU_{oraydankash}}{dr} = m\Omega^2 r$$

hám bunnan

$$U_{\text{oraydankash}} = - \frac{m\Omega^2 r^2}{2} + \text{sonst.}$$

Blqtiyarlı turaqlını nolge teń etip alıw tábiyiy. Bunday jaǵdayda potencial energiya jerde oraydan qashıwshı kúsh nolge teń bolǵan aylanıw kósherinen baslap esaplanadı ($r=0$).

Oraydan qashıwshı kúsh arnawlı túrde qurılǵan centrifugalarda júdá úlken mánislerge shekem jetiwi múmkin. Jer betinde bul kúshtiń mánisi úlken emes. Bul kúshtiń shaması ekvatorda eń úlken mániske iye. Bul jerde massası 1 g bolǵan bólekshe ushın (Jerdiń radiusı $R = 6.39 \cdot 10^8 \text{ sm}$)

$$m\Omega^2 r = 19 \left(\frac{2\pi}{24 \cdot 60 \cdot 60} \right)^2 9 \cdot 6.39 \cdot 10^8 \text{ din} = 3.3 \text{ din.}$$

Bul kúsh deneniń hár bir grammınıń salmaǵın 3.3 dinaǵa kemeytedi, yaǵnıy deneniń salmaǵın shama menen 0.3 % ke kemeytedi.

Ekinshi inerciya kúshi bolǵan Koriolis kúshi óziniń xarakteri boyınsha biz usı waqıtqa shekem tanısqa kúshlerden ayrıladı. Bul kúsh tek (berilgen esaplaw sistemasına salıstırǵanda) qozǵalıwshı denelerge tásir etedi hám usı qozǵalıstıń tezligine ǵárezli. Sonıń menen birge bul kúsh bóleksheniń esaplaw sistemasına salıstırǵandaǵı awhalına ǵárezsiz bolıp shıqtı. Biz joqarıda kórgen misalda shaması jaǵınan ol $2m\Omega v_{ie}$ ke teń hám baǵıtı boyınsha disktiń aylanıw kósherinen sırtqa qaray baǵdarlangan. Ulıwma jaǵdaylarda iqtıyarlı v_{ie} tezligi menen aylanıwshı esaplaw sistemasına salıstırǵanda qozǵalıwshı bólekshege tásir etiwshi inerciyanıń koriolis kúshi mınaǵan teń:

$$2m[v_{ie}\Omega].$$

Basqa sóz benen aytqanda bul kúsh aylanıw kósherine hám bóleksheniń tezligine perpendikulyar hám shaması boyınsha $2mv_{ie}\Omega \sin\theta$ ǵa teń (θ arqalı Ω menen v_{ie} arasındaǵı múyesh belgilengen). v_{ie} tezliginiń baǵıtı qarama-qarsı baǵıtqa ózgergende Koriolis kúshiniń de baǵıtı qarama-qarsı baǵıtqa ózgeredi.

Koriolis kúshiniń baǵıtı barlıq waqıtta da bóleksheniń tezliginiń baǵıtına perpendikulyar bolǵanlıqtan ol bóleksheniń ústinen hesh qanday jumıs islemeydi. Basqa sóz benen aytqanda Koriolis kúshi tek bóleksheniń qozǵalıwınıń baǵıtın ózgertedi, biraq qozǵalıw tezliginiń shamasın ózgertpeydi.

Jer betinde tásir etiwshi Koriolis kúshiniń shaması júdá kishi bolsa da, ol bazı bir effektlerdiń júzege keliwine alıp keledi. Usı kúshtiń tásir etiwine baylanıslı erkin túsiwshi dene dál vertikal boyınsha qozǵalmaydı, al shıǵıs tárepke awısadı. Biraq bul awısıwdıń shaması úlken emes. Misalı 60° keńlikte 100 m biyiklikten qulap túsiwshi deneniń awıtqıwı shama menen 1 sm ge teń.

Bir waqıtları Jerdiń sutkalıq aylanısınıń dálilleriniń biri bolǵan Fuko mayatniginiń terbelisiniń ózgeshelikleri de Koriolis kúshine baylanıslı. Eger Koriolis kúshi bolmaǵanda Jerge salıstırǵandaǵı mayatniktiń terbelis tegisliginiń baǵıtı ózgermegen bolar edi. Bul kúshtiń tásirinde vertikal baǵıttıń dógereginde terbelis tegisligi $\Omega \sin\theta$ múyeshlik tezligi menen aylanadı (Ω Jerdiń aylanıwınıń múyeshlik tezligi, - arqalı mayatnikti ildirilip qoyılǵan noqattıń keńligi belgilengen).

Koriolis kúshi meteorologiyalıq qubılıslarda úlken orındı iyeleydi. Misalı eger Jer óz kósheri dógereginde aylanbaǵanda tropiklerden ekvatorǵa qarap esiwi kerek bolǵan passatlar dep atalıwshı samal arqa yarım sharda arqadan túslikke qarap, al túslik yarım

sharda túslikten arqağa qaray esken bolar edi. Koriolis kúshiniń tásirinde bul samallar batısqa qaray awısadı.

IV BAP

TERBELISLER

§ 32. Garmonikalıq terbelisler

Biz 13-paragrafta potencial shuqırdağı bóleksheniń bir ólshemli qozǵalıstınıń dáwirli bolatuǵınlıǵı, yaǵnıy birdey waqıt aralıǵında qaytalanatuǵınlıǵın kórdik. Qozǵalıstı qaytadan qaytalanatuǵın sonday waqıt aralıǵın *qozǵalıstıń dáwiri* dep ataymız. Eger T qozǵalıstıń dáwiri bolatuǵın bolsa, onda t hám $t+T$ waqıt momentlerinde bólekshe birdey awhalda hám birdey tezlikke iye boladı.

Dáwirge keri bolǵan shama *jiyilik* dep ataladı. ν arqalı belgilenetuǵın jiyilik

$$\nu = \frac{1}{T}$$

bir sekundta qozǵalıstıń neshe ret qaytalanatuǵınlıǵın kórsetedi. Demek bul shama *1/sek* ólshemine iye. *1 sek* dáwirge sáykes keliwshi jiyilikti ólshewdiń birligi *gerc (gc)* dep ataladı: $1 \text{ gc} = 1 \text{ sek}^{-1}$.

Álbette, garmonikalıq qozǵalıstıń oǵada kóp sandaǵı túrleri bar. Trigonometriyalıq funkciyalar bolǵan sinus penen kosinustıń eń ápiwayı dáwirlik funkciyalar ekenligin bilemiz. Sonlıqtan materiallıq noqattıń koordinataları

$$x = A \cos(\omega t + \alpha)$$

nızamı boyınsha ózgeretuǵın qozǵalıstıń eń ápiwayı dáwirli qozǵalıstı bolıp tabıladı. Bul ańlatpada A , ω , α arqalı bazı bir turaqlı shamalar belgilengen. Usınday dáwirli qozǵalıstı *garmonikalıq terbelmeli qozǵalıstı* dep ataladı.

A hám ω shamaları ápiwayı fizikalıq mániske iye. Kosinustıń dáwiri 2π ge teń bolǵanlıqtan qozǵalıstıń dáwiri T ω shaması menen bılay baylanısqa

$$T = \frac{2\pi}{\omega}.$$

Bul jerde ω nıń $\frac{1}{2}$ shamasınan 2π kóbeytiwshisi menen ayırmasınıń bar ekenligi kórinip tur. ω shamasın *cikllıq jiyilik* dep ataydı. Fizikada terbelislerdiń xarakteristikası retinde ádette usı shamadan paydalanadı hám usı shamalı tek jiyilik dep te ataydı.

Kosinustıń eń úlken mánisi birge teń bolǵanlıqtan x koordinatasınıń maksimallıq mánisi A ǵa teń. Bul maksimallıq mánis *terbelishtiń amplitudası* dep ataladı. x shaması $-A$ dan $+A$ ǵa shekem ózgeredi.

Kosinustıń argumenti $\omega t + \alpha$ terbelislerdiń fazası degen atqa iye; α dáslepki faza bolıp tabıladı ($t=0$ momentindegi).

Bóleksheniń tezligi mınaǵan teń:

$$v = \frac{dx}{dt} = -A\omega \sin(\omega t + \alpha).$$

Bizler tezliktiń de garmonikalıq nızam boyınsha ózgeretuǵınlıǵın kóremiz (tek ǵana kosinustıń ornında sinus tur). Bul ańlatpanı

$$v = A\omega \sin\left(\omega t + \alpha + \frac{\pi}{2}\right)$$

túrinde jazıp tezliktiń ózgerisiniń koordinataniń ózgerisinen $\frac{\pi}{2}$ shamasına ǵalǵa ketetuǵınlıǵın kóremiz. Tezliktiń amplitudası awısıw amplitudası menen jiyilik ω nıń kóbeymesine teń.

Endi bóleksheniń garmonikalıq terbelisi ushın oǵan qanday kúshtiń tásir etiwiniń kerekligin anıqlaymız. Sonıń ushın usınday qozǵalıstaǵı bóleksheniń tezleniwini anıqlaymız:

$$\varpi = \frac{dv}{dt} = -A\omega^2 \cos(\omega t + \alpha).$$

Bul shama da bóleksheniń koordinatasınıń ózgeretuǵın nızamı boyınsha ózgeredi (biraq fazası boyınsha π ge ayrıladı). ϖ nı bóleksheniń massasına kóbeytip hám $A \cos(\omega t + \alpha) = x$ ekenligin esapqa alıp kúsh ushın tómendegidey ańlatpanı alamız:

$$\acute{G} = -m\omega^2 x.$$

Solay etip bóleksheniń garmonikalıq terbeliwi ushın usı bólekshege tásir etiwshi kúshtiń shaması bóleksheniń awısıwına proporcional, al baǵıtı boyınsha usı awısıwǵa qarama-qarsı bolıwı kerek eken. Ápiwayı mısál: sozılǵan (yamasa qısılǵan) prujina tárepinen denegе tásir etiwshi kúsh usı prujinaniń uzarıwına (yamasa qısqarıwına) tuwrı proporcional hám prujinaniń óziniń normal uzınlıǵına qaytıw baǵıtında boladı. Bunday kúshti *qayta tiklewshi kúsh* dep ataydı.

Joqarıda táriyiplengendey kúshtiń bóleksheniń awhalınan (iyelegen ornınan) ǵárezliligi fizikalıq máselelerdi sheshkende júdá jiyi ushırasadı. Eger qanday da bir dene ornıqlı teń salmaqlıq awhalda turǵan bolsa (bul $x=0$ noqatı bolsın) hám keyninen bul deneni bir tárepke (yamasa qarama-qarsı tárepke) awıstırsa, onda usı deneni dáslepki ornıqlı teń salmaqlıq awhalına qaytarıwshı \acute{G} kúshi payda boladı. Deneniń awhalınıń funkciyası x sıyaqlı $\acute{G} = \acute{G}(x)$ kúshi de koordinata bası menen kesisetuǵın baǵı bir iymeklik penen táriyiplenedi: $x=0$ noqatında $\acute{G}=0$, al usı noqattıń bir birine qarama-qarsı táreplerinde kúsh hár qıylı belgilerge iye. Koordinata x tıń úlken emes mánisleriniń intervalında bul kesindi juwıq túrde tuwrı sıyıqtıń kesindisi sıpatında qabıl etiliwi múmkin. Demek bunday jaǵdayda kúsh awısıw x qa proporcional boladı. Solay etip dene teń salmaqlıq awhalınan azmaz awıstırılǵan bolsa hám bunnan keyin usı dene ózinshe qaldırılса, onda usı dene óziniń teń salmaqlıq halına qaytqanda garmonikalıq terbelisler payda boladı.

Deneler ózleriniń teń salmaqlıq awhalınan kishi aralıqlarǵa awısatauǵın qozǵalıslar *kishi terbelisler* dep ataladı. Biz kishi terbelislerdiń garmonikalıq terbelisler bolatuǵınlıǵın kórdik. Bunday terbelislerdiń jiyilikleri kúsh penen awısıw arasındaǵı baylanıstı táriyipleytuǵın deneni bekitiwdiń qattılıǵına ǵárezli. Eger kúsh hám awısıw arasında

$$\acute{G} = -kx$$

túrindegi baylanıs bolsa (k arqalı *qattılıq* dep atalatuǵın baǵı bir koefficient belgilengen), onda bul kúshti garmonikalıq terbelistegi $\acute{G} = -m\omega^2 x$ ańlatpası menen salıstırıp terbelis jiyiliginiń

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

ge teń ekenligine iye bolamız. Bunnan jiyiliktiń tek ǵana terbeliwshi sistemaniń qásiyetlerinen (deneni bekitiwdiń qattılıǵı hám usı deneniń massası) ǵárezli ekenligin kóremiz. Jiyilik terbelis amplitudasınan ǵárezsiz eken. Birdey deneler hár qıylı amplitudalar menen tek birdey jiyiliklerde terbeledi. Bul kishi terbelislerdiń eń áhmiyetli qásiyeti bolıp tabıladı. Al terbelis amplitudası bolsa terbeliwshi sistemaniń qásiyeti boyınsha emes, al onıń qozǵalısinıń baslanǵısh shártlerine baylanıslı (yaǵnıy sistemani

tinishliq haldan shıǵarıwshı baslanǵısh Ǵtúrtkige" baylanıslı). %z ózine qoyılǵan sistemanıń baslanǵısh túrtkiniń saldarınan baslanǵan terbelisleri *menshikli terbelisler* dep ataladı.

$$\frac{dU}{dx} = -\acute{G} = kx$$

ekenligin eske túsirip terbeliwshi bóleksheniń potencial energiyasın ańsat tabıwǵa boladı. Joqarıdaǵı ańlatpadan

$$U = \frac{kx^2}{2} + \text{sonst.}$$

Teń salmaqlıq halda ($x=0$) potencial energiya nolge teń dep esaplasaq, onda

$$U = \frac{kx^2}{2}$$

ekenligine iye bolamız. Bul jerde potencial energiyanıń awısıwdıń kvadratına proporcional ekenligi kóremiz.

Potencial energiyanı kinetikalıq energiya menen qosıp terbeliwshi bóleksheniń tolıq energiyasın alamız:

$$E = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2} = \frac{mA^2\omega^2}{2} \sin^2(\omega t + \alpha) + \frac{mA^2\omega^2}{2} \cos^2(\omega t + \alpha)$$

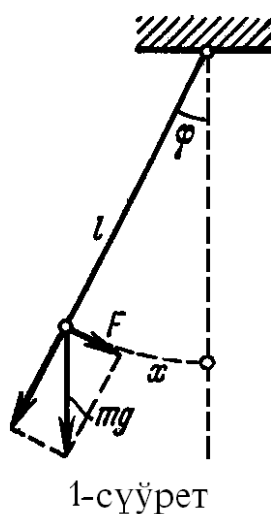
yamasa

$$E = \frac{mA^2\omega^2}{2}.$$

Solay etip tolıq energiya terbelisler amplitudasınıń kvadratına proporcional eken. Al kinetikalıq hám potenciallıq energiyalar $\sin^2(\omega t + \alpha)$ hám $\cos^2(\omega t + \alpha)$ boyınsha ózgeredi, yaǵnıy birewi úlkeyse, ekinshisi kemeyedi. Basqa sóz benen aytqanda terbelis processı dáwirli túrde potencial energiyanıń kinetikalıq energiyaǵa hám qarama-qarsı ótiwlerge baylanıslı eken. Terbelis dáwiri ishindegi potencial hám kinetikalıq energiyalardıń ortasha mánisleri turaqlı hám $E/2$ ge teń.

¶ 33. Mayatnik

Kishi terbelislerdiń misalı retinde matematikalıq mayatnikti qaraymız. Matematikalıq mayatnik dep Jerdiń salmaq maydanında sabaqqa ildirilgen materiallıq noqattı aytaмыз.



Mayatnikti teń salmaqlıq awhalınan bazı bir - múyeshine awıstıramız hám usınday jaǵdaylardaǵı mayatnikke tásir etiwshi kúshti anıqlaymız. Mayatnikke tásir etiwshi ulıwmalıq kúsh mg ǵa teń (m mayatniktiń massası, g erkin túsiw tezleniwı). Bul kúshti biz

eki qurawshıǵa jikleymiz (1-súwret): birewi sabaq boyınsha tásir etedi, ekinshisi oǵan perpendikulyar. Birinshisi sabaqtıń keriwi menen kompensaciyanadı, ekinshisi mayatnikti qozǵalısqá keltiredi. Bul qurawshınıń mánisi mınaǵan teń:

$$\dot{G} = -mg \sin \alpha.$$

Kishi terbelislerde - múyeshi kishi. Sonlıqtan $\sin \alpha$ -dıń mánisi shama menen - $\sin \alpha$ -dıń óziniń mánisine teń. Sonlıqtan $\dot{G} \approx mg \cdot \frac{x}{l}$ arqalı mayatniktiń uzınlıǵı belgilense l - kóbeymesi materiallıq noqat ótken jol x bolıp tabıladı hám \dot{G} kúshin mına túrde jazı alamız:

$$\dot{G} = -\frac{mg}{l}x.$$

Bul jerde mayatniktiń kishi terbelislerindegi qattılıq koefficientiniń $\frac{mg}{l}$ ge teń ekenligi kórinip tur. Sonlıqtan mayatniktiń terbelis jıyılıǵı mınaǵan teń:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}.$$

Mayatniktiń terbelisiniń dáwiri

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

Dáwiri $T=1$ sek bolǵan mayatniktiń uzınlıǵı $l = 24.8$ sm ge teń (erkin túsiw tezleniwiniń standart mánisi ushın).

Mayatniktiń dáwiriniń onıń uzınlıǵı menen erkin túsiw tezleniwine ǵárezziligi ólshem birlikleri kóz-qarası boyınsha kóz-qaraslardan da ápiwayı túrde anıqlanıwı múmkin. Biziń qolımızda berilgen mexanikalıq sistemanı táriyipleytuǵın ólshem birlikleri

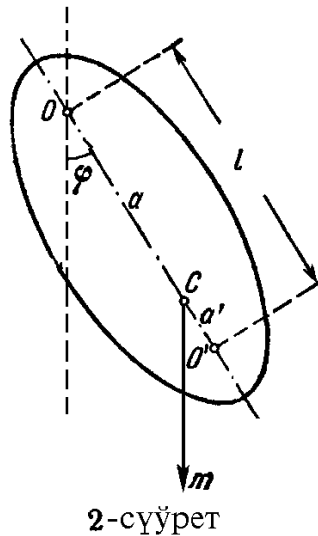
$$[m] = g, \quad [l] = sm, \quad [g] = sm/sec^2.$$

bolǵan m , l , g shamaları bar. Tek usı shamalardan ǵana dáwir T ǵárezli bolıwı kerek. Bul shamalar ishinde g ólshemine tek m iye, al izlenip atırǵan dáwir $[T]=sek$ g ǵa iye emes. Bunnan T nıń m nen ǵárezli emes ekenligi óz-ózinen túsinikli. Qalǵan eki l hám g shamalarınan T da joq bolǵan sm ólshemin joq qılıwǵa boladı. Bunıń ushın l/g qatnasın alamız. Aqırında l/g dan kvadrat túbir shıǵarsaq biz sek ólshemin alamız. Qala berse joqarıdaǵı talqılawlardan sek tı payda etiwdiń bul birden-bir jolı ekenligin kóremiz. Usı ayılǵanlarǵa baylanıslı biz T nı $\sqrt{l/g}$ ǵa proporcional bolıwı kerek dep tastıyıqlay alamız. Biraq proporcionallıq koefficienttiń sanlıq mánisin usınday jollar menen anıqlay almaymız.

Biz usı waqıtqa shekem materiallıq noqattıń terbelisleri sıpatında kishi terbelisler haqqında gáp ettik. Biraq biz alǵan nátiyjeler ádewir quramalıraq bolǵan sistemalardıń terbelisleri ushın da orınlanadı.

Mısal retinde gorizontallıq kósher dógereginde aylana alatuǵın qattı deneniń terbelisin qaraymız. Bunday deneni *fizikalıq mayatnik* dep ataymız.

Biz 28-paragrafta aylanıwshı denelerdiń qozǵalısqá nızamlarınıń materiallıq noqatlardıń qozǵalısqá nızamlarınan formallıq jaqtan ayrılmaytuǵınlıǵın kórdik. Koordinatanıń ornın deneniń burılıw múyeshi -, massanıń ornın deneniń inerciya momenti I (aylanıw kósherine salıstırǵanda), al kúsh G tiń ornın kúsh momenti K_z iyeleydi.



Bul jaǵdayda aylanıw kósherine salıstırǵandaǵı salmaq kúshiniń momenti $K_z = -mga \sin$ - (m deneniń massası, a arqalı onıń salmaq orayı S menen aylanıw kósheri arasındaǵı qashılıq belgilengen, 2-súwrette aylanıw kósheri O noqatı arqalı súwret tegisligine perpendikulyar baǵıtta ótedi, - arqalı OS sıızǵınıń vertikal baǵıttan awıtqıwı belgilengen, minus belgisi K_z momentiniń - múyeshin kishireytiwge qaray baǵdarlanǵanlıǵın bildiredi). Kishi terbelislerde - múyeshi kishi mániske iye hám sonlıqtan $K_z \approx -mg\varphi$. Bul ańlatpanı materiallıq noqattıń terbelisi jaǵdayındaǵı qaytarıwshı kúsh $\vec{G} = -kx$ penen salıstırsaq qattılıq koefficienti k nıń orın endi mga shamasınıń iyeleytuǵınlıǵın kóremiz. Sonlıqtan $\omega = \sqrt{k/m}$ formulasına sáykes fizikalıq mayatniktiń terbelisiniń jiyiligi ushın mınaday formulanı jaza alamız:

$$\omega = \sqrt{\frac{mga}{I}}.$$

Bul ańlatpanı matematikalıq mayatniktiń jiyiligi ushın jazılǵan formula ($\omega = \sqrt{g/l}$) menen salıstırsaq fizikalıq mayatniktiń qozǵalıwınıń qásiyetiniń uzınlıǵı

$$l = \frac{I}{ma}$$

bolǵan matematikalıq mayatniktiń qozǵalıwınıń qásiyetleri menen birdey bolatuǵınlıǵın kóremiz. Bul uzınlıqtı fizikalıq mayatniktiń *keltirilgen uzınlıǵı* dep ataymız.

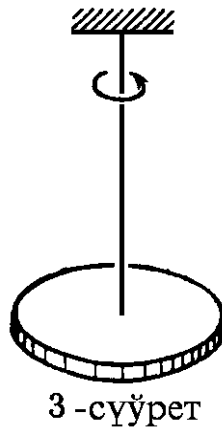
$I = I_0 + ma^2$ dep jazıp (I_0 arqalı mayatniktiń salmaq orayı arqalı ótetuǵın gorizontallıq baǵıttaǵı kósherge salıstırǵandaǵı inerciya momenti belgilengen) keltirilgen uzınlıqtı

$$l = a + \frac{I_0}{ma}$$

dep jaza alamız. Bul ańlatpadan mınaday áhmiyetli juwmaq shıǵara alamız: OS tuwrısınıń boyında (2-súwret) $OO' = l$ kesindisin saylap alamız. Endi mayatnik O' noqatı arqalı ótetuǵın kósherge bekitilgen dep kóz aldımızǵa keltireyik. Usınday jollar menen alınǵan jańa mayatniktiń keltirilgen uzınlıǵı mınaǵan teń boladı:

$$l' = a' + \frac{I_0}{ma'}.$$

Biraq $a' = l - a = I_0/ma$. Solay etip bir birinen l qashılıqlarında turǵan kósherlerge bekitilgen mayatniklerdiń keltirilgen uzınlıqları (hám sonlıqtan) terbelis dáwirleri birdey boladı eken.



Endi eń aqırında serpimli sabaq penen asıp qoyılǵan disktiń *aylanbalı terbelisin* qaraymız (3-súwret). Buralǵanda diskti dáslepki ornına qaytarıwǵa baǵdarlangan sabaqtıń serpimlilik kúshleriniń momenti burılıw múyeshi ϕ ge proporcional: $K_z = -k\phi$ (ϕ arqalı sabaqtıń qásiyetine baylanıslı bolǵan turaqlı koefficient). Eger disktiń inerciya momenti (onıń orayına salıstırǵandaǵı) I_0 bolsa, onda terbelis jıyılıǵı

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{I_0}}.$$

§ 34. Sóniwshi terbelisler

Usı waqıtqa shekem bizler denelerdiń hesh qanday qarsılıqsız qozǵalısların hám terbelislerin qaradıq. Biraq eger qozǵalıstı qanday da bir sırtqı ortalıqta orın alatuǵın bolsa, onda bul ortalıq qozǵalıstı ásteletiwge qaratılǵan tásir jasaydı. Deneniń qorshap alǵan ortalıq tásirlesiwi quramalı process bolıp tabıladı. Bul processtiń aqıbetinde qozǵalıwshı deneniń energiyası aqır ayaǵında jıllılıqqa aylanadı. Bunday qubılıstı fizikada *energiyanıń shashırawı* yamasa *energiyanıń dissipaciyası* dep ataydı. Bul process taza mexanikalıq qubılıs bolıp ta tabılmaıdı hám sonlıqtan onı tereńirek izertlew ushın fizikanıń basqa da bólimlerin qollanıwǵa tuwra keledi. Al mexanikalıq kóz-qaraslar boyınsha qorshaǵan ortalıqtıń táhiri belgili bir qosımsha kúshti kirgiziw menen anıqlanadı. Bul kúsh qozǵalıstıń júzege keliwi menen payda boladı hám barlıq waqıtta qozǵalısqı qarama-qarsı baǵıtlangan. Bul kúshti *súykeli kúshi* dep ataymız. Jetkilikli dárejedegi kishi tezliklerde súykeli kúshi tezlikke proporcional, yaǵnıy

$$\dot{G}_{súyk} = -bv.$$

Bul jerde b arqalı qorshaǵan ortalıq penen deneniń tásirlesiwin táriyipleytuǵın bazı bir turaqlı shama belgilengen, al minus belgisi kúshtiń tezliktiń baǵıtına qarama-qarsı baǵıtlanganlıǵın kórsetedi.

Usınday súkelistiń terbelmeli qozǵalısqı qalay tásir etetuǵınlıǵın anıqlaymız. Terbelistiń bir dáwiri ishindegi energiyanıń joǵalıwı salıstırmalı kishi bolıwı ushın súykeli kúshin kishi dep esaplaymız. Bunday jaǵdaydaǵı deneniń energiyasınıń joǵalıwı súykeli kúshi tárepinen islengen jumıs túrinde anıqlanadı. dt waqıtı ishinde islengen jumıs hám soǵan sáykes energiyanıń joǵalıwı dE súykeli kúshi $\dot{G}_{súyk}$ penen deneniń awısıwı $dx = vdt$ teń kóbeymesine teń:

$$dE = \dot{G}_{súyk}dx = -bv^2dt.$$

Bunnan

$$\frac{dE}{dt} = -bv^2 = -\frac{2b}{m} \frac{mv^2}{2}.$$

Sýkelis kúshi kishi mániske iye dep boljawdan usı formulanı bir dáwir ishindegi energiyanıń joǵalıwınıń ortasha mánisin tabıw ushın qollanıw múmkin. Bunday jaǵdayda kinetikalıq energiya $\frac{mv^2}{2}$ nı onıń ortasha mánisi menen almasırwımız kerek. Biz 32-paragrafta terbeliwshi deneniń kinetikalıq energiyanıń ortasha mánisiniń onıń tolıq energiyasınıń yarımına teń ekenligin kórgen edik. Sonlıqtan bılayınsha jaza alamız:

$$\frac{dE}{dt} = -2\gamma E.$$

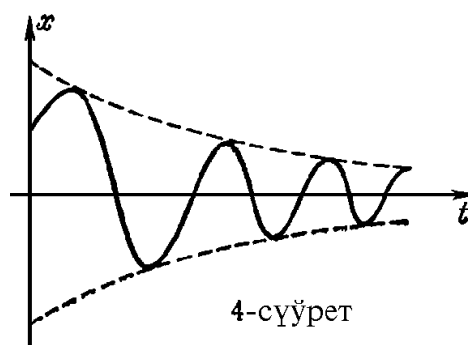
($\gamma = b/2m$). Biz bul jerde energiyanıń kemeyiw tezliginiń energiyanıń ózine proporcional ekenligin kóremiz. Bul ańlatpanı

$$\frac{dE}{E} = d(\ln E) = -2\gamma dt$$

túrinde kóshirip jazıp $\ln E = -2\gamma t + \text{sonst}$ ekenligi alamız. Bunnan

$$E = E_0 e^{-2\gamma t}$$

ekenligine iye bolamız. Bul jerde E_0 energiyanıń waqıttıń baslanǵısh momentindegi mánisi ($t=0$ degi).



Solay etip sýkeliske baylanıslı terbelisler energiyası eksponenciallıq nızam boyınsha kemeyedi eken. Energiya menen birge terbelislerdiń amplitudası da kishireydi. Energiya amplitudanıń kvadratına proporcional bolǵanlıqtan

$$A = A_0 e^{-2\gamma t}.$$

Amplitudanıń kemeyiw dárejesi *sóniw koefficienti* dep atalatuǵın γ shaması menen anıqlanadı. $\tau = 1/\gamma$ waqıtı ishinde amplituda e mártebe kishireydi, bunday waqıt terbelislerdiń *jasaw waqtı* dep ataladı. Joqarıda biz qabıl etken sýkelis kúshiniń kishiligi τ dıń dáwir $T=2\pi/\omega$ dan úlken ekenligin názerde tutadı (yaǵnıy terbelislerdiń *jasaw waqtında* kóp sandaǵı $n = \tau/T$ terbelisler orın aladı). n ge keri bolǵan shamanı *sóniwdiń logarifmlik dekrementi* dep ataydı.

4-súwrette

$$x = A \cos(\omega t + \alpha) = A_0 e^{-2\gamma t} \cos(\omega t + \alpha)$$

sóniwshi terbelislerindegi awısıwdıń waqıtqa ǵárezililigi kórsetilgen. Punktir sızıq amplitudanıń kishireyiw barısın sáwlelendiredi.

Sýkelis terbelislerdiń jiyiligine de tásir etedi. Qozǵalıstı ástelendiriw menen birge sýkelis dáwirdi úlkeytedi, yaǵnıy terbelislerdiń jiyiligin kishireytedi. Biraq kishi terbelislerde bunday ózgerisler júdá kishi (sonlıqtan da biz bunı joqarıda esapqa almadıq): jiyiliktiń salıstırmalı ózgerisiniń γ/ω shamasına proporcional ekenligin kórsetiw múmkin. Kerisinshe, úlken sýkelislerde sezilerliktey ásteleniw baqlanadı. Bunday jaǵdayda qozǵalıstıń sóniwi terbelissiz júzege keledi. Bunday jaǵdaydaǵı sóniwdi *dáwirli emes (aperiodlı)* dep ataydı.

§ 35. Májbúriy terbelisler

Qálegen haqıyqıy terbelmeli sistemada qanday da bir súykelis processı orın aladı. Sonlıqtan dáslepki túrtkiniń nátiyjesinde payda bolǵan erkin terbelisler waqıttıń ótiwi menen sónedi.

Sistemada sónbeytuǵın terbelisler qozdırıw ushın súykeliske baylanıslı energıyanıń joǵalıwın kompensacıyalaw kerek. Bunday kompensacıyanı energıyanıń sırtqı derekleri (terbelmeli sistemaǵa salıstırǵandaǵı) tárepinen ámelge asırıw múmkin. Sistemaǵa waqıtqa baylanıslı bazı bir ω jıyılıǵı menen garmonikalıq

$$\dot{G}_{\text{sirtqı}} = \dot{G}_0 \cos \omega t$$

nızam boyınsha tásir jasaw eń ápiwayı mısıl bola aladı (usı jıyılıqtan ayırıw ushın sistemanıń menshikli, erkin terbelisleriniń jıyılıǵın endi ω_0 arqalı belgileybiz). Usı kúshtiń tásirinde sistemada terbelisler payda boladı hám bul terbelislerdi *májbúriy terbelisler* dep ataymız. Bunday jaǵdayda sistemanıń qozǵalıslı jıyılıǵı ω_0 bolǵan menshikli terbelisler menen jıyılıǵı ω bolǵan májbúriy terbelislerdiń qosındısınan turadı.

Erkin terbelislerdi bizler úyrendik. Endi májbúriy terbelislerdi úyrenemiz hám bul terbelislerdiń amplitudasın anıqlaymız. Bul terbelislerdi

$$x = V \cos(\omega t - \beta)$$

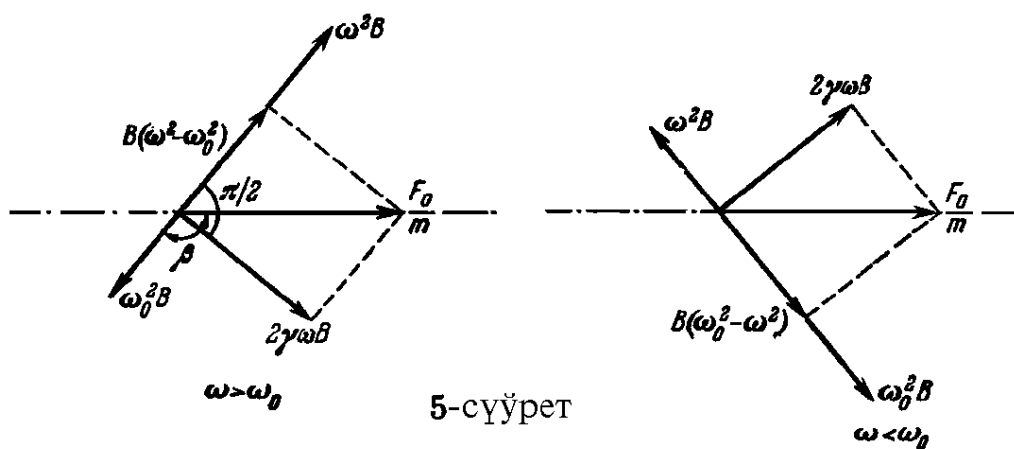
túrinde jazamız (V amplitudası, β arqalı sırtqı kúsh penen usı kúsh tárepinen payda etilgen terbelisler arasındaqı házirshe belgisiz fazalar awısıwı belgilengen). Biz β nıń aldına minus belgisin qoydıq, yaǵnıy faza boyınsha haqıyqatında da keshigiwdiń orın alatuǵınlıǵın eske aldıq (bunıń durıslıǵın tómende kóremiz).

Májbúriy terbelis jasawshı deneniń tezleniwi w úsh túrli kúshtiń bir waqıtta tásir etiwiniń nátiyjesinde orın aladı: qayta tiklewshi kúsh $-kx$, sırtqı kúsh $\dot{G}_{\text{sirtqı}}$ hám súykelis kúshi $\dot{G}_{\text{súyk}} = -bv$. Sonlıqtan

$$mw = -kx - bv + \dot{G}_{\text{sirtqı}}.$$

Bul teńliktiń eki tárepini de massa m ge bólemiz, $k/m = \omega_0^2$ ekenligin eske túsiremiz hám jáne de $b/m = 2\gamma$ dep belgilep mınaday teńleme alamız:

$$w = -\omega_0^2 x - 2\gamma v + \frac{1}{m} \dot{G}_{\text{sirtqı}}.$$



Endi terbelislerdi sáwlelendiriw ushın qolaylı bolǵan grafikalıq usıldan paydalanamız. $x = V \cos \phi$ (terbelisler fazası ϕ arqalı belgilengen) shamasın V uzınlıǵına iye radius-vektordıń gorizontallıq kósherge túsirilgen proekciyası dep geometriyalıq jaqtan qarawǵa

boladı (*vektorlıq diagramma* dep atalatuǵın járdemshi sıızılmada, - gorizontallıq baǵıt penen sol vektor arasındadı múyesh) [qáteliklerge jol qoymaw maqsetinde bul radius-vektordıń fizikalıq shamaǵa sáykes keliwshi vektorǵa qatnası joq ekenligin atap ótemiz].

Joqarıda jazılǵan eń keyingi ańlatpa hár biri jiyiligi ω ǵa teń dáwirli túrde ózgeretuǵın, biraq hár qaysısı ushın hár qıylı fazalar awısıwına iye aǵzalardan turadı. Misal retinde $\dot{G}_{sirtqı} = \dot{G}_0 \cos \omega t$ sırtqı kúsh tiń fazası nolge teń bolatuǵın $t=0$ momentin qarayıq. Bunday jaǵdayda $\dot{G}_{sirtqı}/m$ shaması uzınlıǵı \dot{G}_0 bolǵan gorizontallıq baǵıttaǵı vektor menen sáwlelendiriledi (5-súwret). $\omega_0^2 x = \omega_0^2 V \cos(\omega t - \beta)$ shaması fazası boyınsha b shamasına keshigip terbeledi hám ol kúsh vektorına salıstırǵanda saat strelkası baǵıtına qarama-qarsı baǵıtta β múyeshine burılǵan uzınlıǵı $\omega_0^2 V$ ǵa teń vektor arqalı súwretlenedi. Tezleniw w (32-paragrafta kórgenimizdey) $\omega^2 V$ amplitudasına hám x tiń belgisine qarama-qarsı belgige iye boladı. Tezlik $v = \omega V$ ǵa teń amplitudaǵa iye boladı hám x tan fazası boyınsha $\pi/2$ ge alda júredi; $2\gamma v$ shaması x qa perpendikulyar, uzınlıǵı $2\gamma \omega V$ ǵa teń bolǵan vektor menen súwretlenedi.

$$\frac{F_{sirtkı}}{m} = w + \omega_0^2 x + 2\gamma v$$

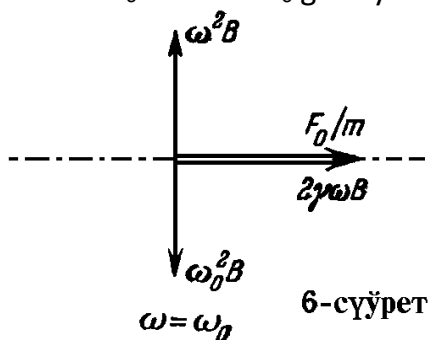
teńligine sáykes $\frac{F_{sirtkı}}{m}$ shamasınıń terbelisi teńliktiń oń tárepindegi úsh aǵzanıń terbelisleriniń qosındısınan turadı. Biziń grafigimizde bul keyingi úsh vektordıń gorizontallıq proekciyalarınıń qosındısınıń \dot{G}_0/m ge sáykes keliwiniń kerekligin bildiredi. Usınıń menen birge bul vektorlardıń vektorlıq qosındısınıń $\frac{F_{sirtkı}}{m}$ ǵa teń ekenligi óz-ózinen túsinikli. Súwrette (bul jerde $\omega > \omega_0$ hám $\omega < \omega_0$ jaǵdayları óz aldına keltirilgen) bunday teńliktiń

$$(2\gamma \omega V)^2 + V^2(\omega^2 - \omega_0^2)^2 = \left(\frac{F_0}{m}\right)^2$$

bolǵan jaǵdaylarda orınlanatuǵınlıǵı kórinip tur. Bunnan izlenip atırǵan terbelislerdiń amplitudasın tabamız:

$$V = \frac{F_0/m}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + 4\gamma^2 \omega^2}}.$$

Sol grafiklerdiń járdeminde β fazalıq awısıwın da tabıw múmkin. Onıń mánisi ushın arnawlı túrde ańlatpa jazbaymız, al májbúrlawshi kúshlerge salıstırǵandaǵı x terbelisleriniń keshigiw múyeshi $\omega < \omega_0$ hám $\omega > \omega_0$ ge sáykes súyir yamasa doǵal.



Biz májbúriy terbelislerdiń amplitudasınıń májbúrlawshi kúsh \dot{G}_0 diń shamasına tuwrı proporcional hám usı kúsh tiń jiyiligi ω menen sistemanıń menshikli jiyiligi ω_0 diń ayırmasına baylanıslı ekenligin kóremiz. Eger sóniw γ kishi bolsa, onda amplituda óziniń eń úlken mánisine ω menen ω_0 jiyilikleri shama menen birdey bolǵanda jetedi. Bunday jaǵdaydı *rezonans* dep ataymız. Maksimallıq mánis mınaǵan teń:

$$V_{\text{maks}} = \frac{F_0}{2m\omega_0\gamma}.$$

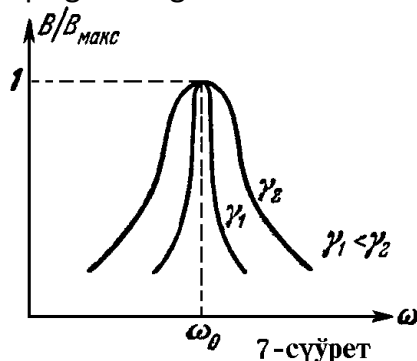
Bul mánis sóniw koefficienti γ ğa keri proporcional. Usıǵan baylanıslı sistemadaǵı súykelis júdá kishi bolsa da rezonansta onı esapqa alıw kerek boladı.

V_{maks} shamasın turaqlı (statikalıq) \dot{G}_0 bolǵan kúshtiń tásirindegi deneniń alatuǵın awısıwı menen salıstırıw qızıqlı. Bul awısıwdı (onı V_{stat} arqalı belgileymiz) V ushın jazılǵan ulıwmalıq formuladan ala alamız (bul jerde $\omega=0$ dep esaplaymız): $V_{\text{stat}} = \dot{G}_0/m\omega_0^2$. Rezonanslıq awısıwdıń statikalıq awısıwǵa qatnası:

$$\frac{V_{\text{maks}}}{V_{\text{stat}}} = \frac{\omega_0}{2\gamma}.$$

Biz rezonanstaǵı (statikalıq awısıwǵa salıstırǵandaǵı) terbelislerdiń salıstırmalı úlkeyiwi menshikli terbelisler jiyiliginiń sóniw koefficientine qatnasına teń ekenligin kóremiz. Kishi sóniwge iye sistemalar ushın bul qatnas júdá úlken mánislerge iye bolıwı múmkin. Bul jaǵday rezonanstıń ilim menen texnikadaǵı qanshama úlken áhmiyetke iye ekenligin ayqın túsindiredi. Eger terbelislerdi kúsheytiw kerek bolsa bul jaǵdaydan keńnen paydalanadı. Al rezonans keregi joq aqibetlerge alıp keletuǵın bolsa, onda onnan qutılıwǵa tırısadı.

Terbelislerdi rezonanslıq kúsheytiwdiń payda bolıwın bılayınsha túsiniwge boladı: májbúrllewshi kúsh $\dot{G}_{\text{májib}}$ penen v tezligi arasındadıǵı fazalar ayırmasına dıqqat awdaramız. $\omega \sim \omega_0$ jaǵdayında olar arasında fazalardıń belgili bir awısıwı orın aladı. Sonlıqtan terbelis dáwiri ishinde qanday da bir waqıt ishinde $\dot{G}_{\text{májib}}$ kúshi tezlikke qarama-qarsı baǵıtlanǵan, yaǵnıy qozǵalıstı ásteletiwge baǵdarlanǵan boladı. Rezonansta bolsa kúshtiń fazası menen tezliktiń fazası bir birine sáykes keledi (6-súwrettegi vektorlıq diagrammaǵa qarańız), yaǵnıy kúsh barlıq waqıtta da qozǵalıstı baǵıtında tásir etedi.



Rezonans qasında (yaǵnıy $|\omega - \omega_0|$ ayırması rezonanslıq jiyilik ω_0 den kishi bolǵan jaǵdaylarda) májbúriy terbelislerdiń amplitudası ushın jazılǵan formulanı ápiwayı túrge keltiriw múmkin. Bólimdegi $\omega^2 - \omega_0^2 = (\omega + \omega_0)(\omega - \omega_0)$ dep jazıp $\omega + \omega_0$ qosındısıń juwıq túrde $2\omega_0$ dep jazıp, $4\gamma^2\omega^2$ daǵı ω nı ω_0 menen almasırıp mınaday formulanı alamız:

$$V = \frac{F_0}{2m\omega_0\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + \gamma^2}}.$$

Bul formulanı bılayınsha da jaza alamız:

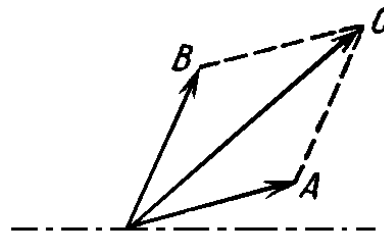
$$V = \frac{V_{\text{maks}}\gamma}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + \gamma^2}}.$$

Bul jerde $V_{\text{maks}} = \frac{F_0}{2m\omega_0\gamma}$ - rezonanstaǵı amplitudanıń maksimallıq mánisi.

7-súwrette bul formulaǵa juwap beretuǵın rezonanslıq iymeklikler keltirilgen (sóniw koefficienti γ nıń hár qıylı mánislerine sáykes keletuǵın terbelis amplitudalarınń jiyilikten ğárezziligi). $\omega - \omega_0$ ayırmasınıń absolyut mánisi γ ğa salıstırǵanda kishi bolǵanda V

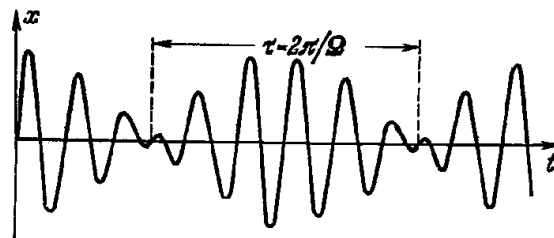
amplitudası óziniń maksimallıq mánisinen az ayrıladı. Amplitudanıń sezilerliktey kishireyiwi $|\omega - \omega_0| \approx \gamma$ bolǵanda baqlanadı. Usınday tiykarda "rezonanslıq iymekliktiń keńligi" γ shamasınday boladı dep aytadı. Berilgen G_0 diń mánisinde maksimumnıń shaması γ ǵa kerı proporcional. Sonlıqtan sóniw qanshama kishi bolsa, rezonanslıq iymeklik biyik hám ótkir boladı.

Joqarıda biz dáwirli sırtqı kúshtiń tásirinde turatuǵın sistemanıń qozǵalıwı májbúriy hám menshikli terbelislerdiń qosındısınan turadı dep aytqan edik. Eger menshikli terbelislerdiń hálisiz sóniwine itibar bermeytuǵın bolsaq, onda jiyilikleri ω hám ω_0 , amplitudaları A hám V bolǵan eki garmonikalıq terbelislerdiń qosılıwı orın aladı. Eger biz rezonansqa jaqın jaylasqan bolsaq, onda ω hám ω_0 jiyilikleri bir birine jaqın, yaǵnıy $|\omega - \omega_0|$ ayırması ω hám ω_0 ge salıstırǵanda kishi. Usınday jaǵdaydaǵı payda bolatuǵın qozǵalıstıń xarakterin qaraymız.



8-сүӊпет

Bul maqsette 8-súwrette kórsetilgendey vektorlıq diagrammadan paydalanamız. Súwrette hár bir terbelis óziniń vektorı A hám V menen sáwlelendirilgen. Waqıttıń ótiwi menen terbelislerdiń fazaları ózgeredi hám bul vektorlar ω hám ω_0 múyeshlik tezlikleri menen teń ólshewli aylanadı (bir dáwir T ishinde vektor tolıq bir ret aylanadı, yaǵnıy 2π múyeshine burıladı; onıń múyeshlik tezligi $2\pi/T$, yaǵnıy terbelistiń ciklıq tezligine sáykes keledi). Qosındı terbelis eki vektordıń geometriyalıq qosındısı bolǵan S vektorı menen sáwlelendiriledi. Bul vektorlıq uzınlıǵı A hám V vektorlarınıń uzınlıqlarınday turaqlı bolıp qalmaydı, al waqıtqa baylanıslı ózgeredi (sebebi ω hám ω_0 múyeshlik tezlikleriniń ayırmasına baylanıslı A hám V vektorları arasındaǵı múyesh ózgeredi). S vektorınıń uzınlıǵınıń ózgeriwiniń $S_{\text{maks}} = A + V$ (A hám V vektorlarınıń baǵıtları birdey) hám $S_{\text{min}} = |A - V|$ (A hám V vektorlarınıń baǵıtları qarama-qarsı) sheklerinde bolatuǵınlıǵı óz-ózinen túsinikli. Bunday ózgeris dáwirli túrde Ω jiyiligi menen boladı (A hám V vektorlarınıń bir birine salıstırǵandaǵı aylanıwınıń múyeshlik tezligi usı shamaǵa teń).



9-сүӊпет

Biz qarap atırǵan bir birine jaqın bolǵan ω hám ω_0 jiyiliklerinde A hám V vektorları tez aylanadı, usınıń menen birge bir birine salıstırǵanda áste-aqırınlıq penen burıladı. Qosındı vektor S nıń ózgerisin jiyiligi $\omega \approx \omega_0$ bolǵan jiyilikte (ω menen ω_0 arasındaǵı ayırmanı esapqa almaymız) teń ólshewli aylanıw menen onıń uzınlıǵınıń Ω jiyiligindegi áste-aqırınlıq penen ózgerisinen turadı dep qaraw múmkin. Basqa sóz benen aytqanda payda bolǵan qozǵalıw amplitudası áste-aqırınlıq penen ózgeretuǵın qozǵalıw bolıp tabıladı.

Bir birine jaqın bolğan terbelislerdiń qosılıwınıń nátiyjesinde payda bolğan terbelistiń amplitudasınıń dáwirli túrde ózgeriwiniń soǵıw, Ω jiyiligin soǵıwdıń jiyiligi dep ataydı. 9-súwrette $A=V$ bolğan jaǵdaydaǵı soǵıw keltirilgen.

§ 36. Parametrlilik rezonans

Sónbeytuǵın terbelisler tek ǵana sırtqı dáwirli kúshlerdiń tásirinde payda bolıp qoymay, terbeliwshi sistemanıń parametrleri dáwirli túrde ózgergende de payda boladı. Terbelislerdi usınday etip qozdırdıwdı *parametrlilik rezonans* dep ataydı. Mısal retinde átkónshekte terbelip atırǵan adamdı kórsetiw múmkin. Ol belgili bir izbe-izlikte otıradı hám tiklenedi hám sonday jol menen sistemanıń salmaq orayın dáwirli túrde ózgerterdi.

Usınday etip terbelislerdi qozdırdıwdıń mexanizmin anıqlaw ushın ápiwayı misal retinde uzınlıǵın ózgeriw múmkin bolğan mayatnikti qaraymız. Bunı 10-súwrette kórsetilgendey blok arqalı asılǵan jaǵday járdeminde ámelge asırıw múmkin. Meyli mayatnik óziniń teńsalmaqlıq (vertikallıq) awhalı arqalı ótkende mayatnik sırtqı G kúshiniń tásirinde mayatniktiń uzınlıǵı l den kishi bolğan bazı bir a aralıǵına kóterilsin hám eń aqırǵı awhallarda sabaq sonday a uzınlıǵına uzartılatuǵın bolsın. Demek hár bir dáwir ishinde mayatnik eki ret uzaradı hám eki ret keltertiledi; basqa sóz benen aytqanda parametrdiń (mayatniktiń uzınlıǵınıń) dáwirli ózgerisiniń jiyiligi onıń menshikli terbelisiniń jiyiliginen eki ese úlken boladı.

Mayatniktiń uzarıwı onıń qıya jaǵdayında júzege keletuǵın bolǵanlıqtan usı momentte ol $a \cdot \cos \omega_0$ uzınlıǵına tómén túsedı (ω_0 arqalı mayatniktiń terbelisiniń múyeshlik amplitudası belgilengen). Bul uzınlıq sabaq tartılǵanda mayatniktiń kóteriliw aralıǵı a dan kishi. Sonlıqtan hár sabaqtı bir tartqanda hám jazdıǵanda sırtqı kúshler salmaq kúshine qarsı

$$mgh(1 - \cos \phi_0) \approx \frac{1}{2} m g a \phi_0^2$$

jumısın isleydi (bul jerde ω_0 múyeshin kishi dep esaplaymız hám sonlıqtan $\cos \phi_0 \approx 1 - \frac{1}{2} \phi_0^2$).

Bunıń menen birge sırtqı kúsh G mayatniktiń eń tómengi awhalında shaması $\frac{mv_0^2}{l}$ ge, al shetki jaǵdaylarda (bul awhalda tezlik nolge teń) nolge teń bolğan oraydan qashıwshi (sabaqtı keriwshi) kúshke de qarsı jumıs isleydi. Solay etip mayatniktiń bir terbeliw dáwiri ishinde sırtqı kúshniń islegen jumısı mınaǵan teń boladı:

$$A = 2 \left(\frac{1}{2} m g a \phi_0^2 + \frac{mv_0^2}{l} a \right).$$

Biraq $v_0 = l \phi_0 \omega$, mayatniktiń terbelis jiyiligi $\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$. Sonlıqtan

$$A = 6 \frac{a}{l} \frac{mv_0^2}{2}.$$

Biz bul jerde sırtqı kúshler tárepinen mayatnik ústinen islengen jumıstıń oń mániske iye hám onıń energiyasına proporcional bolatuǵınlıǵın kóremiz. Sonlıqtan mayatniktiń energiyası hár bir terbelis dáwirinde sistemalı túrde ósedı. Energiyanıń bul ósiminiń shaması energiyanıń ózine hám $\frac{a}{l}$ shamasına proporcional. Parametrlilik rezonanstıń mexanizminiń mánisi usılardan ibarat boladı. Terbeliwshi sistemanıń parametrlerininiń dáwirli ózgerisi (usı sistemanıń menshikli jiyiliginen eki ese úlken jiyiliktegi) onıń ortasha

energiyası E niń sistemalı túrde ósiwine alıp keledi, sonıń menen birge usı energiyanıń ósiw tezligi E ge proporcional:

$$\frac{dE}{dt} = 2\chi E.$$

Bul jerde χ arqalı bazı bir (kishi) koefficient belgilengen. Bul qatnas sóniwshi terbelislerdegi qatnastı eske túsiredi, biraq házirgi jaǵdayımızda $\frac{dE}{dt}$ tuwındısı oń mániske iye. Bul terbelis energiyanıń (sonıń menen birge amplitudasınıń da) waqıtqa baylanıslı eksponencial túrde ósetuǵınlıǵın bildiredi.

Haqıyqatında terbelislerdi sóndiriwge qaray umtılatuǵın bazı bir súykelis barlıq waqıtta da qatnasadı. Sonlıqtan terbelislerdiń parametrlik qozıwınıń júzege keliwi ushın kúsheytiw koefficienti χ súykelistiń nátiyjesinde sóniw koefficientinen úlken bolıwı kerek.

Biz dáwirli túrde ózgeretuǵın sırttan túsirilgen tásirde sistemadaǵı májbúriy terbelislerdiń payda bolıwın qaradıq. Sonıń menen birge terbelisler dáwirli túrde ózgeretuǵın kúshlerdiń tásirinde emes, al turaqlı energiya dereginiń tásirinde de payda boladı. Bul derek terbelislerdiń sóniwine alıp keletuǵın energiyanı turaqlı túrde kompensaciyalap baradı. Buǵan mısál retinde mexanikalıq saattı kórsetiwge boladı. Saatta energiya deregi bolıp qısılgan prujina yamasa kóterilgen girler xızmet atqaradı.

V BAP. ZATLARDYŇ QURBYLISY

§ 37. Atomlar

Biz bul jerde atom fizikasınıń máselelerin tolıq bayanlawdı názerde tutpaymız. Fizikanı bunnan keyin úyreniw ushın zárúrli bolǵan zatlardıń qurılısı haqqındaǵı tiykarǵı maǵlıwmatlardı bayanlaymız.

Málim, barlıq deneler bazı bir, kóp sanlı emes ápiwayı zatlardan – *ximiyalıq elementlerden* turadı. Hár bir elementtiń eń kishi bólekshesi *atom* bolıp tabıladı.

Atomlardıń massaları júdá kishi. Sonlıqtan onı grammlarda emes, al arnawlı birliklerde ólshegen qolaylı boladı. Usınday birlik retinde eń kishi massaǵa iye bolǵan vodorod atomınıń massasın saylap alǵan tábiyiy. Biraq atomlıq salmaqlardıń dál etalonı retinde vodorod atomı emes, al ximiyalıq jaqtan paydalanıw ańsat bolǵan kislorod atomı alınadı. Kislorod atomı vodorod atomınan shama menen 16 ese salmaqlıraq hám atomnıń salmaǵınıń birliǵi retinde bul atomnıń massasınıń 1/16 bólegi alınadı (bul anıqlamaǵa 38-paragrafta tolıǵıraq anıqlıq endiriledi). Usınday birlikte ańlatılǵan qanday da bir element atomınıń massasın elementtiń atomlıq salmaǵı dep ataladı hám ádette A háripi menen belgilenedi. Vodorodtıń atomlıq salmaǵı 1.008 ge teń.

Grammlarda ańlatılǵan atomnıń massası onıń atomlıq salmaǵına proporcional. Sonlıqtan, eger qanday da bir elementtiń atomlıq salmaǵına teń grammın alsaq (basqa sóz benen aytqanda elementtiń *gramm-atomın*), onda zattıń usınday muǵdarındaǵı atomlardıń sanı barlıq elementler ushın birdey boladı. Bul san *Avagadro sanı* dep ataladı hám mınaǵan teń:

$$N_0 = 6.02 \cdot 10^{23}.$$

Demek atomlıq salmaǵı A ǵa teń atomnıń massası

$$m_A = \frac{A}{N_0} = 1,66 \cdot 10^{-24} g.$$

Atom elementtiń eń kishi bólekshesin quraytuǵın bolsa da. onıń ózi quramalı qurılısqa iye boladı. Atom oń zaryadlangan salıstırmalı awır *atom yadrosınan* hám onıń

dógereginde aylanıp júriwshi teris zaryadqa iye bóleksheler bolğan *elektronlardan* turadı. Elektronlar atomnıń *elektronlıq qabıǵın* payda etedi dep esaplaydı. Hár qıylı atomlardıń yadroları bir birinen ayrıladı, al elektronlar bolsa absolyut birdey.

Elektronnıń massası yadronıń massasınan mırñağan ese kishi. Sonlıqtan atomnıń derlik barlıq massası yadroda toplanǵan. YAdrolardıń ishindegi eń jeńili vodorod atomnıń yadrosı bolıp, ol tek bir protonnan turadı hám onıń massası elektronnıń massasınan 1837 ese úlken. Absolyut mánisi boyınsha elektronnıń massası mınağan teń:

$$m = 9.11 \cdot 10^{-28} \text{ g.}$$

Sonıń menen birge yadro atomnıń oǵada kishi kólemin iyeleydi. Atomnıń radiusı, yaǵnıy elektron qozǵalıp júretuǵın yadro dógeregindegi oblasttıń radiusı shama menen 10^{-8} sm. YAdrolardıń radiusı atomnıń radiusınan onlağan mır ese kishi, 10^{-13} penen 10^{-12} niń aralıǵında.

Absolyut shaması boyınsha elektronnıń zaryadı

$$e = 4.80 \cdot 10^{-10} \text{ SGSE zaryad birliği} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ k.}$$

Kóp jaǵdaylarda Avagadro sanı menen elektronnıń zaryadınń kóbeymesi menen jumıs islewge tuwrı keledi (yaǵnıy bir "gramm-elektronnıń" zaryadı). Bul kóbeyme *Faradey turaqlısı* dep ataladı hám mınağan teń:

$$G = eN_0 = 9.65 \cdot 10^4 \text{ k.}$$

Atom tutası menen alǵanda elektrlik jaqtan neytral, onıń tolıq zaryadı nolge teń. Basqa sóz benen aytqanda yadronıń oń zaryadı onıń dógereginde aylanıwshi elektronlardıń teris zaryadı menen tolıq kompensaciyalanadı. Bul yadronıń zaryadınń elektronnıń zaryadınan pútın san ese úlken bolatuǵınlıǵın ańlatadı. Elektronnıń zaryadınń shaması *elementar zaryad* bolıp tabıladı~ al tábiyatta bar zaryadlangan bólekshelerdiń zaryadları usı zaryadtan pútın san ese úlken boladı. Bul jaǵday materiyanıń eń tereń qásiyetleriniń biri bolıp tabıladı.

Elektronnıń zaryadı birliginde anıqlanǵan yadronıń zaryadı elementtiń *atomlıq nomeri* dep ataladı hám ádette Z háripi menen belgilenedi. YAdronıń zaryadı elektronlardıń zaryadları menen tolıq kompensaciyalanatuǵın bolǵanlıqtan elektron qabıǵındaǵı elektronlardıń sanı da Z ke teń. Idettegi jaǵdaylarda atomlardıń barlıq qásiyetleri onıń elektronlıq qabıqları menen anıqlanadı. Bunday qásiyetlerge zatlardıń ximiyalıq hám optikalıq qásiyetleri jatadı. Usınnan atomlıq nomerdiń atomnıń tiykarǵı qásiyetlerin táriyipleytuǵınlıǵı óz-ózinen túsiniqli. Mendeleevtiń dáwirlik sistemasındaǵı elementlerdiń jaylasıwı atomlardıń nomerleriniń úlkeyiw barısında hám bul sistemadaǵı atomlardıń nomerleri olardıń qatar nomerleri menen birdey boladı.

Atomlardıń qurılısın anıqlaytuǵın óz-ara tásirlesiw kúshleri tiykarınan elektronlardıń yadrolar hám óz-ózi menen elektrlik tásirlesiwı bolıp tabıladı: elektronlar yadro menen tartısa hám bir biri menen iyterisedi. Basqa kúshler (mısalı magnitlik) atomda ekinshi dárejeli áhmiyetke iye. YAdronıń zaryadı, sonıń menen birge elektronlar qozǵalatuǵın elektr maydanı atomlıq nomer menen anıqlanadı. bul jerde atomlıq nomerdiń atomnıń qásiyetin anıqlawdaǵı fundamentallıq ortı jáne bir ret kórinedi.

Atomda gravitaciyalıq tásirlesiw hesh qanday orındı iyelemeydi. Haqıyqatında da, mısalı, bir birinen r qashıqlıǵında turǵan eki elektronnıń elektrlik tásirlesiwiniń energiyası e^2/r ge, al sol elektronlar arasındaǵı gravitaciyalıq tásir etisiw energiyası Gm^2/r ge teń. Usı eki shamanıń qatnası

$$\frac{Gm^2}{e^2} = 2,3 * 10^{-43}.$$

Bul oğada kishi san. Sonlıqtan atomdağı gravitaciyalıq tásirlesiw haqqında aytıw hesh bir mániske iye bolmaydı.

Atomlardıń qásiyetlerin klassikalıq mexanikanıń járdeminde anıqlaw pútkilley múmkin emes. Bul mexanika atomnıń qurılısın ǵana emes, al onıń ornıqlı sistema ekenligi faktın da túsindire almaydı. Klassikalıq mexanika júdá kishi massaǵa iye bolǵan elektronlar sıyaqlı bólekshelerdiń atomlardıń aymaǵındaǵıday sıyaqlı kishi kólemlerdegi qozǵalısların túsindiriwge pútkilley jaramaytuǵın bolıp shıqtı. Atomlıq qubılıslar kvant mexanikası dep atalıwshı basqa mexanikanıń nızamları tiykarında túsindiriledi.

Neanday da bir sırtqı tásirlerde atom elektron qabatınan bir yamasa bir neshe elektronın joǵaltıwı múmkin. Bunday jaǵdayda biz elektrlik jaqtan neytral emes. al zaryadlangan atomlıq bóleksheni – oń zaryadlangan *iondı* alamız. Atomdağı eń shette turǵan birinshi elektrondı atomnan bólip alıw ushın zárúrli bolǵan energiyanı atomnıń *ionizaciyalıq potencialı* dep ataydı.

Atomlıq qubılıslardaǵı energiyanı ólshew ushın ádette ayırıqsha birliklerden paydalanadı, sebebi bunday maqsetler ushın *erg* dım úlken shama bolıp tabıladı. Bul shama potenciallar ayırması 1 volt bolǵan elektr maydanında ótkende elektron alatuǵın energiyaǵa teń. Energiyanıń usınday birliǵı *elektron-volt (ev)* dep ataladı. Elektr maydanı tárepinen islengen jumıs zaryad penen potenciallar ayırmasınıń kóbeymesine teń bolǵanlıqtan, al 1 volt bolsa potencialdıń SGSE birliǵiniń 1/300 in quraydı, sonlıqtan

$$1 \text{ ev} = 4.80910^{-10} \frac{1}{300} \text{ erg} = 1.60910^{-12} \text{ erg}.$$

Elektron-voltlarda atomnıń ionizaciyalıq potencialı da ólshenedi. Ionizaciyalıq potenciallardıń mánisleri 3.89 ev tan (ceziy atomında) 24.6 ev (geliy ushın) ózgeredi. Vodorod atomınıń ionizaciyalıq potencialı 13.6 ev qa teń.

Eger atomnıń ionizaciyalıq potencialın atomlıq nomerdiń potencialı dep qaraytuǵın bolsaq, onda bul funkciyanıń ózine tán dáwirli qásiyetiniń bar ekenligin kóremiz. Bul shama Mendeleev kestesiniń hár bir dáwirinde shama menen bir tekli bolıp monotonlı ósedi hám inert gazinde óziniń úlken mánisine jetedi. Kelesi dáwirdiń basında ionizaciyalıq potencialdıń mánisi keskin túrde kishireydi. Bul atomlardıń dáwirlik qásiyetleriniń kóriniwiniń eń baslı mısallarınıń biri bolıp tabıladı hám sonlıqtan Mendeleevtiń kestesiniń ózi de dáwirli keste dep ataladı.

Ionizaciyalıq potencialdıń shaması atomdağı sırtqı elektronlardıń baylanıs energiyasın táriyipleydi. Ishki elektronlar (elektron qabıǵında tereńde jaylasqan elektronlar) úlken baylanıs energiyalarına iye boladı. Tereń elektronlıq qabıqlarda jaylasqan elektronlardı atomnan julıp alıw ushın zárúrli bolǵan energiyanıń mánisi quramalı atomlarda 10^4 - 10^5 ev qa jetedi.

Oń zaryadlangan ionlardan basqa teris zaryadlı atomlıq ionlar boladı. Olar ózine artıq elektrondı qosıp aladı. Biraq atomlardıń barlıǵı da artıq elektrondı qosıp alıw qábiletligine iye bola almaydı. Bunday jaǵdayda atomdı artıq *elektronǵa tuwıslıq* qásiyetine iye dep aytaı. Teris zaryadlangan iondı tek galoidlar toparınıń elementleri (F, Cl, Br, I), vodorod hám kislorod toparınıń elementleri (O, S, Se, Te) payda ete aladı. Bul elementlerdegi elektronǵa tuwıslıq hár qıylı – eń úlkeni galoidlarda, eń kishisi vodorodta. Vodorodta teris zaryadlangan iondaǵı baylanıs energiyası shama menen 0.1 ev tı quraydı.

Ionlardı ximiyalıq elementlerdiń simvolına + yamasa – belgisin qosıp belgilew qabil etilgen. Sonıń menen birge bul belgiler ionnıń zaryadı qanshama bolsa, sonsha ret qaytalanadı: N^+ , Sl^- h.t.b.

§ 38. Izotoplar

Atomlardıń yadroları ulıwma túrde aytqanda kóp bólekshelerden turatuǵın quramalı qurılısqa iye boladı. YAdronıń quramalıq bólekleri vodorod atomnıń yadrosı *proton* hám *neytron* bolıp tabıladı. Neytronnıń massası shama menen protonnıń massasında, al ol protonnan elektr zaryadınıń joqlıǵı menen ayrıladı. YAdrodaǵı protonlar menen neytronlardıń ulıwmalıq sanı *massalıq san* dep ataladı. YAdronıń zaryadı usı yadrodaǵı protonlardıń zaryadı menen anıqlanatuǵın bolǵanlıqtan hám, eger protonnıń zaryadın e elementar zaryadında ańlatılsa yadronıń zaryadı protonlardıń sanına teń boladı. Sonlıqtan yadrodaǵı protonlardıń sanı atomlıq nomer Z ke sáykes keledi. YAdrodaǵı bólekshelerdiń qalǵan bólegin neytronlar quraydı.

YAdrodaǵı bóleksheler elektrlik tábiyatqa iye bolmaǵan specifikalıq kúshler menen uslasıp turadı. Bul tásir etisiw oǵada kúshli, al yadrodaǵı bólekshelerdiń baylanıs energiyası onlaǵan million elektron-voltler menen ólshenedi, yaǵnıy atomdaǵı elektronlardıń energiyasına salıstırǵanda júdá úlken. Sonlıqtan yadrolıq jaqtan kelip shıqpaǵan barlıq qubılıslarda atom yadroları hesh qanday ózgerislerge ushıramaydı hám ózlerin belgili bir massaǵa hám zaryadqa iye bólekshe sıpatında kórsetedi.

Biz joqarıda atomnıń qásiyetiniń yadronıń zaryadı menen anıqlanatuǵınlıǵın atap ótken edik. YAdronıń massası ekinshi dárejeli orındı iyeleydi. Bul jaǵday birdey atomlıq nomerge, biraq hár qıylı massaǵa iye atomlarda ayqın kórinedi.

Hár bir ximiyalıq elementtiń atomları birdey emes bolıp tabıladı~ birdey sandaǵı elektronlarǵa iye bolıwı menen olar massaları hár qıylı, zaryadları birdey yadrolarǵa iye bolıwı múmkin. Bir elementtiń usınday hár qıylı túrleri *izotoplar* dep ataladı. Berilgen elementtiń barlıq izotopları ximiyalıq qásiyetleri boyınsha birdey, sonıń menen birge fizikalıq qásiyetleri boyınsha da olar bir birine jaqın. Hár qıylı elementlerdegi tábiyiy túrde bar izotoplardıń sanı da hár qıylı: bul san birden (Ve, Ğ, Na, Al h.b.) ońa (qalayıda) ózgeredi¹.

Jerde bar elementler belgili bir qatnaslardaǵı hár qıylı izotoplardıń aralaspasınan turadı. Ximiyalıq elementlerdiń kestelerinde keltirilgen atomlıq salmaqlar belgili bir izotoptıń dál salmaǵı emes, al ádette bul aralaspalardıń ortasha salmaǵı bolıp tabıladı (bunday atomlıq salmaq haqqında aytqanda ximiyalıq atomlıq salmaq názerde tutiladı). Izotoplardıń atomlıq salmaqlarınıń mánisleri pútin sanlarǵa júdá jaqın – olardan júzden yamasa mıńnan birge ayrıladı. Ortasha (ximiyalıq) atomlıq salmaqlardıń mánisleri pútin sannan hár qıylı bolıp ayrılıwı múmkin.

Usı ayılǵanlarǵa baylanıslı joqarıdaǵı atomlıq salmaqtı kislorodtıń atomlıq salmaǵınıń 1/16 bólegindey etip alıwǵa anıqlıq kirgizemiz. Kislorodtıń úsh izotopı bar: O^{16} , O^{17} hám O^{18} (atomlıq salmaqtı, dáliregi massalıq sandı ximiyalıq elementtiń simvolındaǵı joqarǵı indeks sıpatında jazıw qabil etilgen). Bul izotoplardıń eń kóp tarqalǵanı O^{16} , al O^{17} hám O^{18}

¹ Qátellikke jol qoymaw ushın biz bul jerde tek tábiyatta bar tábiyiy izotoplar haqqında gáp etip atırǵanımdı atap ótemiz. Al jasalma jollar menen kóp sanlı izotoplardı da alıw múmkin. Olardıń yadroları turaqlı bolmaydı hám ózinen ózi ıdıraydı.

bolsa tábiyiy aralaspalarda sáykes 0.04 hám 0.2 % muǵdarında ushırasadı. Bul muǵdar kishi bolsa da, atomlıq salmaqtı dál anıqlaǵanda áhmiyetli boladı.

Izotoplardıń tábiyiy aralıspasınıń ortasha atomlıq salmaqların 16 ǵa teń dep qabil etilgen tábiyiy kislorodtıń atomlıq salmaǵına salıstırıp anıqlaw qabil etilgen (atomlıq salmaqlardıń bunday shkalasın ximiyalıq atomlıq salmaqlar shkalası dep te ataydı). YAdrolıq fizikada bolsa ayırım izotoplardıń dál atomlıq salmaǵın anıqlaw ushın O^{16} izotopınıń atomlıq salmaǵın dál 16 ǵa teń dep qabil etedi hám bul shamanı birlik retinde qabil etedi (bunı atomlıq salmaqlardıń fizikalıq shkalası dep ataydı). Bul ximiyalıq shkaladaǵıǵa qaraǵanda 0.027 % ke kishi.

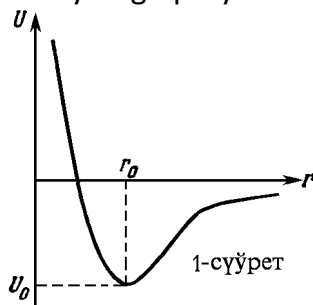
Atomlıq salmaqlardıń eki shkalasın qollanıw biraz qolaysızlıqlarǵa alıp keledi. Usıǵan baylanıslı házirgi waqıtları jańa shkalaǵa ótiw usınılǵan. Bul shkalada uglerodtıń S^{12} izotopınıń atomlıq salmaǵı 12 ge teń dep qabil etiledi. Bul shkalaǵa ótiw ximiyalıq atomlıq salmaqlardı kishi shamaǵa - 0.0043 % ke úlkeytiw menen ǵana baylanıslı.

Dáwirlik sistemanıń birinshi elementi vodorod tábiyiy eki izotopqa iye: atomlıq salmaǵı 1 ge teń tiykarǵı tábiyiy izotopınan basqa vodorod atomlıq salmaǵı 2 ge teń de izotopqa iye. Tábiyiy vodorodta bir atom N^2 ge 6000 N^1 atomı sáykes keledi. Vodorodtıń "awır" izotopın D háripi menen belgileydi hám *deyteriy*, al bul izotoptıń atomınıń yadrosın *deytron* dep ataydı. Vodorodtıń usı eki izotopınıń massaları arasındaqı qatnas 2 ge teń bolǵanlıqtan (bul salıstırmalı úlken shama) olardıń fizikalıq qásiyetleri arasındaqı ayırma da basqa elementlerdiń atomlıq salmaqları bir birine jaqın izotoplarınıń fizikalıq qásiyetleri arasındaqı ayırmadan úlken boladı. Mısalı quramına vodorodtıń awır izotopı bolǵan "awır suw" D_2O 3,8 $^{\circ}S$ da qatadı ($0^{\circ}S$ nıń ornına) hám 101,4 $^{\circ}S$ da qaynaydı (100 $^{\circ}S$ nıń ornına).

Kelesi element geliy de eki izotopqa iye: Ne^3 hám Ne^4 . Olardıń ishinde eń kóp tarqalǵanı Ne^4 bolıp tabıladı. Ne^3 atomları bolsa tábiyatta júdá siyrek ushırasadı (Ne^3 tiń bir atomnına Ne^4 tiń shama menen 10^6 atomı sáykes keledi). Biraq Ne^3 izotopı jasalma túrde yadrolıq fizikanıń usılları járdeminde kóp muǵdarda alınıwı múmkin.

§ 39. Molekulalar

Hár qıylı elementlerdiń atomları bir biri menen molekulardı payda etip birigiwi múmkin. Molekulalardıń payda bolıwına alıp keletuǵın atomlar arasındaqı tásir etisiw kúshleri de (bunday tásirlesiwdi ádette *ximiyalıq tásirlesiw* dep ataydı) atomnıń óziniń ishindegi kúshlerdey elektrlik tábiyatqa iye. Biraq atomlardıń qurılıs sıyaqlı, molekulalardıń payda bolıwı da kvant qubılısları kategoriyasına kiredi hám klassikalıq fizikanıń nızamları tiykarında túsindiriliwi múmkin emes. Biz bul jerde usı tásirlesiwdiń tábiyatına tereń kirmey, tek bazı bir tiykarǵı qásiyetlerin táriyipleymiz.



Eki atomnan turatuǵın molekula (eki atomnıń birdey bolıwı da yamasa hár qıylı bolıwı da múmkin) eń ápiwayı molekula bolıp tabıladı. Bunday molekulanıń payda bolıwına alıp keletuǵın atomlar arasındadıǵı tásirlesiw potencial energiya menen táriyiplenedi. Usınday potencial energiyanıń grafıǵı 1-súwrette keltirilgen. Bul grafikte bir biri menen tásirlesiwshi eki atomnıń potencial energiyası U olar arasındadıǵı qashıqlıq (durısıraqı atomlardıń yadroları arasındadıǵı qashıqlıq) r dıń funkciyası sıpatında kórsetilgen. Bul funkciya qashıqlıqtıń $r=r_0$ mánisinde tereń hám ayqın kóriniwshi minimumǵa iye boladı. Kishi aralıqlarda iymeklik derlik tikkeley joqarı kóteriledi~ bul oblast bir birine jaqınlasıwshi yadrolar arasındadıǵı kulonlıq iyterisiwge juwap beretuǵın atomlar arasındadıǵı tásirlesiwge sáykes keledi. :lken aralıqlarda bolsa atomlar tartısağı.

r_0 aralıǵı molekuladaǵı yadrolardıń ornıqlı teń salmaqlıq halına sáykes keledi. Haqıyqatında yadrolar bul awhallarda turmaydı, al sol orınlar átirapında terbeliste boladı. Bul terbelislerdiń amplitudaları úlken emes. Potencial shuqırdıń tereńligi U_0 atomlardıń molekuladaǵı baylanısınń bekkemligin táriyipleydi (dálirek aytqanda molekuladaǵı atomlardı bir birinen ayırıp jiberiw ushın kerek bolǵan baylanıs energiyasın beredi~ bul energiyanıń mánisi yadrollardıń terbelisiniń orın alıwınıń nátiyjesinde U_0 den azmaz ózgeshe boladı).

Kelesi kestede bir neshe eki atomlı molekulalar ushın r_0 dıń (angstremlerde, $1\text{Å} = 10^{-8}\text{ sm}$) hám U_0 (elektron-voltlerde) mánisleri berilgen.

Molekulalar	N ₂	O ₂	Sl ₂	N ₂
r_0	0.75	1.2	2.0	1.1
U_0	4.5	5.1	2.5	7.4

Eki atomlı molekulalardı uzınlıǵı r_0 bolǵan gantel sıpatında qarawǵa boladı. Kóp atomlı molekulalar quramalıraq qurılısqa iye.

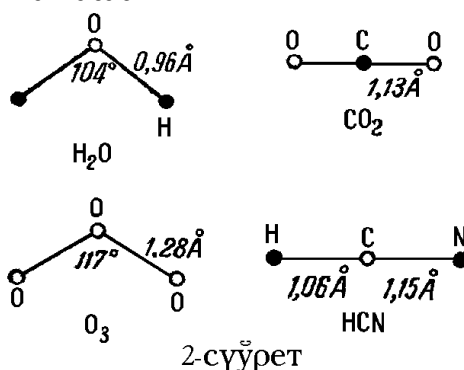
2-súwrette bazı bir úsh ólshemli molekulalardaǵı yadrolardıń awhalları keltirilgen (olar arasındadıǵı qashıqlıqlar angstremlerde berilgen). Bul molekulalardıń birewleri úsh múyeshlik (N₂O hám O₃ molekulaları), basqaları tuwrı sızıqtıń boyında (uglerod okisi SO₂ hám sinil kislotası NSN). 40 paragrafta biz quramalıraq bolǵan molekulalarǵa bir neshe mısallar keltiremiz.

Biz molekulalarda yadrolar arasındadıǵı qashıqlıqtıń shama menen 10^{-8} sm , yaǵnıy atomlardıń ózleriniń ólshemlerine teń ekenligin kórdik. Basqa sóz benen aytqanda molekulalardaǵı atomlar bir birine tıǵız jaqınlasqan. Sonlıqtan molekulada hár qıylı atomlardıń elektronlıq qabıqların sheklewge bolmaydı. Elektronlar qabıǵınıń ishki oblastları atomlar molekulalarǵa birikkende aytarlıqtay ózgeriske ushıramaytuǵın bolsa da, sırtqı elektronlardıń qozǵalıısı kúshli ózgeredi. Nqala berse, atomlar tárepinen bunday elektronlar kollektivlestiriledi.

Bazı bir molekulalarda elektronlar qabıǵınıń sırtqı bólimleri bilayınsha elektronlardıń tarqalıwı bilayınsha boladı: bazı bir yadrolar átirapında elektronlardıń sanı neytral atomlardaǵı elektronlar sanınan kóp, al bazı bir yadrolardıń átirapında elektronlar sanı neytral atomlardaǵı elektronlar sanınan kemirek boladı~ bunday molekulalar ionlardan turadı (mısalı KSl molekulası oń zaryadlanǵan K⁺ hám teris zaryadlanǵan Sl⁻ ionınan turadı). Basqa jaǵdaylarda (mısalı N₂, O₂ NSl) atomlar molekulalarda ortasha elektrlik jaqtan

neytral bolıp qaladı). Biraq bul ayırma tek sanlıq xarakterge iye boladı hám joqarıda keltirilgen eki situaciya aralıǵında oǵada kóp sanlı aralıqlıq jaǵdaylardıń orın alıwı múmkin.

Ximiyalıq tásirlesiwdiń xarakterli ayırmashılıǵınıń biri onıń *toyınıwı* bolıp tabıladı. Bul bir biri menen baylanıs dúzgen atomlardıń basqa atomlar menen baylanıs dúziw qábilettiliginiń tolıq joǵalıwın ańlatadı.



Hár qıylı molekulalar da bir biri menen tásir etisedi~ bunday tásir etisiwdi *van-der-vaals tásir etisiwi* dep ataydı (molekulardıń payda bolıwına alıp keletuǵın ximiyalıq baylanıstan basqa).

Eki molekulanıń tásir etisiwin joqarıda atomlar ushın kórsetkenimizdey ápiwayı túrde $U=U(r)$ iymekligi járdeminde kórsetiw múmkin emes. Sebebi molekulardıń bir birine salıstırǵandaǵı jaylasıwları kóp sandaǵı parametrlerge baylanıslı bolıwı múmkin: molekulalar arasındaǵı qashıqlıq r den basqa bul jerde molekulalar arasındaǵı óz-ara orientaciya da úlken orın tutadı. Eger molekulalar arasındaǵı tásirlesiwdi barlıq orientaciya boyınsha ortalastırılǵan dep alıńǵan bolsa, onda tásirlesiw $U=U(r)$ túrindegi iymeklik járdeminde beriliwi múmkin.

Bul iymeklik molekuladaǵı atomlar arasındaǵı tásirlesiw iymekligine tek ǵana mınaday jaǵdaylarǵa baylanıslı uqsas: úlken qashıqlıqlarda molekulalar bir birine tartıladı, al kishi aralıqlarda iyterisedi. Molekulalar arasındaǵı tartılıs kúshleri qashıqlıqtıń ósiwi menen tez kemeyedi. Molekulalar bir birine jaqınlasqanda da iyterisiw kúshleri tez úlkeyedi~ molekulalar jaqınlasqanda qattı, biriniń ishine biri kirmeytuǵın denelerdey qásiyet kórsetedi. Van-der-vaals tásirlesiw iymekligindegi minimumnıń tereńligi júdá az~ onıń mánisi elektron-volttıń onnan, hátte júzden birine teń (68-paragraftı qarańız). Al ximiyalıq baylanıstaǵı tásirlesiw iymekligindegi potencial shuqırdıń tereńligi bir neshe elektron-volttı quraydı.

Joqarıda keltirilgen eki túrli tásirlesiwdegi van-der-vaals tásirlesiwiniń jáne bir ayırmashılıǵı sonnan ibarat, van-der-vaals tásirlesiwinde ximiyalıq tásirlesiwdegidey toyınıw orın almaydı. Van-der-vaals tásirlesiw barlıq molekulalar arasında orın aladı (mısalı qálegen eki molekula bir birine jaqınlassa usınday tásirlesiwdiń sebebinen olar bir birine tartıladı). Sonlıqtan molekulalıq tartısıw kúshleri "asa molekulardıń" payda bolıwına alıp kelmeydi, al tek molekulardıń bir birine jaqınlasıwǵa tırısıwın (umtılıwın) támiyinleydi. Bunday umtılıw zatlardıń kondensaciyalanǵan halǵa (suyıq hám qattı) ótiwin támiyinleydi.

VI BAP.

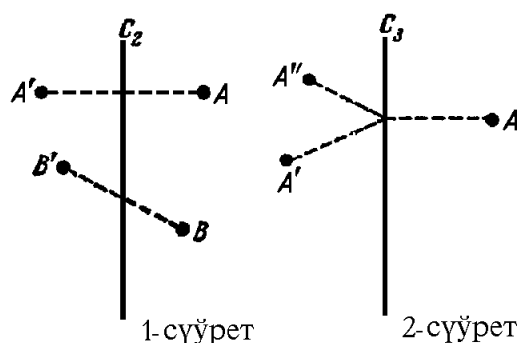
SIMMETRIYA HAQQYINDAǴY TÁLIMAT

§ 40. Molekulardıń simmetriyası

Simmetriya túsini fizikada fundamentallıq orın iyeleydi. Simmetriya anaw yamasa mınaw fizikalıq ob'ekttiń áhmiyetli sapalıq xarakteristikalarınıń biri bolıp, kóplegen jaǵdaylarda usı ob'ekt penen yamasa usı ob'ekte júretuǵın qubılıslardıń xarakterine tikkeley tásir jasaydı.

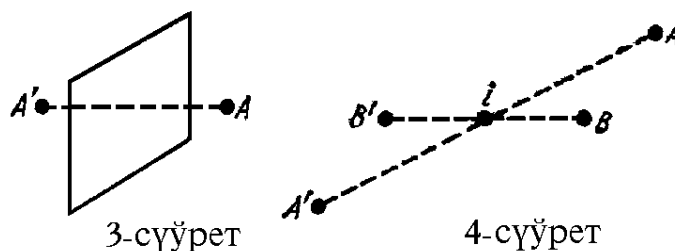
Ayırım molekular iye bolatuǵın simmetriyanı úyreniwdi baslaymız. Simmetriya qásiyeti hár qıylı *simmetriya elementlerinen* qosılıp payda boladı. Bizler dáslep solardı anıqlaymız.

Eger molekulanı ózi arqalı ótiwshi bir kósherdiń dógeresinde $2\pi/n$ múyeshine (n qanday da bir pútin san: $n=2, 3, 4, \dots$) burǵanda óziniń burmastan burınǵı awhalınday awhalına keletuǵın bolsa, onda molekulanı n -tártpılı *simmetriya kósherine* iye dep esaplaymız. Bunday kósherdi S_n belgisi menen belgilew qabıl etilgen. Molekulada 2-tártpılı simmetriya kósheri (S_2) bar degen sóz usı kósherdiń dógeresinde molekulanı 180 gradusqa burǵanda molekula dáslepki awhalına qaytıp keledi degendi bildiredi. Basqa sóz benen aytqanda molekuladaǵı A, V, ... atomlardıń hár birine sáykes 1-súwrette kórsetilgendey A', V', ... atomları da bar boladı. Eger molekula 3-tártpılı simmetriya kósherine iye bolsa, onda ol menen 120 hám 240 graduslarǵa burǵanda ózi menen betlesedi, yaǵnıy 2-súwrette kórsetilgendey hár bir A atomına sáykes molekulada A' hám A'' atomları boladı.



Molekula *simmetriya tegisligine* de iye bola aladı. Bul jaǵdayda usı tegislikte shaǵılıstırǵanda molekula óziniń dáslepki awhalınday awhalına keliwi kerek (bunday simmetriya elementin i hárpi menen belgileybiz). Bul molekuladaǵı hár bir A atomına 3-súwrette kórsetilgendey A' atomınıń bar bolatuǵınlıǵın bildiredi.

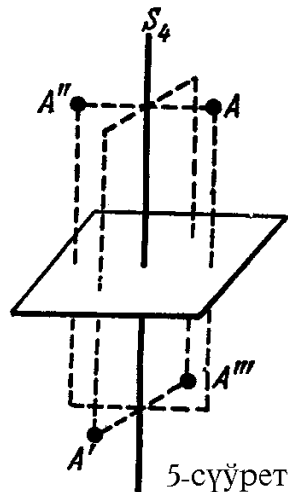
Tegisliktegi aynalıq shaǵılısıwdan basqa "noqattaǵı shaǵılısıw" túsiniń kirgiziw múmkin. Bunday noqattıń bolıwı molekuladaǵı jańa simmetriya elementi bolǵan *simmetriya orayına* (yamasa *inversiya orayı*) alıp keledi; bul elementti i hárpi menen belgileydi. Eger molekula qanday da bir i noqatında simmetriya orayın iye bolatuǵın bolsa, onda hár bir A atomına 4-súwrette kórsetilgendey A' atomı bar boladı (AiA' noqatlardı bir tuwrınıń boyında bolıp Ai hám iA' qashıqlıqları birdey mániske iye).



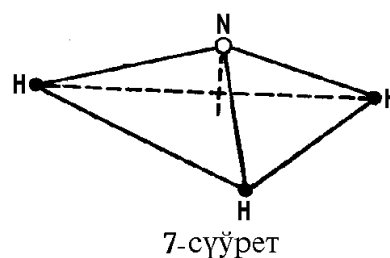
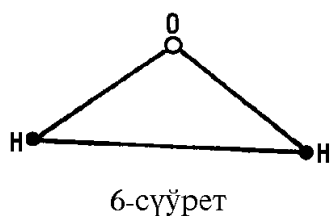
En aqırında simmetriya elementiniń jáne bir tipi bolǵan *n-tártipli aynalıq-burılıw kósheri* menen tanısamız (onı S_n simvolı menen belgileydi). Molekulada bunday simmetriya elementi bar bolsa mınaday qásiyetke iye boladı: bazı bir kósherdiń dógerinde $2\pi/n$ múyeshine burǵanda hám bunnan keyin usı kósherge perpendikulyar bolǵan tegislikte shaǵıstırǵanda molekula óziniń dáslepki awhalınday awhalǵa qaytıp keliwi kerek. Aynalıq-burılıw kósheriniń tártibi tek jup san bolıwı kerek (eger n taq san bolsa, mısalı $n=3$, onda aynalıq burılıwdı 6 ret qaytalaǵanda S_3 kósheriniń bir birinen ǵárezsiz bolǵan eki simmetriya elementine aylanǵanlıǵına iseniwge boladı: S_3 simmetriya kósheri menen oǵan perpendikulyar \bar{i} simmetriya tegisligi). Eger molekula 4-tártipli aynalıq-burılıw kósherine iye bolǵanda 5-súwrette kórsetilgendey hár bir A atomı menen birge jáne úsh A' , A'' , A''' atomları bolǵan bolar edi. Bunday kósherdiń bar bolıwı tóménirek tártiptegi simmetriya kósheriniń, al biz qarap atırǵan jaǵdayda S_2 niń bar ekenligin ańǵartatuǵınlıǵı óz-ózinen kórinedi [2-tártipli aynalıq-burılıw kósheri usı kósher menen oǵan perpendikulyar jaylasqan simmetriya tegisligi kesiliskeń noqatta simmetriya orayı jaylasqan menen ekvivalent. Sonlıqtan S_2 jańa simmetriya elementi bolıp tabılmaıdı].

Molekulanıń simmetriyasın payda etetuǵın elementler joqarıdaǵılardan ibarat. Molekulanıń simmetriyasın anıqlawshı elementlerdiń kombinaciyalarınıń qalay payda bolatuǵının demonstraciyalaytuǵın bir neshe mısallar keltiremiz.

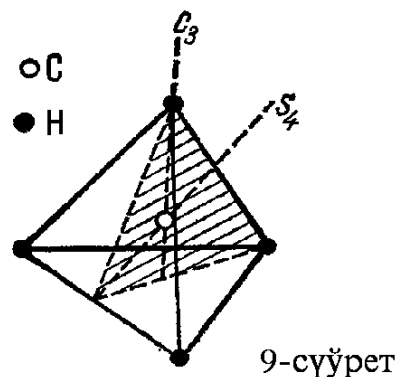
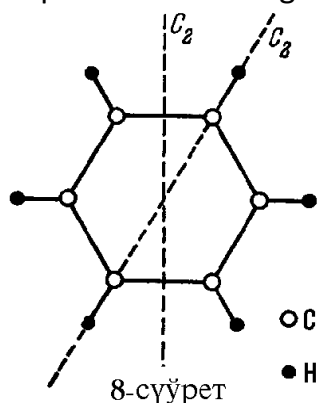
Suw molekulası N_2O teń qaptalı úsh múyeshlik formasına iye (6-súwret). Onıń simmetriyası 2-tártipli simmetriya kósherinen (úsh múyeshliktiń biyikligi) hám usı kósher arqalı ótiwshi óz-ara perpendikulyar eki simmetriya tegisliginen turadı.



Ammiak molekulası NN_3 durıs úsh qaptalı piramidanıń formasına iye. Piramidanıń tóbesinde N atomı, al ultanı múyeshlerinde N atomları jaylasadı (bul piramida ádewir tegis piramida bolıp tabıladı, onıń biyikligi ultanınıń bir qaptalınıń uzınlıǵınan shama menen 4 ese kishi). Onıń simmetriyası vertikal jaylasqan 3-tertipli simmetriya kósherinen (7-súwret) hám usı kósher arqalı ótetuǵın, bir biri menen 60° lıq múyesh jasaytuǵın úsh simmetriya tegisliginen turadı. Hár bir tegislik piramidanıń tóbesi hám N atomlarınıń biri arqalı ótedi.



Benzol molekulası S_6N_6 kóbirek simmetriya elementlerine iye boladı. Bunday molekulanıń atomları durıs altı múyeshlik payda etip bir tegislikte jatadı (8-súwret). Atomlardıń jatiw tegisligi álbette simmetriya tegisligi bolıp tabıladı. Molekula sol simmetriya tegisliginen basqa usı tegislikke perpendikulyar baǵıtlanǵan hám altı múyeshliktiń orayı arqalı ótiwshi 6-tártipli simmetriya kósherine de iye. Altı múyeshliktiń orayı simmetriya orayı bolıp tabıladı. Bulardan basqa altı 2-tártipli simmetriya kósheri bar, olardıń úshewi diametrlik jaqtan qarama-qarsı ornalasqan atomlardı baylanıstıradı, al qalǵan úshewi altı múyeshliktiń qarama-qarsı táreplerin teńdey ekige bóledi (8-súwrette sol kósherler bir birden keltirilgen). Eń aqırında usı súwret tegisligine perpendikulyar S_2 kósherleri arqalı ótiwshi altı tegislik altı simmetriya tegisligin beredi.

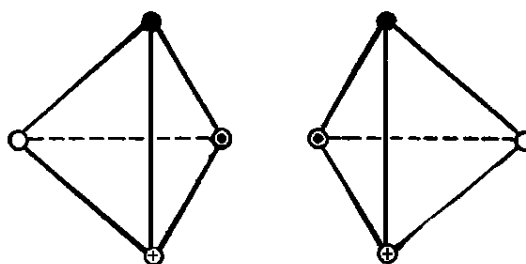


Durıs tetraedr formasına iye bolǵan SN_4 metan molekulasın qaraymız (jaqları tórt dana teń qaptallı birdey úsh múyeshliklerden turatuǵın figuranı tetraedr dep ataydı). N atomları tetraedrdiń tórt tóbesinde, al S atomı onıń orayında jaylasadı (9-súwret). Bul molekula úsh dana 3-tártipli simmetriya kósherine iye, olardıń hár biri tóbelerdıń biri hám tetraedrdiń orayı arqalı ótedi. :sh dana 4-tártipli aynalıq-burılıw simmetriya kósherleri tetraedrdiń qarama-qarsı qabırǵalarınıń ortası arqalı ótedi. Bul ayılǵanlardan basqa altı dana simmetriya tegisligi bolıp, olardıń hár biri bir qabırǵa hám qarama-qarsı qabırǵanıń ortası arqalı ótedi (9-súwrette joqarıda ayılıp ótilgen simmetriya elementleriniń hár qaysısınıń birewi keltirilgen).

§ 41. Aynalıq izomeriya

Molekulada jetkilikli dárejedegi simmetriyanıń bar bolıwına yamasa joq bolıwına ózine tán bir qubılıs baylanıslı. Asimmetriyalıq molekulanı aynada shaǵılistırsaq, onda sol molekuladay, biraq onıń menen úylespeytuǵın jáne bir molekula alınadı. Mısalı $SNSIVrI$ molekulası usınday qásiyetke iye. Bul molekula metan SN_4 molekulasındaǵı úsh dana N atomların hár qıylı bolǵan úsh SI, Vr hám I atomları menen almastırǵan jaǵdayda alınadı. 10-súwrette vertikal tegislikte shaǵılistırǵanda alınǵan usınday eki molekula kórsetilgen (súwrette S atomları kórsetilmegen). Bul molekulalardıń keńisliktegi burıwlardıń

járdeminde bir biri menen úylespeytuǵınlıǵı ayqın nárses. Sonlıqtan usınday mániste bunday molekulalar birdey emes.



10-сүўпет

Usınday bir birine uqsas, biraq birdey emes molekulalar bir birinen aynalıq shaǵılıstırıwdıń nátiyjesinde alınadı hám olar *aynalıq izomerler* dep ataladı (yamasa *stereoizomerler* dep ataladı). Sonıń menen birge izomerlerdiń biri oń, al ekinshisi shep dep ataladı.

Molekulardıń ayırımları ǵana stereoizomerlerge iye bola aladı. Olardıń bar yaki joq bolıwı molekulanıń simmetriyasına baylanıslı. Mısalı, eger molekula tek bir simmetriya tegisligine iye bolatuǵın bolsa, onda onıń aynalıq súwreti ózi menen birdey boladı: olar bir birinen tek keńisliktegi bazı bir kósherdiń dógeregindegi burıw menen parıqlanadı. Sonlıqtan stereoizomerlerge júdá simmetriyalı bolǵan SN_4 molekulası ǵana emes, al tómén simmetriyaǵa iye bolǵan SN_3SI hám hátte simmetriya tegisligine iye bolsa da SN_2SIVr molekulası da iye bolmaydı.

Tap sol sıyaqlı stereoizomerlerge simmetriya orayına yaki aynalıq-burılıw kósherine iye bolǵan molekulalar da iye bolmaydı.

Derlik barlıq fizikalıq qásiyetleri boyınsha stereoizomerler birdey boladı. Olar arasındaqı ayırmalar, mısalı, usınday zatlardıń eritpeleri arqalı jaqtılıq ótkende baqlanadı (usınday sebeplerge baylanıslı stereoizomerlerdi ádette *optikalıq izomerler* dep te ataydı).

Stereoizomerler arasındaqı ayırma olardıń basqa asimmetriyalıq molekulalar menen tásirleskeninde ayqın kórinedi. Eki túrli zattıń oń izomerleri arasındaqı reakciyalar, shep izomerler arasındaqı reakciyalarda bolıp júredi: eki processte bir birinen tek aynalıq shaǵılısıwı boyınsha ayrıladı hám sonlıqtan fizikalıq qásiyetleri boyınsha ayrılmaydı. Tap sol sıyaqlı oń izomer menen shep hám shep izomer menen oń izomer arasındaqı reakciyalar da birdey bolıp júredi. Biraq birinshi jaǵdaydaǵı reakciyalardıń barısı ekinshi jaǵdaydaǵı reakciyalardıń barısının anıq ayrıladı. Izomerlerdiń bir birinen ayırması usınnan kórinedi.

Eger ximiyalıq reakciyanıń nátiyjesinde eki simmetriyalıq (stereoizomerleri joq) zatlardan asimmetriyalıq molekulalar payda bolatuǵın bolsa, onda aynalıq shaǵılısıw dáslepki zatlardı ózgerte almaydı, sonlıqtan bunday simmetriya reakciyanıń nátiyjesinde alınatuǵın zatlardı da ózgertpeydi. Bul reakciyanıń nátiyjesinde eki izomerdiń de birdey muǵdardaǵı aralaspasınıń alınatuǵınlıǵın bildiredi.

§ 42. Kristallıq pánjere

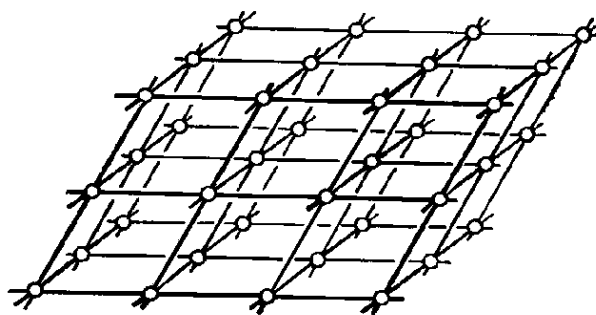
Atomlarınıń tártipli túrde jaylasıwı kristallardıń tiykarǵı qásiyeti bolıp tabıladı. Kristallardıń ishindegi atomlardıń jaylasıwınıń simmetriyasın (al olardıń sırtqı formalarınıń simmetriyasın emes) biz úyrenemiz.

Atomlar jaylasqan (durısıraqı atomlardıń yadroları) jaylasqan noqatlardıń jıynaǵı haqqında gáp etilgende *kristallıq pánjere* haqqında aytadı, al sol noqatlardıń ózlerin *pánjereniń túyinleri* dep ataydı. Pánjereniń simmetriyasın úyrengende onı keńislikte sheksiz dep esaplaymız, kristallardıń qaptal betleriniń bar ekenligin itibargá almaymız.

Kristallıq pánjereniń tiykarǵı xarakteristikası bolıp onıń qurılısınıń keńisliktegi dáwirililigi bolıp tabıladı: kristaldı qaytalanatuǵın bólimlerden turatuǵınday etip kóz aldımızǵa keltiremiz. Biz óz-ara parallel bolǵan úsh tegisliklerdiń semeystvosınıń járdeminde kristallıq pánjereni birdey atomlarǵa iye birdey parallelopipedlerge bóle alamız. Bunday jaǵdayda kristallıq pánjere bir birine salıstırǵanda parallel ısırılǵan usınday parallelopipedlerdiń jıynaǵı bolıp shıǵadı. %z gezeginde bul kristallıq pánjereni tutası menen ózi-ózine parallel etip parallelopipedlerdiń qanday da bir qabırǵasınıń baǵıtında usı qabırǵanıń uzınlıǵın pútin sanǵa kóbeytkendey aralıqlarǵa kóshirgende pánjereniń ózi menen úylesetuǵınlıǵın ańlatadı. Bunday kóshiriwlerdi *translyaciyalar* dep ataydı, al pánjereniń usınday kóshiriwlerge qarata simmetriyasın *translyaciyalıq simmetriya* dep ataydı.

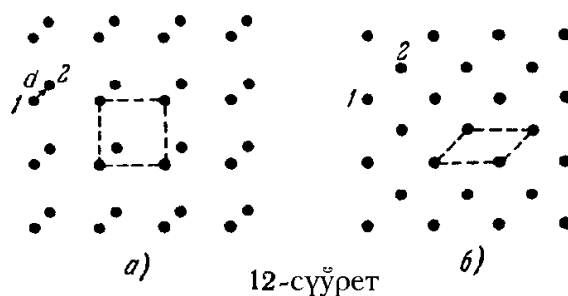
Neaytalawlardıń nátiyjesinde kristallıq pánjereni payda etiwge bolatuǵın eń kishi parallelopipedti kristaldıń *elementar qutıshası* dep ataydı. Usınday qutıshanıń ólshemleri, forması hám qutıshadaǵı atomlardıń jaylasıwları boyınsha kristaldıń strukturası tolıǵı menen anıqlanadı. Elementar qutıshanıń úsh qabırǵasınıń baǵıtları menen uzınlıqları úsh vektordı beredi, bul vektorlardı pánjereniń *tiykarǵı dáwirleri* dep ataydı; bul uzınlıqlar pánjereniń ózi ózi menen úylesetuǵın eń kishi aralıqlar bolıp tabıladı.

Neanday da bir elementar qutıshanıń tóbesinde atom jaylasqan bolsa, onda usı elementar qutıshanıń basqa tóbelerinde de, basqa elementar qutıshalarda da atomlar jaylasqan boladı. Birdey hám birdey bolıp jaylasqan atomlardıń jıynaǵı berilgen kristaldıń *Brave pánjeresi* dep ataladı (11-súwret). Brave pánjeresi translyaciyalıq simmetriyasın (yaǵnıy keńisliktegi dáwirililigin) ayqın túrde sáwlelendiriwshi kristallıq pánjereniń skeletiniń ornın iyeleydi. Onıń barlıq atomları pánjereniń anaw yamasa mınaw translyaciyasınıń járdeminde biri birine úylesedi.



11-сүрет

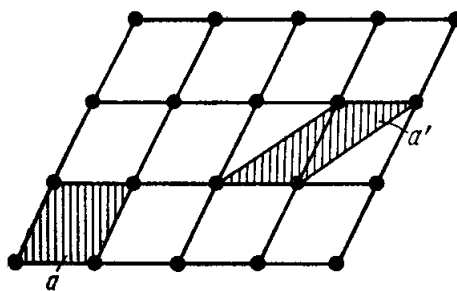
Biraq Brave pánjeresiniń atomları kristaldaǵı barlıq atomlardı beredi dep oylamaw kerek. Neala berse olar birdey sorttaǵı atomlardı da tolıq bermeydi. Bul áhmiyetli bolǵan jaǵdaydı túsindiriw ushın keńisliktegi pánjereni emes (haqıyqatında pánjere keńisliktegi pánjere bolıp tabıladı), al sızılmada ańsat sáwlelendiriw múmkin bolǵan tegis pánjereni qaraymız.



Meyli pánjere 12-súwrette noqatlar arqalı kórsetilgen birdey atomlardan turatuğın bolsın. Bul atomlar birdey tábiyatqa iye bolğanı menen kristallografiyalıq jaqtan tolıq birdey bolıp tabılmaıdı (usıǵan baylanslı ol atomlardı *ekivalent emes* atomlar dep ataymız). Haqıyqatında Brave pánjeresindegi atomlardıń jaylasıwındaǵı birdeylik mınanı ańlatadı: eger onıń qanday da bir atomı bazı bir qashıqlıqta hám bazı bir baǵıtta qońısı atomǵa iye bolatuğın bolsa, onda Brave pánjeresiniń barlıq atomları da tap sonday qashıqlıqlarda hám baǵıtlarda qońısı atomlarǵa iye boladı. 12-súwrette 1 tipindegi noqatlar 2 tiptegi noqatlarday bolıp jaylaspaǵanlıǵı kórinip tur. 1 noqatı d qashıqlıǵında 2 qońısına iye, biraq 2 atomı tap sonday qashıqlıqta jaylasqan qońısıǵa iye emes. Sonlıqtan 1 hám 2 noqatları bir birine ekivalent emes hám birgelikte Brave pánjeresin payda etpeydi. Biraq usı eki tiptegi noqatlardıń hár qaysısı óz aldına bir birine salıstırǵanda d aralıǵına jılistırılǵan eki Brave pánjeresin payda etedi.

Eger 2 atomların 1 atomlardan dúzilgen kvadratlardıń oraylarına ısırıp qoysaq (12-b súwret), onda barlıq atomlar bir birine ekivalent atomlarǵa aylanadı: 2 atomı 1 atomı menen qanday qońısı bolsa, 1 atomı da 2 atomı menen sonday qońısı bolıp jaylasadı. Bunday strukturada barlıq atomlar birgelikte birden bir Brave pánjeresin payda etedi.

Joqarıda ayılǵanlardan kristaldıń bir birine salıstırǵanda belgili bir aralıqlarǵa ısırılǵan bir neshe Brave pánjerelerinen turatuǵınlıǵı kórinip tur. Hár bir pánjere belgili bir sorttaǵı, yamasa qanday da bolıp jaylasqan atomlarǵa tiyisli, al sol pánjerelerdiń barlıǵı da birdey.



13-cyŷpet

Eger kristaldaǵı barlıq atomlar bir Brave pánjeresin payda etetuğın bolsa, onda bir elementar qutısha tek bir atomǵa iye boladı. Mısalı 12-b súwrette hár bir qutısha (tegis pánjerede parallelogramm) bir birden 1 hám 2 atomlarına iye [Usıǵan baylanslı hár bir elementar qutıshaǵa sáykes keliwshi atomlardı esaplaǵanda qutıshanıń tóbeleriniń tek birewin usı qutıshaǵa tiyisli, al qalǵan tóbelerdi basqa qutıshalarǵı tiyisli dep esaplaydı].

Eger kristallıq pánjere bir neshe Brave pánjerelerinen turatuğın bolsa, onda elementar qutısha bir neshe atomlarǵa iye boladı (hár bir Brave pánjeresinen bir atomnan). Mısalı 12-a súwrette keltirilgen pánjerede elementar qutısha eki atomǵa iye: bir 1 atomı hám bir 2 atomı.

Kristaldı tiykarǵı parallelopipedler bolǵan elementar qutıshalarǵa bóliw bir mánisli túrde ámelge asırılmaıdı. Principinde elementar qutıshanı sheksiz kóp usıllar járdeminde

dúziw múmkin. Usı jaǵdaydı ayqınlastırıw ushın 13-súwrette kórsetilgen tegis pánjereni kóremiz. Bul jerde elementar qutisha dep birdey huqıq penen a parallelogrammın da, a' parallelogrammın da alıw múmkin.

Biraq elementar qutışını bir qanday etip almayıq, bul qutışhada da birdey sandaǵı atomlarǵa hám birdey kólemge iye boladı (tegis pánjerede birdey maydanǵa iye boladı: a hám a' parallelogramları birdey maydanǵa iye). Bizler qanday da bir sorttaǵı hám belgili bir tártipte jaylasqan atomdı qarayıq. Joqarıda ayılǵanlandan hár bir qutishaǵa bir usınday atomnan sáykes keletuǵınlıǵı túsinikli: sonlıqtan kristaldıń bazı bir V kólemindegi elementar qutışalardıń sanı usı kólemdegi atomlardıń sanı N ge teń; demek saylap alıwdıń jollarınıń kóp ekenligine qaramastan bir elementar qutışanıń kólemi $v=V/N$ ge teń boladı.

§ 43. Kristallıq sistemalar

Brave pánjeresi kristaldıń áhmiyetli xarakteristikası bolıp tabıladı hám kristallardıń simmetriyasınıń hár qıylı tipleriniń klassifikaciyası Brave pánjereleriniń hár qıylı tipleriniń klassifikaciyasına tiykarlanadı.

Barlıq Brave pánjereleri translyaciyalıq simmetriyaǵa iye boladı. Bunday simmetriya menen bir qatarda olar 40-paragrafta ǵáp etilgen simmetriya elementlerine de iye boladı (hár qıylı simmetriya kósherleri hám simmetriya tegislikleri). Tap usınday simmetriya haqqında tómendegi klassifikaciyaǵa ǵáp etiledi.

Brave pánjeresiniń hár bir túyini simmetriya orayı bolıp tabıladı. Haqıyqatında da pánjerede hár bir atomǵa usı atom menen bir tuwrınıń boyında jaylasqan basqa bir atom sáykes keledi. Sonlıqtan qálegen Brave pánjeresi simmetriya orayına iye. Biraq Brave pánjereleri onnan da úlken simmetriyaǵa iye bolıwı múmkin.

SHekli ólshemlerdegi figura (misalı molekula) principinde qálegen tártiptegi simmetriya kósherine iye bolıwı múmkin. Al dáwirli struktura bolǵan kristallıq pánjere tek ǵana 2-, 3-, 4- hám 6-tártipli simmetriya kósherine iye bola aladı. Haqıyqatında da, eger pánjerede 5-tártipli simmetriya kósheri bar bolǵanda pánjerede bes múyeshlikler boyınsha jaylasqan túyinlerge iye tegisliklerdi tabıw múmkin bolar edi. Bunday jaǵdaydıń orın alıwı múmkin emes, sebebi tegislikte tek ǵana úsh múyeshlikler, kvadratlar hám altı múyeshlikler menen ǵana tıǵız etip toltırıw múmkin. Bunı dálillew ushın tegisliktegi qanday da bir noqattı qarayıq. Bul tegislikte usı tegislikte toltırıp turǵan kóp múyeshliklerdiń qabırǵaları tiyisip turatuǵın bolsın. Toltırıwdıń tıǵız (bos orınlar qalmaytuǵınday) bolıp ámelge asırılıwı ushın kóp múyeshliktiń múyeshi (onıń qońısılas eki qabırǵası arasındaǵı múyesh) 2π diń pútin bólegine teń bolıwı kerek (yaǵnıy $2\pi/r$ ǵa teń bolıwı kerek, r bazı bir pútin san). Ekinshi tárepten durıs n múyeshliktegi múyeshi $\pi(n-2)/n$ ge teń ekenligi bárshemizge de belgili. Sonlıqtan biz

$$\frac{\pi(n-2)}{n} = \frac{2\pi}{p}$$

teńligin alamız. Bunnan

$$\frac{2n}{n-2}$$

shamasınıń pútin sanǵa teń bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Bul jaǵday $n=3, 4, 6$ bolǵanda ǵana orınlanadı.

Solay etip biz pánjerede simmetriyanıń barlıq túrleriniń orın almaytuǵınlıǵın kóremiz. Bul jaǵday óz gezeginde Brave pánjeresiniń simmetriyasınıń tek belgili bir sandaǵı tipiniń bar ekenligine alıp keledi. Bul tipler *kristallıq sistemalar* dep ataladı. Bul sistemalar menen tanısamız.

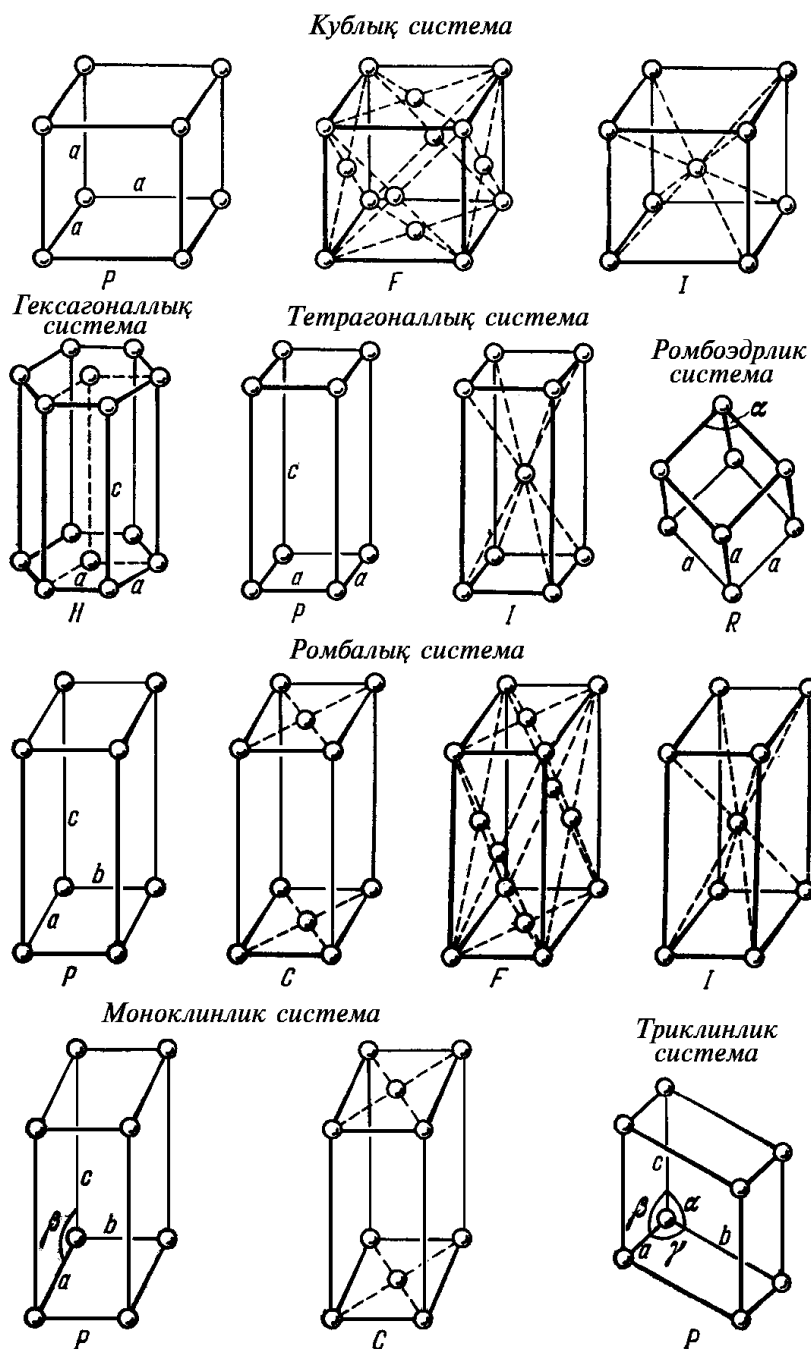
1. Kublıq sistema. Braveniń eń joqarı simmetriyaǵa iye pánjeresi kublıq simmetriyaǵa iye bolǵan pánjere bolıp tabıladı (pánjereniń simmetriya kósherleri menen tegisliklerin birimlep atap otırıwdıń ornına biz sonday simmetriyaǵa iye figuranı - kubtı qaraymız).

Bizler bunday pánjereni kublıq qutışalardıń tóbelerine atomlardı jaylastırıw arqalı alamız. Biraq bul kublıq simmetriyaǵa iye Brave pánjeresin alıwdıń birden bir jolı emes. Kublıq qutışanıń orayına atomlardı jaylastırsaq ta kublıq simmetriyanı ózgermeytuǵınlıǵı ayqın. Sonıń menen birge qutışanıń orayındaǵı atomlar menen tóbelerindegi atomlar óz-ara birdey bolıp jaylasadı (birdey qońsılarga iye), yaǵnıy bir Brave pánjeresine tiyisli boladı. Bul ayılǵanlardan basqa Brave pánjeresin atomlardı kublıq qutışanıń tóbelerine hám onıń qaptallarınıń oraylarına ornalastırıw arqalı da alıwǵa boladı.

Solay etip kublıq sistemaǵa tiyisli úsh túrli Brave pánjeresi boladı eken. Olardı *ápiwayı, kólemde oraylasqan hám qaptalda oraylasqan* pánjereler dep ataydı (olardı belgilew ushın R , I hám $''$ simvolları qollanıladı). 14-súwrette bul pánjerelerdiń qutışalarındaǵı atomlardıń jaylasıwları kórsetilgen.

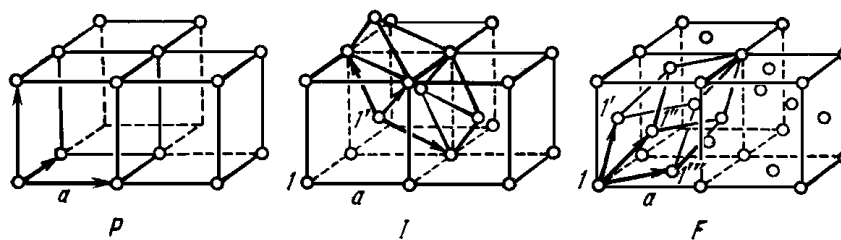
I piwayı Brave pánjeresiniń kublıq qutışası elementar qutışa bolıp tabıladı. I hám $''$ pánjereleriniń qutışaları elementar qutışalar bolıp tabılmaıdı; bul bunday qutışalarda birden aslam atomlardıń bar ekenliginen kórinip tur. 15-súwrette barlıq úsh tiptegi kublıq pánjerelerdiń elementar qutışaları kórsetilgen (juwan sızıqlar menen). Kublıq kólemde oraylasqan qutışada eki atom jaylasqan boladı (15-súwrettegi 1 hám $1'$ atomları), al qaptalda oraylasqan qutışada tórt atom jaylasadı (súwrettegi 1 , $1'$, $1''$, $1'''$ atomları). Basqa atomlardı basqa elementar qutışalarǵa tiyisli dep qaraw kerek. Bunnan kólemde oraylasqan hám qaptalda oraylasqan elementar qutışalardıń kólemleriniń $a^3/2$ hám $a^3/4$ ekenligi kórinip tur (a arqalı kubtıń qabırǵasınıń uzınlıǵı belgilengen).

a uzınlıǵı *pánjere turaqlısı* dep ataladı. Bul kublıq pánjereni xarakterlewshi birden bir sanlıq parametr bolıp tabıladı.



14-сүрөт

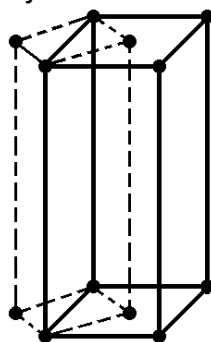
Кóлемде hám qaptalda oraylasqan pánjerelerдегі элементар qutishalar pánjerege tán болған кубтің симметрийасына óзinen óзи iye болмайды. Bunday мағанада bunday qutishılardıń járdeminde kristaldıń структурасынń súwreti onıń симметрийасын kórgizbeli túrде sáwlelendire алмайды. Sonlıqtan kristaldағы atomlardıń jaylasıwларın kórsetkende ádetте элементар емес кубlıq qutishадan paydalanadı. Bunday jaғdayда кубlıq qutishanıń úsh qabırғası ushın kósherleri X, Ú hám Z болған tuwrı múyeshli koordinatar sistemasınan paydalanadı, al koordinatanıń ólshew birliги retinde a тураqlısı saylap alınadı. Kubтіń orayında jaylasqan atom úsh $\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}$ koordinatarı menen táriyiplenedi, al $\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0$ koordinatası X: tegisligine parallel qaptaldıń orayındaғы atomға sáykes keledi h.t.b.



15-сүрөт

2. Tetragonallıq (yamasa kvadratlıq) sistema. Eger kubtı qabırğalarınıń biriniń baǵıtında sozsaq, onda tóménirek simmetriyaǵa iye bolǵan figura - tuwrı múyeshli kvadrat prizma alınadı. Onıń simmetriyası tetragonal sistemaǵa kiriwshi Brave pánjeresiniń simmetriyasına sáykes keledi.

Bunday pánjerelerdiń eki tipi bar: ápiwayı hám kólemde oraylasqan (olardıń qutışaları da 14-súwrette sáwlelendirilgen). Eger ápiwayı prizmanıń ultanlarınıń orayına bir birden atom ornalastırsaq, tap sonday simmetriyaǵa iye bolǵan pánjereni alamız degen pikir payda boladı (16-súwret). Biraq bunday jaǵdayda da ultanı kvadrat bolǵan prizma tárizli qutışanı jańasha saylap alıw jolı menen ápiwayı tetragonallıq Brave pánjeresine qayta keletuǵınlıǵımızdı ańsat kóriwge boladı. Demek prizmanıń ultanlarınıń oraylarına atomlardı jaylastırıw menen bir jańa hesh nárese ala almaydı ekenbiz. Haqıyqatında da ultanlardıń oraylarındaǵı atomlardı bir biri menen tutastırıp 16-súwrette kórsetilgendey dáslepki prizmanıń simmetriyasınan parqı joq, al atomları prizmanıń tek tóbelerinde jaylasqan prizmanı alamız. Usınday sebeplerge baylanıslı qaptalda oraylasqan Brave pánjeresi bolmaydı, bunday pánjere kólemde oraylasqan pánjerege alıp kelinedi.



16-сүрөт

Tetragonallıq pánjere eki turaqlı menen táriyiplenedi: ultanınıń bir tárepiniń uzınlıǵı a hám prizma tárizli qutışanıń biyikligi c .

3. Rombalıq (yamasa ortogonallıq) sistema. Eger kubtı eki qabırǵası boyınsha eki túrli etip sozsaq biz qabırǵalarınıń uzınlıqları hár qıylı bolǵan tuwrı múyeshli parallelopiped alamız. Bul figuranıń simmetriyası rombalıq sistemadaǵı pánjerelerdiń simmetriyasına sáykes keledi.

Rombalıq Brave pánjereleriniń tórt tipi bar: ápiwayı, kólemde oraylasqan, qaptalda oraylasqan hám oraylasqan ultanlarǵa iye tip (keyingi tip S háripi menen belgilenedi). 14-súwrette berilgen sistemanıń barlıq simmetriyasına sáykes keletuǵın rombalıq pánjerelerdiń tiykarǵı parallelopipedleri keltirilgen. Bul jerde tek ápiwayı Brave pánjeresi jaǵdayında ǵana elementar qutışaǵa sáykes keledi.

Rombalıq pánjere úsh parametr menen táriyiplenedi: prizma tárizli qutışanıń qabırǵalarınıń uzınlıqları a , b , c . Bul shamalar qutışanıń qabırǵaları boyınsha alınǵan tuwrı múyeshli koordinatar sistemasındaǵı uzınlıqlardıń birligi retinde saylap alınadı.

4. Monoklinlik sistema tómenirek simmetriyağa iye boladı. Bul tuwrı múyeshli parallelopipedti onıń qabırǵalarınıń biriniń baǵıtında mayıstırǵanda alınatuǵın figuranıń simmetriyasına sáykes keledi; bul iqtıyarlı ultanǵa iye tuwrı parallelopiped bolıp tabıladı. Bunday sistemaǵa Braveniń eki pánjeresi sáykes keledi (14-súwrettegi R hám S pánjereleri).

Monoklinlik sistema tórt parametr menen táriyiplenedi: qutıshanıń úsh qabırǵasınıń uzınlıqları a , b , c hám olardıń ekewiniń arasındaǵı múyesh β (basqa múyeshler tuwrı múyeshler bolıp tabıladı). Bul jerde de atomlardıń iyelegen orınların anıqlaw ushın qutıshanıń úsh qabırǵası boyınsha jaylastırılǵan koordinatar sisteması qollanıladı. Biraq bul sistema tuwrı múyeshli emes koordinatar sisteması bolıp tabıladı.

5. Triklinlik sistema iqtıyarlı qıya paralelopipedtiń simmetriyasına sáykes keledi. Bul eń tómen simmetriya bolıp tabıladı (ol tek simmetriya orayına iye). Búǵan Braveniń pánjeresiniń bir tipi (R tipi) kiredi hám bul pánjereniń elementar qutıshası uzınlıqları a , b , c hám olar arasındaǵı múyeshler α , β , γ lar menen táriyiplenedi.

Jáne de eki kristallıq sistema ózlerine tán belgili bir ayırmashılıqlarǵa iye boladı.

6. Geksagonallıq sistema. Bul sistemanıń pánjeresi altı múyeshli tuwrı prizmanıń simmetriyasına sáykes keliwshi júdá joqarı simmetriyaǵa iye. Bul sistemanıń Brave pánjeresi (onı N simvolı menen belgileymiz) tek bir usıl menen dúziliwi múmkin: onıń túyinleri altı múyeshli prizmanıń tóbelerinde hám onıń altı múyeshli ultanınıń oraylarında jaylasadı.

Geksagonallıq pánjere eki parametrdiń járdeminde anıqlanadı: ultanınıń tárepiniń uzınlıǵı a hám prizma tárizli qutıshanıń biyikligi s . Bul pánjeredegi elementar qutısha bolıp 14-súwrette punktir sıziq penen kórsetilgen ultanı romba tárizli parallelopiped bolıp tabıladı. Bul elementar qutıshanıń qabırǵaları (biyikligi s hám ultanınıń eki tárepi arasındaǵı múyesh 120° qa, uzınlıǵı a ǵa teń) pánjeredegi atomlardıń iyelegen orınların anıqlaw ushın koordinata kósherleri sıpatında qabıl etiledi.

7. Romboedrlik sistema romboedriniń simmetriyasına sáykes keledi. Romboedr dep kubtı qabırǵalarınıń uzınlıqların ózertpey kólemlik diagonalınıń baǵıtında sozǵanda (yamasa qısqanda) alınatuǵın figuranı aytadı. Onıń barlıq qaptal betleri birdey rombalar bolıp tabıladı. Bul sistemadaǵı Brave pánjeresinidegi (onı R arqalı belgileymiz) romboedrlardıń tóbelerinde jaylasadı. Bul pánjere eki parametr menen táriyiplenedi: qutıshanıń qabırǵalarınıń uzınlıǵı a hám olar arasındaǵı múyesh α ($\alpha=90^\circ$ ta romboedr kubqa aylanadı).

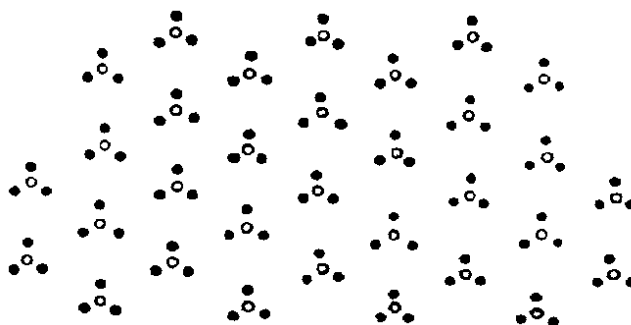
Usınıń menen hár qıylı Brave pánjerelerin bayanlaw tamam boladı. Biz Brave pánjereleriniń simmetriyasınıń deti tipiniń – jeti kristallıq sistemanıń bar ekenligin kórdik. Bul sistemalarǵa Brave pánjereleriniń hár qıylı 14 tipi sáykes keledi.

Kristallıq sistemalar kristallardı klassifikaciyalawdıń tiykırı bolıp tabıladı hám kristallardıń qásiyetlerin táriyiplegende birinshi bolıp atap ótiledi. Naisqashalıq ushın jiyi qollanılatuǵın "geksagonallıq kristall", "kublıq kristall" h.t.b. sózleri onıń kristallıq sistemasın kórsetetuǵın sózler sıpatında qabıl etiw kerek (bul kristaldıń sırtqı formaları haqqında maǵlıwmatlardı bermeydi).

Romboedrlik, geksagonallıq hám tetragonallıq sistemadaǵı kristallardı *bir kósherli* (olardıń pánjereleri eki parametr menen táriyiplenedi), al triklinlik, monoklinlik hám rombalıq sistemadaǵı kristallardı *eki kósherli* kristallar dep atalatuǵınlıǵın kórsetip ótemiz.

§ 44. Keñisliktegi toparlar

Joqarıda qarap ótilgen Brave pánjereleri ekvivalent, yaǵnıy birdey hám birdey bolıp jaylasqan atomlardıń jıynaǵı bolıp tabıladı. Biz Brave pánjeresiniń kristaldaǵı barlıq atomlardı óziniń ishine qamtımaytuǵınlıǵın atap óttik. Al kristaldıń haqıyqıy strukturası bir birine salıstırǵanda ısırılǵan bir neshe Brave pánjerelerinen turadı. Bul pánjerelerdiń birdey bolıwına qaramastan olardıń simmetriyası, yaǵnıy haqıyqıy kristaldıń simmetriyası bir Brave pánjeresiniń simmetriyasınan úlken ayırmaǵa iye bolıwı múmkin.

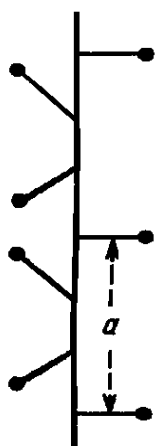


17-cyypet

Bul áhmiyetli jaǵdaydı kórgizbelilik ushın jáne de tegis pánjere ushın kórsetemiz. 17-súwrette jaqtı dóńgelekler menen Braveniń tegis "geksagonallıq" pánjeresiniń túyinleri kórsetilgen. Bul pánjereniń hár bir túyini arqalı (sızılma tegisligine perpendikulyar) 6-tártipli simmetriya kósheri ótedi. Meyli endi usı pánjerege tap usınday bolǵan úsh pánjere qosılsın. Olardıń túyinleri 17-súwrette qara noqatlar járdeminde kórsetilgen. Endi 6-tártipli simmetriya kósheri joǵalıp, 3-tártipli simmetriya kósheriniń qalatuǵınlıǵı ayqın kórinip tur.

Biz bul jerde haqıyqıy pánjereniń quramalasıwınıń saldarınan onıń Brave pánjeresiniń simmetriyasına salıstırǵanda onıń simmetriyasınıń tómenlewine alıp keletuǵınlıǵın kóremiz.

Haqıyqıy kristallıq pánjerelerde buriwlar menen aynada shaǵılistırıwlardıń parallel kóshiriwler menen kombinaciyasın esapqa alıw zárúr boladı. Bunday bolǵan jańa elementlerdi *vintlik kósherler* hám *aynalıq jiljitiwshı tegislik* dep ataymız.



18-cyypet

Eger pánjere kósherdiń dógereginde $2\pi/n$ múyeshine burılǵanda hám usı burılıw menen birge usı kósher baǵıtında bazı bir aralıqqa jılastırılǵanda ózi ózi menen úylesetuǵın bolsa, onda ol n -tártipli vintlik kósherge iye dep esaplanadı. Usınday jaǵdaydı illyustraciyalaw ushın 18-súwrette 3-tártipli vintlik kósherge iye atomlardıń sıızılǵı dizbegi kórsetilgen (bul dizbektiń uzınlıǵın sheksiz úlken dep esaplaymız). Bul struktura dáwirli, dáwiri a ǵa teń, 120 gradusqa burǵanda hám usı buriw menen birge kósher baǵıtında $a/3$ ke jılastırılǵanda bul dizbek ózi ózi menen úylesedi.

Eger pánjere bazı bir tegislikte shaǵılistırılǵanda hám sonıń menen birge usı tegislikte jatırǵan baǵıtta belgili bir aralıqqa jılastırılǵanda ózi ózi menen úylesetuǵın bolsa, onda pánjere aynalıq jiljitiwshı tegislikke iye dep aytamız.

Solay etip haqiqiy kristall belgisi bir translyatsiyalıq simmetriyaga (bul simmetriya Brave pánjeresiniń tipi menen táriyiplenedi) iye boladı, sonıń menen birge ápiwayı hám vintlik simmetriya kósherlerine, aynalıq-burılıw kósherine, ápiwayı hám aynalıq shağılıstırıwshı simmetriya tegisliklerine iye bola aladı. Bul elementlerdiń barlıǵı da hár qıylı kombinatsiyalardı bir biri menen birige aladı.

Haqiqiy kristallıq pánjereniń barlıq simmetriya elementleriniń jıynaǵı *keńisliktegi topar* dep ataladı. Usı keńisliktegi topardıń járdeminde kristaldıǵı atomlardıń jaylasıwları, yaǵnıy onıń ishki strukturasınıń simmetriyası tolıǵı menen anıqlanadı.

Barlıǵı bolıp 230 keńisliktegi toparlar bar (olar E.S.Fedorov tárepinen tabılǵan). Bul toparlardı kristallografiyalıq sistemalar boyınsha bólistiriw qabıl etilgen. Biz bul jerde barlıq keńisliktegi toparlardı sanap otırmaymız, al tep bul toparlar hár qıylı sistemalar boyınsha qalay tarqalǵanlıǵın kórsetip ótemiz:

Triklinlik	2	Tetragonallıq	68
Monoklinlik	13	Geksagonallıq	45
Rombalıq	59	Kublıq	36
Romboedrlik	7		

41-paragrafta molekullardıǵı aynalıq izomeriya haqqında gáp etilip edi. Bul qubılıs kristallarda da orın aladı (bul jerde onı *enantiomorfizim* dep ataydı). Sonday kristallar bar, olardıń pánjereleri bir biriniń aynalıq sáwlesi bolıp tabıladı, olar bir biri menen keńisliktegi hesh bir kóshiriwlerdiń járdeminde úylespeydi. Molekullardıǵıday sıyaqlı kristallardıń enantiomorfizmi pánjerede qanday da bir tegislikte shağılıstırıwdı óz ishine alatuǵın simmetriya elementi bolmaǵan jaǵdayda orın aladı. Bunday strukturanıń mısalı retinde romboedrlik sistemaǵa kırıwshı ádettegi kvarctı kórsetiwge boladı (bul ádettegedey temperaturalardıǵı kvarctıń modifikatsiyası bolıp tabıladı).

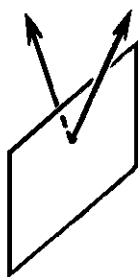
§ 45. Kristallıq klasslar

Zatlardıń atomlıq qurılısı tikkeley sezilmeytuǵın kóp sanlı fizikalıq qubılıs bar. Bunday qubılıslardı izertlegende zatlar ishki qurılısı itibarǵa alınbay, tutas ortalıq dep qaraladı. Mısál retinde denelerdiń jıllılıqtan keńeyiwın, sırtqı kúshlerdiń tásirinde olardıń deformatsiyalanıwın h.t.b. kórsetiwge boladı. Zatlardıń tutas ortalıq sıpatındaǵı qásiyetleri *makroskopiyalıq qásiyetler* dep ataladı.

Kristallardıń makroskopiyalıq qásiyetleri olardaǵı hár qıylı baǵıtlar boyınsha hár qıylı. Mısalı jaqtılıqtıń kristall arqalı ótiwiniń ózgeshelikleri nurdıń baǵıtına baylanıslı; jıllılıqtan keńeyiw hár qıylı baǵıtlar boyınsha hár qıylı; kristalldıń deformatsiyası da sırtqı kúshlerdiń orientatsiyasına baylanıslı h.t.b. Nóásiyettiń baǵıtlarǵa gárezli bolıwı, álbette, kristalldıń qurılısına baylanıslı. Mısalı kublıq kristaldı kublıq qutışalardıń qabırǵaları baǵıtında soziw onıń kólemlik diagonalınıń baǵıtında soziw menen birdey bolmaytuǵanlıǵı ózi ózinen túsiniqli.

Deneniń fizikalıq qásiyetleriniń baǵıttan gárezlilikigi *anizotropiya* dep ataladı. Kristaldı anizotropiyalıq ortalıq dep qarawǵa boladı. Bunday kóz-qaras boyınsha kristallar qásiyetleri barlıq baǵıtlar boyınsha birdey bolǵan *izotropiyalıq ortalıqlardan* (suyıqlıqlar menen gazler) principiallıq jaqtan ayrılıp turadı.

Kristallardıń qásiyetleri ulıwma túrde aytqanda hár qıylı baǵıtlar boyınsha hár qıylı bolǵanı menen ayırım baǵıtlarda qásiyetler birdey



19-сүрөт

bolıwı múmkin; bunday baǵıtlar ekvivalent baǵıtlar bolıp tabıladı. Mısalı, eger kristall simmetriya orayına iye bolsa, onda hár bir baǵıtqa qarama-qarsı baǵıt ekvivalent; kristalda simmetriya tegisligi orın alǵan jaǵdayda hár bir baǵıtqa usı baǵıttı sol tegislikte shashıratıwdıń nátiyjesinde alınǵan baǵıt ekvivalent bolıp shıǵadı (19-súwret) h.t.b.

!lbette, kristaldaǵı "baǵıtlar simmetriyası" hám sonıń menen birge kristaldıń makroskopiyalıq qásiyetleriniń simmetriyası onıń simmetriya kósherleri hám tegislikleri menen anıqlanadı. Bul jerde translyaciyalıq simmetriyanıń tásiiri az, sebebi pánjereni ózi ózine parallel qaldırıp kóshiriw ondaǵı baǵıtlardı ózgerterpeydi. Sonlıqtan makroskopiyalıq qásiyetler ushın kristaldıń qanday Brave pánjeresine iye bolǵanlıǵı áhmiyetke iye emes (berilgen sistemada bar bolǵan Brave pánjereleri názerde tutılmaqta). Bunday kóz-qarastan kristaldaǵı berilgen tártiptegi ápiwayı yamasa vintlik simmetriya kósherleriniń bar bolıwı, tap sol sıyaqlı bar simmetriya tegisliginiń ápiwayı ekenligi yamasa aynalıq-jılıtıwshı tegislik ekenligi áhmiyetke iye emes.

Kristallardaǵı baǵıtlardıń simmetriyasın táriyipleytuǵın simmetriya kósherleri menen tegislikleriniń múmkin bolǵan kombinaciýalarınń sanı shekli, al atap aytqanda 32. Bul kombinaciýalar – kristaldıń yamasa anizotropiyalıq ortalıqtıń simmetriyasınıń tipleri *kristallıq klasslar* dep ataladı.

Joqarıda ayılǵanlardan keńisliktegi toparlar menen onıń klassları arasında belgili bir baylanıstıń bar ekenligi óz ózinen túsinikli. Klasslar keńisliktegi toparlardan kelip shıǵadı. Bul jaǵdayda barlıq translyaciýalardıń dıqqatqa alınbawı, ápiwayı hám vintlik kósherler, ápiwayı hám jılıp shashıratıwshı tegislikler arasındalıq ayırmalar esapqa alınbawı kerek.

Kristallıq klasslar da keńisliklerdegi toparlar sıyaqlı kristallardaǵı Brave pánjeresiniń qanday ekenligine baylanıslı sistemalar boyınsha bólistirilgen. Triklinlik sistemaǵa 2, monoklinlik sistemaǵa 3, rombıalıq sistemaǵa 5 hám geksagonallıq sistemaǵa 7 klass (bul jerde romboedrlik sistemanıń barlıq klassları Braveniń geksagonallıq pánjeresi menen de, romboedrlik pánjeresi menen de beriliwiniń múmkin ekenligin atap ótemiz) kiredi.

Berilgen sistemaǵa kiriwshi klasslardıń ishinde sistemanıń tolıq simmetriyasına iye bolatuǵınları da bar. Nealǵan klasslar tómenirek simmetriyaǵa iye bolıp sáykes sistema iye bolǵan simmetriyaǵa qaraǵanda tómenirek simmetriyaǵa iye boladı.

Kristaldıń makroskopiyalıq qásiyetiniń simmetriya menen baylanıslılıǵınıń mısalı retinde jıllılıqtan keńeyiwın qaraymız.

Izotrop deneler bolǵan suyıqlıq yamasa gaz qızdırılǵanda barlıq táreplerge birdey bolıp keńeyedi; sonlıqtan bir jıllılıqqa keńeyiw koefficientine iye boladı. Tap usınday qásiyetiniń kublıq kristallargá da tiyisli ekenligin ańsat kóriwge boladı. Haqıyqatında da kublıq kristall keńeyiwdiń nátiyjesinde kublıq kristall bolıp qalıwı kerek. Sonlıqtan bunday kristall barlıq táreplerge birdey bolıp keńeyedi hám izotroplıq deneniń qásiyetine sáykes qásiyetke iye boladı.

Tetragonallıq kristall qızdırıwdıń nátiyjesinde tetragonallıq kristall bolıp qalatuǵın bolsa da, onıń qutıshasınıń biyikligi s nıń eni a ǵa qatnasınıń turaqlı bolıp qalıwı shárt emes. Sonlıqtan kristall qutıshasınıń biyikligi hám oǵan perpendikulyar baǵıtlarda hár qıylı bolıp keńeyedi. Basqa sóz benen aytqanda tetragonallıq kristaldıń jıllılıqtan keńeyiw eki

koefficient penen táriyiplenedi (bul ayılğanlar barlıq bir kósherli kristallar ushın da tán). Al eki kósherli kristallardıń jıllılıqtan keńeyiwı úsh koefficient penen táriyiplenedi hám bul koefficientler úsh kósher boyınsha keńeyiwge sáykes keledi.

§ 46. Ximiyalıq elementlerdiń pánjereleri

Bazı bir haqıyqıy kristallardıń qurılısın táriyiplewge ótiwdiń aldında biz joqarıda pánjereniń túyinlerinde atomlardıń jaylasatuǵınlıǵın aytıp ótkenimizdi, al atomlardıń ornına atom yadroları haqqında aytqannıń durısıraq bolatuǵınlıǵın atap ótemiz. Kristallıq pánjeredege atomlardı noqat sıpatında qaray almaymız; olar pánjereniń kólemin málim dárejede toltırıp turadı, bir biri menen qońısılas atomlar bir birine tiyisip turadı. Usınıń saldarınan molekulalardaǵı sıyaqlı, olardıń sırtqı elektronlıq qabıqları sezilerliktey mayısadı hám izolyaciyalanǵan atomlarǵa salıstırǵanda "kollektivlestiriledi". Sonlıqtan kristaldıń qurılısın tolıq hám dálirek táriyiplewde pánjereniń barlıq kólemi boyınsha "elektronlıq tıǵızlıqtıń" bólistiriliwi gáp etiledi.

Ximiyalıq elementlerdiń kristallıq qurılısınan baslaymız. Elementler tárepinen payda etiletuǵın pánjerelerdiń hár qıylı 40 laǵan túri belgili. Usı pánjereler ishinde júdá quramalaları da bar. Mısalı marganectiń modifikaciýalarınıń biri Braveniń kublıq kólemde oraylasqan pánjeresin payda etip kristallanadı, bir kublıq qutıshada 58 atom jaylasadı (elementar qutıshada 29 atom), kúirttiń bir modifikaciýası qutıshasında 128 atom jaylasqan Braveniń qaptalda oraylasqan pánjeresini iye (elementar qutıshada 32 atom). Biraq usıǵan qaramastan elementlerdiń basım kópshiligi ápiwayı pánjerelerdi payda etip kristallanadı.

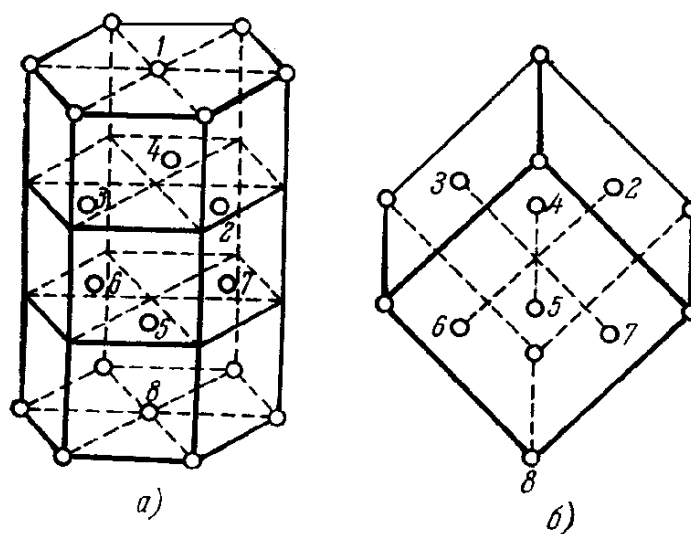
SHama menen jigirma element bir qaptalda oraylasqan Brave pánjeresin payda etip kublıq kristallardı payda etedi. Buǵan kóplegen metallar (Ag, Au, Cu, Al hám baqalar) hám inert gazlerdiń kristalları kiredi. On bestey elementtiń (metallardıń) kristallarında atomlar Braveniń bir kólemde oraylasqan kublıq pánjeresin payda etedi. Siltili metallardıń (Li, Na, K) kristalları tap usınday qurılısqa iye. Sonıń menen birge hesh bir ximiyalıq element ápiwayı kublıq qurılısqa iye emes.

Kólemde hám qaptalda oraylasqan qurılıslardıń artıqmashlıǵın túsindiriw ushın tereń fizikalıq mániske iye bolmasa da bir máseleni qarap shıǵamız. Bul másele óziniń qoyılıwı menen birdey sharlardı jaylastırıwǵa baylanıslı.

Dáslep sharlardı kublıq pánjere túrinde jaylastırıwdı qaraymız. Bunday pánjerede kublıq qutıshalardıń bir biri menen qońısılas tóbelerinde jaylasqan sharlar bir birine tiyisedi. Sonlıqtan kubtıń qabırǵası a sharlardıń diametri d ǵa teń. Hár bir kublıq qutıshaǵa bir birden shar sáykes keletuǵın bolǵanlıqtan bir shargá $a^3 = d^3$ kólemi sáykes keledi dep ayta alamız. SHardıń óziniń kólemi $\frac{4\pi}{3} \frac{d^3}{8} = 0.52d^3$ qa teń, yaǵnıy qutıshanıń kóleminiń 52 procentin quraydı.

Tıǵızlıqqa kóbirek itibar beretuǵın bolsaq kólemde oraylasqan kublıq pánjere dıqqat orayında turadı. Bunday jaǵdayda bir birine tiyisip turatuǵın jaqın qońısılar qutıshanıń orayında hám tóbelerinde turǵan atomlar bolıp tabıladı. Kubtıń keńisliklik diagonalınıń uzınlıǵı $a\sqrt{3}$ ke teń bolǵanlıqtan $d = \frac{a\sqrt{3}}{2}$ teńliginiń orınlanıwı kerek. Bunnan kublıq

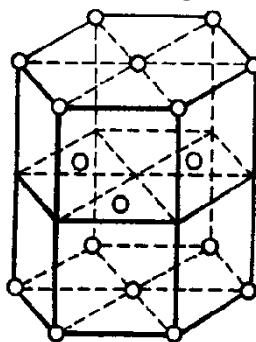
qutishanıń kólemi $a^3=8d^3/3\sqrt{3}$ ke teń. Biraq kólemde oraylasqan hár bir elementar qutışaǵa eki atomnan sáykes keledi. Al bir shardı óz ishine alatuǵın elementar qutışanıń kólemi $4d^3/3\sqrt{3}$ ke teń; sonlıqtan shardıń bul kólemniń 68 procentin toltırıp turatuǵınlıǵın ańsat esaplawǵa boladı.



20-cyypet

Atomlardı tıǵız etip jaylastırıwdıń eń utımlı usıllarınıń biri qaptalda oraylasqan kublıq pánjere bolıp tabıladı. (usı sebepke baylanıslı usınday qurılıstı *kublıq tıǵız etip jaylastırıw* dep te ataydı). Bul jaǵdayda qutışanıń qaptalıń orayında jaylasqan atom qutışanıń tóbelerinde jaylasqan atomlar menen tiyisip turadı. Sonlıqtan kubtıń qabırǵasınıń uzınlıǵı $a=d\sqrt{2}$ ge teń. Elementar qutışanıń kólemi kubtıń kóleminen 4 ese kishi hám $\frac{a^3}{4}=\frac{d^3}{\sqrt{2}}$ ge teń. Sonlıqtan shar bul jaǵdayda bul kólemniń 73 procentin toltırıp turadı.

Eger usı pánjerege kubtıń diagonalı baǵıtında qaraytuǵın bolsaq, onda pánjereni belgili bir izbe-izliktegi qatlamlardan turadı dep táriyiplewge boladı. Hár bir qatlamda túyinler (sharlardıń orayları) durıs úsh múyeshliklerden turatuǵın tor payda etedi (20-a súwret). Hár bir kelesi qatlamda túyinler tómendegi qatlamdaǵı úsh múyeshliklerdiń ortasında jaylasadı. Usınday bolıp túyinlerdi (sharlardı) izbe-iz jaylastırıwdıń úsh usılı bar (20-a hám b súwretlerde cıfrlar járdeminde usı qatlamlardıń túyinleri menen kublıq qutışanıń túyinleri arasındaqı sáykeslik kórsetilgen).



21-cyypet

Sonday tıǵız etip jaylastırıwdı qatlamlardıń tek eki túrin ǵana diziw arqalı payda etiwge boladı (21-súwret). Bunday jaǵdayda elementar qutışasında eki atom bolatuǵın geksagonallıq pánjere qalıplesedi. Bunday pánjereni *geksagonallıq tıǵız jaylastırıw* dep ataydı. SHarlar jaǵdayında prizma tárizli qutışanıń biyikligi s nıń (bir birine jaqın bolǵan

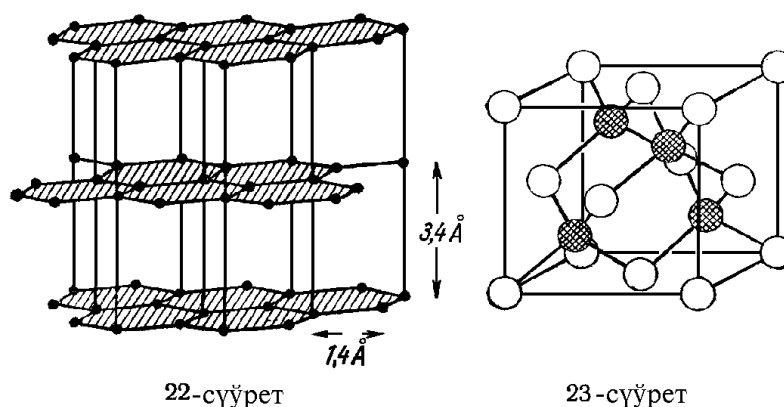
birdey qatlamlar arasındagi qashıqlıq) onıń ultanınıń uzınılıǵı a ǵa qatnası $s/a=1.63$ ke teń bolıwınıń kerekligin ańsat esaplawǵa boladı.

Geksagonallıq tıǵız jaylastırılǵan tiptegi pánjerege shama menen on bes element (metall) iye: Mg, Cd, Zn, Ni hám basqalar. Bul elementlerde kósherlerdiń qatnası ideallıq mánis bolǵan 1.63 ke júdá jaqın. Biraq bunnan ózgeshe jaǵdaylar da orın alǵan; Sd menen Zn te s/a qatnası shama menen 1.9 ǵa teń, yaǵnıy pánjere prizmanıń uzınılıǵı baǵıtında sozılǵan. Bul jaǵday bul kristallardıń anizotropılıǵınıń ayqın kóriniwine alıp keledi.

Joqarıda táriyiplengen pánjerelerdiń úsh túri elementler arasındagi eń kóp tarqalǵanı bolıp tabıladı. Usılar menen qatar ózine tán pánjereler de bar. Bunday pánjerelerge az sandaǵı elementler iye. Solardıń bazı birewleri haqqında aytıp ótemiz.

Uglerodtıń eń kóp tarqalǵan modifikaciyası grafit geksagonallıq pánjerege iye. Bunday pánjere payda etiw menen grafitten basqa hesh bir element kristallanbaydı. Bul pánjere qatımlıq xarakterge iye: pánjere atomlar durıs altı múyeshliklerdiń tóbelerinde jaylasqan, tegis, bir birine parallel bolǵan qatlamlardan turadı (22-súwret). Nıońıslas qatlamlar arasındagi qashıqlıq qatlam ishindegi atomlar arasındagi qashıqlıqtan 2.3 ese úlken. Bul jaǵday grafitiń ańsat qatlamlanıwına alıp keledi.

Uglerodtıń basqa modifikaciyası almaz kublıq pánjerege iye. Bul kublıq pánjereni bir birinen kubtıń diagonalınıń tórtten birine jılastırılǵan Braveniń eki qaptaldan oraylasqan pánjeresinen turadı dep qarawǵa boladı. Usınıń nátiyjesinde uglerodtıń hár bir atomı birdey qashıqlıqlarda tetraedrdiń tóbelerinde jaylasqan tórt uglerod atomı menen qorshalǵan bolıp shıǵadı. Bul pánjere 23-súwrette keltirilgen (bul súwrettegi boyalǵan hám boyalmaǵan dóńgelekler Braveniń hár qıylı pánjerelerine sáykes keliwshi uglerod atomlarına sáykes keledi). Almaz tipindegi pánjerege uglerodtıń gomologları bolǵan kremniy menen germaniy iye.



Vismuttiń pánjeresi qızıq xarakterge iye. Ol romboedrlik sistemaǵa jatadı, biraq kublıqqa jaqınılıǵı menen úlken áhmiyetke iye. Vismuttiń pánjeresin azmaz deformaciyalǵan ápiwayı kublıq pánjere sıpatında kóz aldǵa keltiriw múmkin: kub óziniń kólemlik diagonalı baǵıtında sozılǵan (yaǵnıy kub romboedrge aylanadı) hám sonıń menen birge atomlardıń kishi qosımsha awısıwı orın aladı.

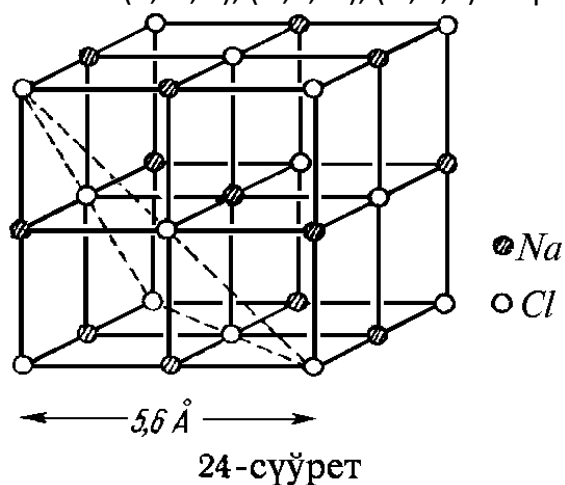
Joqarıda táriyiplengen elementlerdiń pánjereleri *atomlıq* xarakterge iye: bul jerde ayırım molekualardı ayırıp alıw múmkin emes. Bazı bir elementler *molekulalıq pánjerelerde* kristallanadı. Mısalı vodorod, azot, kislorod hám galoidlar (F, Cl, Br, I) eki atomlıq molekuladan turatuǵınday bolıp pánjere payda etedi. Bunday pánjerede eki atom basqa atomlarǵa qaraǵanda jaqınraq jaylasadı.

§ 47. Birikpelerdiń pánjereleri

Ximiyalıq birikpelerdiń ózleri qanday dárejede hár túrli bolsa, olardıń kristallıq pánjereleri de sonshama hár túrli boladı. Biz bul jerde solardıń ishindegilerdiń eń ápiwayıların táriyipleymiz.

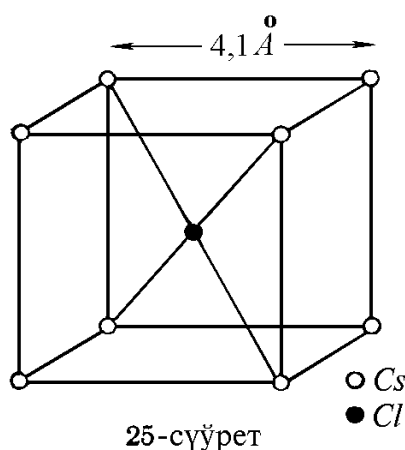
Eń kóp tarqalğan strukturalardıń biri NaCl tas duzı tipindegi pánjere bolıp tabıladı. Bul kublıq pánjere bolıp, onıń yarımı Na atomları, al yarımı Cl atomları menen iyelengen (24-súwret). Na dıń hár bir atomı simmetriyalı túrde Cl dıń altı atomı menen qorshalğan hám Cl dıń hár bir atomı simmetriyalı túrde Na dıń altı atomı menen qorshalğan. NaCl dıń Bragg pánjeresi qaptalda oraylasqan kublıq pánjere bolıp tabıladı. Hár bir elementar qutışadı eki atom bolıp, olardıń biri Na, ekinshisi Cl.

Kristallıq pánjerede atomnıń qaysı orında turǵanlıǵın olardıń koordinataların beriw arqalı anıqlaw qabıl etilgen. Koordinatalar sisteması 43-paragrafta kórsetilgen tártipte saylap alınadı. Bunday jaǵdayda tek minimal sandaǵı atomlardı kórsetiw kerek, al qalğan atomlar iyelegen orınlardıń koordinataları sol atomlardıń koordinatalarına pánjereniń anaw yamasa mınaw dáwirin qosıw arqalı tabıladı. Mısalı NaCl dıń strukturası kublıq qutışanıń kósherlerine salıstırǵandaǵı tómendegidey koordinatalar menen táriyiplenedi: Na (0,0,0), Cl ($\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}$). Basq atomlardıń koordinataları usı koordinatalarǵa tiykarǵı dáwirlerge teń bazı bir sanlardı qosıw (yamasa alıw) menen tabıladı. Bunday sanlar retinde koordinata basınan qaptal betiniń eń jaqın oraylarına shekemgi úsh aralıqtı saylap alıwǵa boladı. Bul koordinataları (0, $\frac{1}{2}, \frac{1}{2}$), ($\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2}$), ($\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0$) noqatları bolıp tabıladı.



Xlorlı ceziy CsCl dıń tipindegi pánjerege júdá kóp tarqalğan (25-súwret). Ol ápiwayı Bragg pánjeresine iye. Kublıq qutışalardıń tóbelerinde bir sorttaǵı, al oraylarında ekinshi sorttaǵı atomlar jaylasadı.

Cink obmankası ZnS tipindegi pánjereni de itibarǵa alıp ótemiz. Ol 46-paragrafta gáp etilgen almaz pánjeresinen alınadı. Bunıń ushın bir birine salıstırǵanda jılistırılǵan eki pánjereniń túyinlerine (23-súwrettegi boyalǵan hám boyalmaǵan dóńgelekler) Zn hám S atomların orналаstırıp shıǵıw kerek. Hár bir Zn atomı tetraedrdiń tóbelerinde jaylasqan tórt S atomı menen qorshalğan. Tap sol sıyaqlı hár bir S atomı sonday tetraedrdiń tóbelerinde jaylasqan tórt Zn atomı menen qorshalğan. Kublıq qutışadaǵı atomlardıń iyelegen orınları tómendegidey koordinatalar menen beriledi: Zn (0,0,0), S ($\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}$).



Joqarida táriyiplengen pánjerelerdiń tiykarǵı ózgesheligi bolıp olardaǵı ayırım atomlar toparların – birikpelerdiń molekuların ayırıp alıwdıń múmkinshiliginiń joqlıǵında. Tutası menen alınǵan kristaldıń ózi gigant molekula bolıp tabıladı.

Bunday pánjerelerdegi elektronlardıń tarqalıwı tómendegidey: bir yadrolar dógeresinde neytral atomdaǵıǵa qaraǵanda kóp, al basqa yadrolar dógeresinde neytral atomdaǵıǵa qaraǵanda kem elektronlar jaylasadı. Bunday pánjerelerdi ionlardan turadı dep táriyiplegen durıs boladı, sonlıqtan da olardı *ionlıq* dep ataydı. Mısalı NaCl dıń pánjeresi oń zaryadlangan Na^+ ionlarınan hám teris zaryadlangan Cl^- ionlarınan turadı.

Ayırım molekularadı atomlardıń bir birine jaqın jaylasqan toparı dep qarawǵa bolatuǵın da birikpelerdiń pánjereleri bar (buǵan kóplegen organikalıq kristallar mısál bola aladı). Biraq kristallardı atomlıq yamasa molekularlıq dep bóliw shártli xarakterge iye hám olar arasında hár qıylı aralıqlıq hallardıń bolıwı múmkin.

Bunday jaǵdaydaǵı kristallargá mısál retinde SdI_2 pánjeresin kórsetiwge boladı. Ol qatlamlıq qurılısqá iye. Hár bir Sd atomlarınıń qatlamına eki tárepten I atomlarınıń qatlamları tiyip turadı; al usınday "úshlik" qatlamlar menen basqa "úshlik" qatlamlar arasında ádewir qashılıq bar. Bul jaǵday bul zattıń molekularlıq quramı haqqında aytqanı menen hár bir qatlamnıń ishindegi ayırım molekulanı bólip alıw pútkilley múmkin emes.

§ 48. Kristallıq tegislikler

Kristallardı úyregende onıń bir biri menen kesisetetuǵın hár qıylı tegisliklerin qarap shıǵıwǵa tuwra keledi. Bul kristaldıń tábiyiy qaptal betine sáykes keletuǵın tegislik bolıwı múmkin. Sonıń menen birge bul tegislik belgili bir fizikalıq qásiyetke iye bolıwı da múmkin; mısalı pıshaqtıń járdeminde ayırım kristallardı shıtnattırsaq, onda bul kristallar belgili bir tegislikler boyınsha bóleklerge bólinedi. Pánjeredegi ayırım tegislikti qarap shıǵıw rentgen nurlarınıń járdeminde ámelge asırılatuǵın strukturalıq analizdiń usılları ushın da zárúrli.

Neanday da bir fizikalıq qásiyetke kristaldıń atomları arqalı ótiwshi (yaǵnıy onıń pánjeresiniń túyinleri arqalı) tegisliklerdiń iye bolatuǵınlıǵı óz ózinen túsinikli. Atap aytqanda usınday tegisliklerdi bizler qaraymız hám olardı *kristallıq tegislikler* dep ataymız.

43-paragrafta kristallardı úyregende kósherleri Brave pánjeresiniń qabırǵaları menen baylanısqan (ulıwma jaǵdayda tuwrı múyeshli emes) koordinatar sistemasınan paydalanılatuǵınlıǵı aytılıp ótilgen edi. Neala berse bul jaǵdayda koordinatar qabırǵalardıń uzınlıqları (ulıwma jaǵdayda hár qıylı bolǵan) a , b , c shamalarınıń birliginde ólshenedi.

Bul koordinatalardı x , u , z araqlı belgileyik. Brave pánjeresiniń túyinleriniń koordinataları pútin sanlarǵa teń (yamasa yarımǵa iye pútin sanlar menen, biraq bul jaǵdaydıń hesh nárseni de ózgerťpeytuǵınlıǵın aldımızda kóremiz).

Tegisliktiń ulıwma teńlemesi (tuwrı múyeshli, tuwrı múyeshli emes koordinatalarda da birdey) mınaday túrge iye:

$$lx + mu + nz = k.$$

Eger l , m , n , k pútin sanlar bolıp tabılatuǵın bolsa, onda belgisiz úsh x , u , z shamaları ushın jazılǵan bir teńleme sheksiz kóp pútin sanlıq sheshimlerge iye boladı. Basqa sóz benen aytqanda tegislikte pánjereniń sheksiz kóp túyinleri jaylasadı, yaǵnıy biz kristallıq tegislikke iye bolamız.

l , m , n shamalarınıń mánislerin ańsat anıqlawǵa boladı. Teńlemege $u=z=0$ mánislerin qoyıp biz $x=k/l$ di alamız. Bul tegisliktiń x kósherin kesip ótiw noqatınıń koordinatası. Tap sonday jollar menen tegisliktiń u hám z kósherlerin kesip ótiw noqatlarınıń k/m hám k/n ge teń ekenligin alıwımız múmkin. Bunnan tegisliktiń úsh koordinata kósherlerin kesip ótiw noqatlarınıń koordinataları

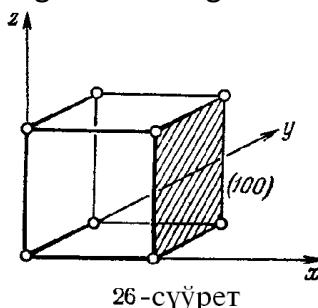
$$\frac{1}{l} : \frac{1}{m} : \frac{1}{n}$$

shamalarınıń qatnaslarınday boladı dep juwmaq shıǵaramız (yaǵnıy olar l , m , n sanlarına keri proporcional eken). Biz bul jerde a , b , c birliklerindeki ólshenetuǵın uzınlıqlar haqqında aytıp atırǵanlıǵınmızdı eske túsirip ótemiz. Al ádettegi birlikler bul qatnaslar bılay jazıladı:

$$\frac{a}{l} : \frac{b}{m} : \frac{c}{n}$$

Solay etip l , m , n sanlarınıń járdeminde tegisliktiń pánjereniń kósherlerine salıstırǵandaǵı baǵıtı (orientaciyası) anıqlanadı eken; k sanı tegisliktiń baǵıtınan ǵárezli emes, al sol tegisliktiń koordinata basınan qanday qashıqlıqtan ótetuǵınlıǵına baylanıslı. Usı k sanına hár qıylı pútin sanlardı beriw arqalı (l , m , n niń berilgen mánislerinde) óz-ara parallel bolǵan kristallıq tegisliklerdiń semeystvosın alamız. Kristallıq tegislikte bizdi tek onıń baǵıtı qızıqtıradı, al pánjeredegi usı tegisliktiń absolyut awhalı kerek bolmaydı. Usınday mániste tegislik l , m , n sanları járdeminde tolıǵı menen beriledi. Sonıń menen birge bul sanlardı ulıwmalıq bólimge qısqartıw da múmkin; bunday jaǵdayda tegisliktiń baǵıtınıń ózgermeytuǵınlıǵı túsiniqli. Usınday jollar menen anıqlanǵan l , m , n sanları kristallıq tegisliklerdiń *indeksleri* dep ataladı hám qawsırmaǵa alınıp (lmn) túrinde jazıladı.

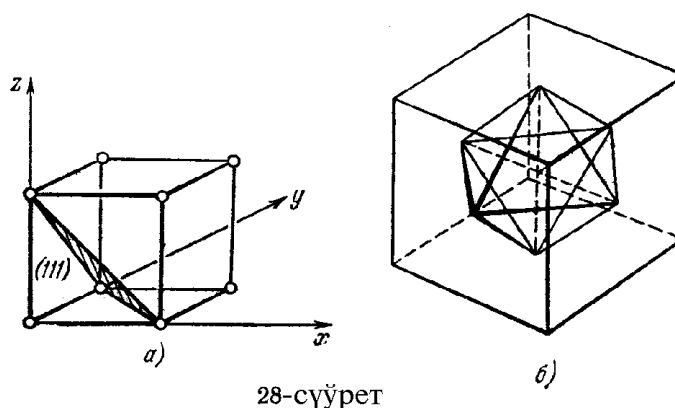
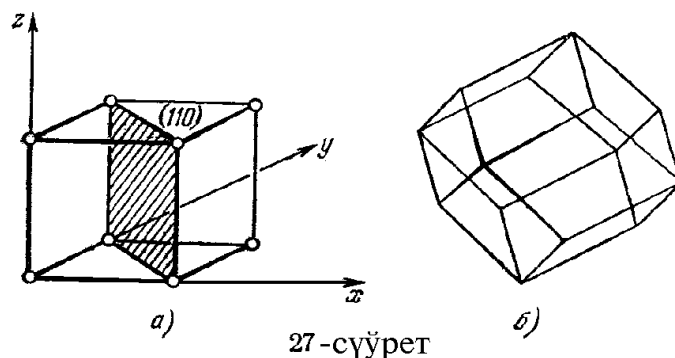
Mısal retinde kublıq pánjeredegi bazı bir tegisliklerdi qarap ótemiz.



26-сүрет

26-súwrettegi x kósherine perpendikulyar tegislik kósherlerde 1, ζ , ζ kesindilerin kesip ótedi; bul shamalardıń keri mánisleri 1, 0, 0 bolıp tabıladı; sonlıqtan tegisliktiń indeksleri (100) ge teń. Tap sol sıyaqlı u hám z kósherlerine perpendikulyar bolǵan tegisliklerdiń indeksleri sáykes (010) hám (001) boladı. Usınday tegisliklerdiń jıynaǵı kublıq formadaǵı deneni sheklep turadı, sonlıqtan bul tegisliklerdi *kubtıń tegislikleri* dep ataydı.

z kósherine parallel bolğan diagonallıq tegislik x hám u kósherleri boyınsha birdey kesindilerdi kesip ótedi (27-a súwret). Sonlıqtan ol (110) indekslerine iye. Bunday diagonallıq tegisliklerdi *rombalıq dodekaedr* tegislikleri dep ataydı (sebebi usınday tegislikler dodekaedr dep atalatuǵın on eki qaptalǵa iye figuranı shekleydi, 27-b súwret).



28-a súwrette kórsetilgen kubtıń diagonallıq tegisligi barlıq úsh kósher boyınsha da birdey kesindilerdi kesedi hám sonlıqtan onıń indeksleri (111) bolıp tabıladı. Onı *oktaedr tegislikleri* dep ataydı (usınday tegislikler sheklep turatuǵın úsh múyeshli qaptal betlerine iye segiz múyeshli figuranı oktaedr dep ataydı). 28-b súwrette keltirilgen oktaedr kubtıń altı qaptalarınń orayların biri biri menen tutastırıwdıń nátiyjesinde alınadı.

§ 49. Kristallardıń tábiyiy qaptalları

Tábiyiy kristaldı sheklep turatuǵın tegislikler barlıq waqıtta da onıń pánjeresiniń atomları arqalı ótedi. Sonlıqtan olar kristallıq tegislikler bolıp tabıladı. Kristallardıń hár qıylı qaptal betleriniń baǵıtları hám olardıń bir biri menen payda etetuǵın múyeshleri pánjereniń qurılısı menen baylanıslı hám sonlıqtan berilgen zattıń xarakterli qásiyetleriniń biri bolıp tabıladı.

(lmn) hám ($l'm'n'$) indekslerine iye kristaldıń eki qaptal betin qarayıq. A, V, S hám A', V', S' arqalı usı tegisliklerdiń koordinata kósherin keskende payda etetuǵın kesindilerin belgileyik. 48-paragrafta sóz etilgen usı uzınlıqlardıń ádettegidey uzınlıqlar birligindegi qatnasımınaǵan teń:

$$A:V:S = \frac{a}{l} : \frac{b}{m} : \frac{c}{n}, \quad A':V':S' = \frac{a}{l'} : \frac{b}{m'} : \frac{c}{n'}.$$

Bul qatnaslardıń birinshisin ekinshisine bólsek:

$$\frac{A}{A'} : \frac{B}{B'} : \frac{C}{C'} = \frac{l'}{l} : \frac{m'}{m} : \frac{n'}{n}.$$

l, m, n shamalariniń ortaǵ bólimlerine kóbeytiw arqalı bul ańlatpanı bazı bir úsh pútin sanlardıń qatnaslarına alıp keliw múmkin.

Solay etip biz kristaldıń qandayda bir qaptal beti tárepinen kósherlerde kesip alınatuǵın kesindilerdiń qatnasları barlıq waqıtta da pútin sanlardıń qatnaslarınday bolatuǵınlıǵın kórdik. Bul qaǵıyda *qaptallardıń racionallıq nızamı* dep ataladı.

Ionlıq kristallardıń betleri sózsiz hár qıylı belgige iye ionlardan turawı kerek. tek ǵana bir belgige iye bolǵan ionlardan turatuǵın tegislikler kristallardıń qaptal betleri bola almaydı. Bul jaǵday hár qıylı zatlardıń kristallanıwınıń ózgesheliklerin túsindiriwge múmkinshilik beredi.

Pánjeresi 24-súwrette kórsetilgen NaSl kristallın qarap ótemiz. Bul súwrette (100) hám (111) tegisliklerindeki Na^+ hám Sl^- ionlarınıń jaylasıwları kórsetilgen. 24-súwrette punktir menen belgilengen diagonallıq (111) tegisligi arqalı tek bir sorttaǵı ionlar ótedi. Sonlıqtan bul tegislik kristaldıń qaptal beti bola almaydı hám demek tas duzı oktaedrler túrinde kristallana almaydı. (001) tegisligi bolsa (24-súwrettegi kubtıń qaptal beti) eki tárepten de gezeklesetuǵın hár qıylı belgige iye ionlardan turadı, sonlıqtan NaSl kub formasında kristallana aladı.

Al 25-súwrette kórsetilgen SsSl kristallarında bolsa (100) tegisligi tek bir belgige iye ionlardan turadı, sonlıqtan bul zat kub formasında kristallana almaydı.

Makroskopiyalıq qásiyetleri sıyaqlı kristallardıń sırtqı formasınıń xarakteri kristallıq klassqa baylanıslı. Sonlıqtan tábiyiy kristallardıń formaların úyreniw principinde onıń simmetriyasınıń klassın anıqlawǵa múmkinshilik beredi. Al ámelde bolsa kristall óskende tosınnan orın alatuǵın hár qıylı sırtqı tásirlerde sırtqı formasınıń ózgeriske usırawınan klasstı anıqlaw qıyınshılıǵı payda boladı. Bul baǵıttaǵı qosımsha maǵlıwmatlardı kristallardıń jańa betlerin jasalma túrde payda etiw menen ámelge asırıladı (mısalı kristaldıń qaptal betine qanday da bir eritkishti paydalanıp ximiyalıq tásir etiwdiń nátiyjesinde).

VII BAP. JYLLYLıQ

§ 50. Temperatura

Tábiyattaǵı barlıq denelerdi qurawshı bóleksheler qozǵalısta boladı. Bul qozǵalıstı universallıq xarakterge iye: molekulalar barlıq waqıtta da qozǵaladı, al tap sol sıyaqlı óz gezeginde molekulalar ishindeki atomlar da qozǵalısta boladı. Bul qozǵalıstıń xarakterli ózgeshelikleriniń biri tártiptiń joqlıǵında. Molekulalardıń, atomlardıń qozǵalıstında hesh qanday tártip bolmaydı.

Usınday qozǵalıstı haqqında aytqanda *jıllılıq qozǵalıstı* sıpatında aytiladı. Jıllılıqtıń hám jıllılıq qubılıslarınıń tábiyatı usı qozǵalıstardıń tártipsizliginde bolıp tabıladı.

Jıllılıq qozǵalıstı haqqında aytqanda ádette atomlıq masshtablardaǵı qozǵalıstı aytilatuǵın bolsa da (bunday jaǵdaylarda mikroskopiyalıq masshtablarda dep te ataydı), bunday qozǵalıstıǵa úlken, makroskopiyalıq mastablardaǵı bóleksheler de qatnasadı. Usı jaǵdaydıń keńnen belgili bolǵan mısalı retinde Broun qozǵalıstın (suyıqlıqtaǵı mikroskop arkalı kórinetuǵın mayda bólekshelerdiń tártipsiz qozǵalıstın) atap kórsetiwge boladı.

Eger eki deneni bir birine tiygizsek, onda usı eki deneniń atomları óz-ara soqlıǵısıp energiya almasıw júzege keledi. Solay etip eki deneniń biri ekinshisine tiyse energiya birewinen ekinshisine ótedi; usınday jaǵdayda energiyasın joǵaltatugın deneni joqarıraq qızdırılǵan, al energiya ótken denini tóménirek qızdırılǵan dep ataydı. Energiyanıń bir deneden ekinshi denegé ótiwi *jıllılıq teń salmaqlıq halı* dep atalatuǵın anıq bir hal payda bolǵansha dawam etedi.

Deneniń qızdırılǵanlıq dárejesiniń xarakteristikası retinde temperatura túsiniǵı qollanıladı. Principinde bul shamanıń (temperaturanıń) sanlıq táriyiplemesi sıpatında denelerdiń qásiyetleriniń qızdırılıw dárejesine baylanıslılıǵın alıw múmkin. Mısalı temperatura shkalasın berilgen dene menen jıllılıq teń salmaqlılıǵında turǵan sınap baǵanasınıń kólemi járdeminde anıqlawǵa boladı. Biraq ıqtıyarlı túrde alınǵan bunday temperaturalıq shkala qanday da bir tereń fizikalıq mániske iye bola almaydı. Usınday jollar menen anıqlanǵan temperatura basqa qálegen jıllılıq qubılısın sapalıq táriyiplegende úlken qolaysızlıqlar payda etken bolar edi. Sonlıqtan eń dáslep tereń fizikalıq mániske iye bolǵan temperaturalıq shkalanı saylap alıwımız kerek. Bul shkala zattıń anaw yamasa mınaw qásiyetine (mısalı paydalanılǵan sınap penen ıdıtırn qásiyetine) baylanıslı bolmawı shárt.

Fizikada temperaturalıq shkala sıpatında barlıq denelerdiń ulıwmalıq fizikalıq qásiyetleri menen tereń baylanısqa iye *termodinamikalıq* yamasa *absolyut shkala* dep atalatuǵın temperaturalıq shkala qollanıladı. Onıń dál anıqlamasın bul jerde beriw múmkin emes. Sebebi bunday anıqlama beriw ushın bul kitaptıń sheklerinen shıǵıp ketiw talap etiletuǵın teoriyalıq tallaw talap etiledi. Sonlıqtan bul shkalanı onıń ekinshi dárejeli qásiyetleri boyınsha táriyipleymiz.

Temperaturanı fizikalıq jaqtan tallaw deneniń halın táriyiplewshi hám jıllılıq teń salmaqlılıǵında barlıq deneler ushın avtomat túrde birdey bolatuǵın fizikalıq shamaǵa tiykarlanǵan bolıwınıń kerekligi óz-ózinen túsiniikli. Bunday oǵada áhmiyetli qásiyetke deneniń bóleksheleriniń (molekulalar menen atomlardıń) ilgerilemeli qozǵalıslarınıń ortasha kinetikalıq energiyası iye boladı eken. Eger eki deneniń bóleksheleriniń ortasha kinetikalıq energiyaları teń bolsa, onda bul bóleksheler bir biri menen energiya almasadı, biraq bir deneden ekinshi denegé summalıq energiyanıń ótiwi orın almaydı.

Usınday sebepke baylanıslı deneniń ishinidegi bólekshelerdiń ilgerilemeli qozǵalıslarınıń ortasha kinetikalıq energiyasın temperaturanıń ólshemi rentinde saylap alıw múmkin. Temperatura T nı usı energiyanıń $2/3$ bólegi sıpatında anıqlaw qabil etilgen:

$$T = \frac{2}{3} \frac{\overline{mv^2}}{2} = \frac{1}{3} \overline{mv^2}$$

Bul jerde m arqalı deneniń massası, al v arqalı onıń tezligi belgilengen. Ańlatpanıń ústindegi sızıqsha kinetikalıq energiya boyınsha ortasha mánistiń alınıwınıń kerekligin kórsetedi (ortasha mánis dep ayılǵanda hár qıylı bólekshelerdiń bir waqıt momentindegi ortasha kinetikalıq energiyası yamasa bir bóleksheniń hár kıylı waqıt momentlerindegi ortasha kinetikalıq energiyası názerde tutiladı, usı eki anıqlama da bir birine ekvivalent).

Joqarıda keltirilgen anıqlama boyınsha temperatura energiyanıń ólshemindey ólshemge iye boladı. Sonlıqtan temperaturanı erglerde ólshew múmkin. Biraq temperaturanıń ólshem birligi sıpatında erg qolaysız birlik bolıp tabıladı. Sebebi bólekshelerdiń jıllılıq qozǵalıslarınıń energiyası erg ke salıstırǵanda júdá kishi shama bolıp

tabıladı. Sonıń menen birge bólekshelerdiń energiyasında etip temperaturanı tikkeley ólshew dım qıyın bolıp tabıladı.

Usı sebeplerge baylanıslı fizikada temperaturanı ólshew ushın ámeliy jaqtan qolaylı bolǵan ólshem birlik *gradustan* paydalanadı. Gradus taza suwdıń atmosferalıq basımdaǵı qaynaw temperaturası menen qatıw temperaturasınıń ayırmasınıń júzden bir bólegi bolıp tabıladı.

Ergtiń kaday bóleginiń bir gradusta ekenligin anıqlawshı koefficientti (bir ólshem birlikten ekinshi ólshem birlikke ótkeretuǵın koefficientti ótkeriw koefficienti dep ataymız) Bolcman turaqlısı dep ataydı hám k háripi járdeminde belgilenedi.

$$k = 1.38 \cdot 10^{-16} \text{ erg/grad (awdarmashı keltirgen dál mánisi } 1.380658(12) \cdot 10^{-16} \text{ erg/grad)}.$$

Bul jerde biz gradustıń haqıyatında da ergten júdá kishi ekenligin kóremiz. Gradustıń shamasınıń jáne bir xarakteristikası retinde zattıń bir gramm-molekulasındaǵı barlıq bólekshelerdiń kinetikalıq energiylarınıń qosındısıń keltiremiz; bul shama k nı Avagadro sanı N_0 ǵa kóbeytkenge teń:

$$kN_0 = 1.38 \cdot 10^{-16} \cdot 6.02 \cdot 10^{23} \text{ erg} = 8.31 \text{ dj}.$$

Ádette atom fizikasında keńnen qollanılatuǵın energiyanıń ólshem birliǵi bolǵan elektron-volt penen gradus arasındaǵı ótkeriwshı koefficienttiń nege teń ekenligin de atap ótemiz:

$$1 \text{ ev} = 1.60 \cdot 10^{-12} \text{ erg} = \frac{1.60 \cdot 10^{-12}}{1.38 \cdot 10^{-16}} \text{ grad} = 11600 \text{ grad}.$$

Bunnan keyin bizler graduslarda ólshengen temperaturanı T háripi járdeminde belgileymiz. Bunday jaǵdaylarda erglerde ólshengen temperatura kT ǵa teń bolıp, joqarıda jazılǵan anıqlamanı bilayınsha jazamız:

$$kT = \frac{1}{3} \overline{mv^2}$$

Kinetikalıq energiya oń mániske iye bolatuǵın bolǵanlıqtan temperatura T da barlıq waqıtta oń mániske iye boladı. Biraq temperaturanıń mánisiniń oń ekenligin tábiyattıń nızamı sıpatında qarawǵa bolmaydı: bul tek temperaturanıń anıqlamasınıń saldarı ǵana.

Joqarıda aytılıp ótilgenindey etip alıńǵan temperatura shkalası absolyut temperaturalar shkalası dep ataladı. Bul shkaladaǵı nol jıllılıq qozǵalısları pútkilley toqtaytuǵın temperatura bolıp tabıladı. Usı noldi absolyut nol dep ataydı. Al absolyut nolden baslap esaplanatuǵın shkalanı *Kelvin shkalası* dep te ataydı, al bul shkaladaǵı graduslardı K háripin qoyıw menen belgileydi.

Kelvin shkalası menen bir qatar ámelde temperaturanı suwdıń katiw nokatınan baslap ólsheytuǵın shkala da keńnen qollanıladı. Bunday shkalanı *Celsiya shkalası* dep ataydı. Al bunday shkaladaǵı graduslardı $^{\circ}\text{S}$ arqalı belgileydi.

Temperaturanı bir shkaladan ekinshi shkalaǵa ótkeriw ushın suwdıń qatıw noqatınıń absolyut temperaturanıń nege teń ekenligin biliw kerek. Házirgi waqıtlardaǵı ólshewlerdiń nátiyjesi boyınsha bul temperatura 273.15 K ge teń. Basqa sóz benen aytqanda Celsiya shkalası boyınsha absolyut nol -273.15°S da jaylasqan.

Endigiden bılay biz absolyut temperaturanı T háripi járdeminde, al Celsiya shkalasındaǵı temperaturanı (eger kerek bolıp qalsa) t háripi járdeminde belgileymiz. $T = t + 273.15^{\circ}$ ekenligi óz-ózinen túsinikli.

Kóp jaǵdaylarda anaw yamasa mınaw eksperiment ójire temperaturasında ótkerildi dep aytadı. Bunday jaǵdaylarda 20°S (yaǵnıy shama menen 293 K) názerde tutiladı.

Elektron-voltlerde bul temperaturanıń shama menen $1/40$ ev ke teń ekenligin bilip qoyǵan paydalı.

Bólekshelerdiń jıllılıq qozǵalıslarınıń tezliginiń xarakteristikası retinde temperaturanıń anıqlamasına kırıwshi $\overline{v^2}$ tıń kvadrat koreninen paydalanıw múmkin. Bunday tezlikti ádette *jıllılıq tezligi* dep ataydı hám v_j arqalı belgileydi:

$$v_j = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}.$$

Qanday massanıń qoyılıwına baylanıslı bul formula atomnıń da, molekulanıń da, Broun bólekshesiniń de jıllılıq tezligin anıqlaydı. Eger molekulalarǵa qollanatuǵın bolsaq, onda formulaǵa basqasha túr beriledi: koren belgisi astındaǵı ańlatpanı Avagadro sanına bólemiz hám kóbeytemiz, bunnan keyin mN_0 diń zattıń molekulalıq salmaǵı μ ekenligin esapqa alamız:

$$v_T = \sqrt{\frac{3N_0kT}{\mu}} = 15.3 * 10^3 \sqrt{\frac{T}{\mu}} \frac{\text{sm}}{\text{sek}}.$$

Solay etip vodorod molekulalarınıń (N_2 , $\mu=2$) ójire temperaturasındaǵı jıllılıq tezligi $1.9*10^5 \text{ sm/sek}$, yaǵnıy shama menen 2 km/sek ekenligine iye bolamız.

Biz jıllılıq tezliginiń temperaturanıń kvadrat korenine tuwrı proporcional, al bóleksheniń massasınıń kvadrat korenine keri proporcional ekenligin kóremiz. Keyingi jaǵday denelerdiń molekulaları ushın intensivli, Broun qozǵalıсындаǵı mikroskopiyalıq kishi bóleksheler ushın sezilerliktey, al massalı deneler ushın pútkilley sezilmeytuǵınlıǵınıń sebebi bolıp tabıladı.

Joqarıda keltirilgen temperaturanıń anıqlamasına qayta kelemiz. Ol anıqlamanıń klassikalıq mexanikaǵa tiykarlanǵanlıǵın atap ótemiz. Ol jerdegi temperatura menen bólekshelerdiń jıllılıq qozǵalıslarınıń energiyası arasındaǵı sanlıq baylanıs bul qozǵalıstıń klassikalıq mexanika járdeminde táriyipleniwiń múmkinliginen ǵana kelip shıqqan. Temperaturanıń tómenlewi menen bólekshelerdiń energiyası da kemeyedi hám klassikalıq mexanikanıń paydalanılıw shártleri erteli-kesh buzıladı. Sonlıqtan klasikalıq mexanikanı kvant mexanikasına menen almasırw zárúrligi payda boladı. Bóleksheniń massası qanshama kishi bolsa hám bóleksheniń qozǵalısları oǵan tásir etiwshi kúshler tásirinde sheklengenlik dárejesine baylanıslı kvant mexanikasın paydalanıw zárúrligi erterek júzege keledi. Mısalı, molekulalar erkin bóleksheler sıpatında ilgerilemeli qozǵaladı ham bul qozǵalıslar klassikalıq mexanika kóz-qarasları tiykarında qaralıwı múmkin. Al atomlardıń molekulalar ishindegi qozǵalısları anıq bir teń salmaqlıq awhallar átirapındaǵı "potencial shuqırdaǵı" kishi terbelisler xarakterine iye. Klassikalıq mexanikanıń bunday qozǵalıslarǵa qollanılıw shekleri ádewir erterek júzege keledi (bul máselege biz 57-58 paragraflarda qayta kelemiz).

Biz joqarıda absolyut nol temperaturada jıllılıq qozǵalıslarınıń toqtaytuǵınlıǵın aytıp ótip edik. Biraq bul tastıyıqlaw deneniń ishindegi bólekshelerdiń qálegen qozǵalıslarınıń toqtaytuǵınlıǵın ańǵartpaydı. Kvant mexanikasına boyınsha bólekshelerdiń qozǵalısları tolıǵı menen hesh kashan da toqtamaydı. Hátte absolyut nolde de molekulalar ishindegi atomlardıń bazı bir terbelmeli qozǵalısları yamasa qattı deneniń kristallıq pánjeresiniń túyinleri átirapındaǵı atomlardıń terbelisi saqlanadı. *Nollik terbelisler* dep atalatuǵın bunday qozǵalıslar kvantlıq qubılıs bolıp tabıladı. Bunday qozǵalıstıń energiyası anaw yamasa minaw obьektıń "kvantlıǵı" ushın xarakterlik shama bolıp tabıladı. Bólekshelerdiń jıllılıq qozǵalıslarınıń energiyası menen olardıń nollik terbelisleriniń

energiyaların salıstırıw klassikalıq mexanikanı paydalanılıwdıń kriteriyi bolıp tabıladı. Eger bóleksheniń jıllılıq energiyası onıń nollik terbelisleriniń energiyasınan úlken bolsa klassikalıq mexanikanı paydalanıw múmkin.

Absolyut nolde de saqlanatugın "nollik qozgalıstırın" eń belgili mısallarıńnıń biri atomlardıǵı eń jeńil bolǵan bóleksheler bolǵan elektronlardıń qozǵalıstı bolıp tabıladı. Elektronlardıń atomlar ishindegi qozǵalıstı barlıq wakıtta da kvantlıq xarakterge iye. Elektron ushın usınday qozǵalıstırın energiyası úlken bolǵanlıqtan deneniń temperaturası ol ushın sezilerliktey tásir etpeydi. Kóplegen mır gradus temperaturalarda ǵana atomlardıń jıllılıq qozǵalıstı onıń elektronlıq qabıqlarına sezilerliktey tásir ete baslaydı.

§ 51. Basım

Gaz (yamasa suyıqlıq) bóleksheleriniń jıllılıq qozǵalıstılarınń nátiyjesinde ıdıstırın diywallarına basım túsiredi. Gazdın molekulları ıdı diywalların menen soqlıǵısıp, oǵan bazı bir impulsın beredi, al deneniń impulsınıń ózgerisi (1 sek dawamındaǵı) oǵan tásir etetuǵın kúshti anıqlaydı.

Eger gaz tárepinen ıdı diywalına tásir etetuǵın kúshtiń diywal betine qatnasın alatuǵın bolsaq, onda ıdı diywalınıń betine gaz tárepinen túsiriletuǵın *basımdı* alamız.

Basımdı biz r háripini járdeminde belgileymiz. Basımınıń ólshemi kúshtiń ólshemi bólingen maydanniń ólshemine teń. Onı hár qıylı túrde jazıw múmkin:

$$[r] = \frac{\text{din}}{\text{sm}^2} = \frac{\text{erg}}{\text{sm}^3} = \frac{g}{\text{sm} \cdot \text{sek}^2}.$$

Bul jerde biz basımınıń ólsheminiń kólemniń ólshemine bólingen energiyanıń ólshemine teń ekenligin kóremiz.

SGS sistemasındaǵı basımınıń ólshemi 1 din/sm^2 (1 *din* kúsh 1 sm^2 maydanǵa tásir etedi). Biraq bul birlik júdá kishi, bunnan 10^6 ese úlken birlikti *bar* dep ataydı:

$$1 \text{ bar} = 10^6 \text{ din/sm}^2 = 10 \text{ n/m}^2.$$

1 sm^2 maydanǵa 1 kG kúsh tásir etetuǵın basımdı texnikalıq atmosfera dep ataydı (*at*):

$$1 \text{ at} = 1 \text{ kG/sm}^2 = 0.981 \text{ bar}.$$

Bul anıqlamadan basqa *ádettegidey atmosfera (normal atmosfera, atm)* dep 760 mm sinap baǵanasınıń basımın aladı (sinaptıń anıq tıǵızlıǵı hám salmaq kúshiniń standart mánisinde). Bul birlik mınaǵan tań:

$$1 \text{ atm} = 1.013 \text{ bar} = 1.033 \text{ at}.$$

1 mm sinap baǵanasınıń basımına sáykes keliwshi basımını

$$1 \text{ mm sin.baǵ.} = 1.333 \cdot 10^{-3} \text{ bar}$$

ekenligin atap ótemiz.

Molekulalaq strukturaǵa itibar berilmey tutası menen alıńandaǵı denelerdiń qásiyetleri denelerdiń makroskopiyalıq qásiyetleri dep ataladı (haqıyqatında denelerdiń qásiyetleri molekulalıq strukturaǵa baylanıslı). Al temperatura menen basım denelerdiń makroskopiyalıq qásiyetlerin xarakterlewshi áhmiyetli shamalar bolıp tabıladı. Usınday shamalar qatarına deneniń kólemi de (onı V haripi járdeminde belgileymiz) kiredi. Biraq bul úsh shamalar bir birinen ǵárezsiz emes. Mısalı, eger gazdın bazı bir muǵdarı belgili bir kólemdegi ıdısta jaylasqan hám belgili bir temperaturaǵa iye bolsa, onda ol avtomat túrde

belgili bir basımda da turgan boladı. Kólemin yamasa temperaturasını ózgertip gazdıń basımın da ózgertemiz.

Solay etip r , V , T shamalarınń ekewiniń iqtıyarlı túrde beriliwi múmkin, al úshinshisi sol ekewiniń funkciyası túrinde anıqlanadı. Usıǵan baylanıslı deneniń jıllılıq kásiyeti sol shamardıń ekewiniń beriliwi menen tolıq anıqlanadı dep aytıwǵa boladı.

Deneniń basımın, kólemin hám temperaturasını baylanıstıratuǵın funkcionallıq baylanıstı berilgen deneniń *hal teńlemesi* dep ataydı hám onı jıllılıq qásiyetlerin táriyiplewshi áhmiyetli qatnaslardıń biri bolıp tabıladı.

Bunday funkcionallıq baylanıstıń teoriyalıq túrin anıqlaw tek ápiwayı zatlar jaǵdayında ǵana ámelge asırıladı (53-paragraftı qarańız). Sonlıqtan ámelde nátiyjesin grafikalıq jol menen kórsetiw múmkin bolǵan eksperimentallıq ólshewlerdi paydalanıwǵa zárúrlık tuwıladı. Gáp úsh shamanıń bir birinen ǵárezlilik haqqında aytılıp atırǵanlıqtan, alıńǵan nátiyjeler kósherleri r, V hám T bolǵan úsh ólshemli kenislikte bazı bir bet túrinde sáwlelenedi. Biraq ámelde kenisliktegi súwretlerdi salıw qolaysız bolǵanlıqtan sol bettiń koordinata tegislikleri menen kesilispe bolǵan tegis grafiklerdi dúziw menen sheklenedi. Mısalı, betti r , V koordinata tegisligine parallel bolǵan tegislikler menen kesip hár qıylı temperaturalarǵa sáykes keliwshi basımń kólemge ǵárezliliğine sáykes keliwshi iymekliklerdiń semeystvosın alamız. Bunday iymekler *izotermalar* dep ataladı. Tap usınday jollar menen *izobaralardıń* (berilgen basım r daǵı kólem V menen temperatura T arasındǵı ǵárezlilik) hám *izoxoralardıń* (kólem V turaqlı bolǵandaǵı basım r menen temperatura T arasındǵı ǵárezlilik) semeystvoların da alıw múmkin.

50-paragrafta biz bir birine tiygizilgen deneler arasındǵı energiya almasıwdıń sol denelerdiń temperaturaları birdey bolǵansha dawam etetuǵınlıǵın aytıp ótken edik. Ulıwma sistemanıń jıllılıq teń salmaqlıq halı dep sistemada ózinshe hesh qanday jıllılıq processleri júrmeytuǵın, deneniń barlıq bólimleri bir birine salıstırǵanda tınıshlıqta turatuǵın, makroskopiyalıq qozǵalıslar orın almaytuǵın halına aytamız (deneniń ishindegi bólekshelerdiń mikroskopiyalıq qozǵalıslarınan basqa). Endi biz usıǵan mınanı qosamız: teń salmaqlıq halında bir birine tiyip turgan denelerdiń temperaturaları ǵana emes, al olardıń basımları da teń bolıwı kerek dep aytamız. Eger bunday bolmaǵanda denegе nolge teń emes tolıq kúsh tásir etip, ol qozǵala baslaǵan bolar edi.

Ádettegi jaǵdaylarda deneniń basımı oń shama, yaǵnıy basım deneniń keńeyiw baǵıtına qaray baǵıtlanǵan. Biraq bul shárt emes hám dene teris basım halında da turaladı: bunday jaǵdayda dene "keńeytilgen" bolıp, ol qısılwǵa tırısadı. Mısalı suyıqlıqtıń "keńeytilgen" halın júzege keltiriw múmkin. Bunıń ushın qızdırılǵan suyıqlıqtı qalıń diywallı kapıllıyǵa toltırıp quyıp, bunnan keyin bul kapıllıyadıń awızın dánekerlew kerek. Solqınlaǵanda diywalları suyıqlıqtan ásterek kısılatuǵın kapıllıyada suyıqlıq usı kapıllıyadıń kóleminiń tek bir bólimin ǵana iyelewı kerek. Diywallarǵa jabısıp suyıqlıq kapıllıyadıń barlıq kólemi boyınsha "keneytilgen" (yamasa "siyrekletilgen") bolıp shıǵadı. Basqa bir usılda suyıqlıq eki ushı ashıq óz kósheri dógereginde tez aylanıwshı shıyshe kapıllıyada jaylastırıladı. Oraydan qashıwshı kúshlerdiń tásirinde "keńeyip" tezliktiń belgili bir mánislerinde suyıqlıq kapıllıyadan shıǵadı. Usınday usıllar járdeminde ádewir úlken teris basımlardı payda etiw múmkin: suwda (ójire temperaturalarında) 280 atm ǵa shekem, spirtte 40 atm ǵa shekem, benzolda 160 atm ǵa shekem h.t.b. Bul shamalar suyıqlıqtıń "úziliwge" bekkemligin beredi dep aytıwǵa boladı.

§ 52. Zatların agregat halları

Denelerin jillıq qásiyetleriniń eń ulıwmalıq xarakteristikaları sıpatında *agregat hallar* - gaz tárizli, suyıq hám qattı hallar túsiniń qollanadı.

Zatlar gaz tárizli halda turǵandaǵı siyrekliginiń nátiyjesinde onıń molekuları bir birinen ádewir qashılıqta turadı (ózleriniń menshikli ólshemlerine salıstırǵanda ádewir úlken qashılıq). Sonlıqtan gazdegi molekular arasındaǵı tásirlesiw ekinshi dárejeli orındı iyeleydi; molekular waqıttıń kóp bóleginde erkin kozǵaladı, tek salıstırmalı siyrek bir biri menen soqlıǵıadı. Suyıqlıqlarda bolsa molekular arasındaǵı qashılıq olardıń ólshemleri menen barabar; usınıń nátiyjesinde molekular turaqlı túrde kúshli tásirlesedi hám olardıń jillılıq kozǵalısları quramalı túrge iye.

Ádettegi jaǵdaylarda gazler menen suyıqlıqlar arasında tıǵızlıqlar boyınsha ayırma az bolıp, olardı bir birinen ayırıw úlken qıyınshılıqlardı payda etedi. Biraq olar arasındaǵı ayırma principiallıq emes, al tek sanlıq jaqtan – tıǵızlıqlarınıń sanlıq ayırması hám soǵan baylanıslı bolǵan molekular arasındaǵı tásirlesiwdiń ayırmasınan kórinedi. Olar arasındaǵı principiallıq ayırmanıń joqlıǵı suyıq hám gaz tárizli hallar arasındaǵı ótiwde de kórinedi. Bunday ótiw úziksiz ámelge asadı hám biz hesh bir momentte bir hal tewsildi hám ekinshi haldıń payda bolıwı baslandı dep ayta almaymız (bul haqqında 69-paragrafta tolıq aytaladı).

Suyıqlıqlar menen *amorf deneler* (kristallıq emes) dep atalatuǵın qattı deneler arasındaǵı ayırma da sanlıq xarakterge iye. Amorf deneler qatarına shiyshe, hár qıylı smolalar (mısalı kanifol) h.t.b. kiredi. Principiallıq ayırmanıń joqlıǵı bul jerde de bir haldan ekinshi halǵa úziksiz ótkende ayqın kórinedi. Bul jaǵdayda ótiw ápiwayı kızıdıw jolı menen ámelge asadı. Mısalı shiyshe qızdıǵanda kem-kemnen jumsaradı hám eń aqırında suyıqlıqqa aylanadı. Bul process pútkilley úziksiz ámelge asıp, hesh bir "ótiw momenti" baqlanbaydı. Óziniń tıǵızlıǵı boyınsha amorf dene usı deneden alınǵan suyıqlıqtıń tıǵızlıǵınan úlken ayırmaǵa iye bolmaydı. Olar arasındaǵı tiykarǵı ayırma olardıń jabısqaqlıǵınıń (yaǵnıy olardıń aqqıshlıǵınıń) ayırmasınan kórinedi (bul máselege biz 118-paragrafta qaytıp kelemiz).

Gezler, suyıqlıqlar hám amorf deneler ushın ulıwmalıq qásiyet olardaǵı molekulardıń tarqalıwındaǵı tártiptiń joqlıǵında. Usı tártiptiń joqlıǵı bul denelerin izotropiyasın – barlıq baǵıtlardaǵı olardıń qásiyetleriniń birdeyligin támiyinleydi. Izotropiyalıq qásiyet bul denelerdi atomları tártip penen jaylasqan anizotropiyalıq kristallıq qattı denelerden principiallıq jaqtan ayırıp turadı.

Qattı denelerdegi atomlardıń jillılıq qozǵalısları olardıń teń salmaqlıq hallarınıń átirapındaǵı kishi terbelisleri bolıp tabıladı. Kristallarda bul hallar kristallıq pánjerelerdiń túyinleri bolıp tabıladı (bunday mániste biz bunnan aldırǵı bapta anıq emes gáp etildi, ol jerde túyinlerde atom yadroları jaylasadı dep ayıldı, al túyinler átirapında terbelisler ámelge asatuǵın noqatlar dep ayılǵan joq). Qattı denelerdegi jillılıq qozǵalısları gazler menen suyıqlıqlardaǵıǵa karaǵanda "tártilpirek" bolsa da (atomlar túyinlerden alısqa qashılısıp ketpeydi) hár qıylı atomlardıń terbelis amplitudaları menen fazaları hár qıylı hám bir birine baylanıslı emes bolǵanlıqtan bunday terbelislerdi xotik dep esaplaymız.

Derlik barlıq qattı deneler kristallıq bolıp tabıladı. Biraq olardıń kóleminiń barlıǵı boyınsha atomlardıń tártipli jaylasıwı orın almaydı. Kóleminiń barlıq bólimlerinde de

atomlar birdey tártipte jaylasatugin kristallardı *monokristallar* dep ataydı hám olar kristaldıń ósiwiniń ayrıqsha sharayatlarında júzege keledi.

Kristallıq deneler ádette *polikristallar* túrinde boladı (mısalı barlıq metallar). Bunday deneler oǵada kóp sandaǵı mayda kristallardıń jıynaǵınan turıp sol kristallardıń hár birin *kristallit* yamasa *dán (zerno)* dep ataydı. Kristallitler ádette mikroskopiyalıq ólshemlerge iye bolıp, olardıń sıızqlı ólshemleri 10^{-5} - 10^{-3} sm átirapında (bul shama metaldıń alınıw hám qayta isleniw usılına tikkeley baylanıslı).

Polikristallıq denedegi ayırım kristallitlerdiń óz-ara jaylasıwları menen baǵıtları pútkilley tártipsiz. Sonlıqtan kristallitlerdiń ólshemlerinen úlken bolǵan polikristallıq zatlar izotrop bolıp tabıladı. Joqarıda ayılǵanlardan polikristallıq denelerdiń izotropılıǵınıń ekinshi dárejedegi xarakterge iye ekenligi túsinikli. Bul har bir kristallittiń anizotropiyalıǵına pútkilley qarama-qarsı bolıp tabıladı.

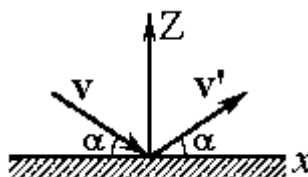
Anaw yamasa mınaw qayta islewdiń yamasa kristaldı ósiriwdiń usılınıń ózgesheliklerine baylanıslı kristallitleri tiykarınan bir baǵıtqa qaray burılǵan polikristallardı alıw (ósiriw) múmkin. Bunday jaǵdaylarda *teksturanıń* bar ekenligi haqqında aytadı. Metallarda tekstura defrmaciyalawdıń nátiyjesinde alınıwı múmkin. Usınday materiallardıń anizotropiyalıq qásiyetlerge iye bolıwı tábiyiy.

§ 53. Ideal gaz

Molekulaları arasındaǵı tásirlesiw ámeliy jaqtan hesh qanday rol oynamaytuǵınday dárejede siyrekletilgen gaz eń ápiwayı qásiyetlerge iye boladı. Molekulaları arasındaǵı tásirlesiw esapqa alınbaytuǵın gaz *ideal gaz* dep ataladı.

Biraq ideal gazdiń molekulaları arasındaǵı tásirlesiw pútkilley orın almaydı dep oylawǵa bolmaydı. Kerisinshe, bunday gazdiń molekulaları bir biri menen soqlıǵısadı hám bul soqlıǵısıwlar gazdiń belgili bir jıllılıq qásiyetleriniń payda bolıwında úlken áhmiyetke iye boladı. Biraq soqlıǵısıwlar júdá siyrek bolıp, gaz molekulaları waqıttıń úlken bóliminde erkin bólekshelerdey bolıp qozǵaladı.

Ideal gazdiń halınıń teńlemesin keltirip shıǵaramız (yaǵnıy basımı, kólemi hám temperaturası arasındaǵı baylanıstı anıqlaymız). Bul ushın gazdi tuwrı múyeshli parallelopiped túrindegi ıdista jaylasqan, al ıdıstıń diywalların "ideal shaǵılıstırǵısh" dep esaplaymız: diywallar soqlıǵıwshı molekulalardı kelip urılǵan múyeshley múyesh penen, tezliklerin ózgertpey shıǵılıstıratuǵın bolsın (1-súwrette molekulanıń soqlıǵısqańa shekemgi hám soqlıǵıskannan keyingi tezlikleri v hám v' arqalı belgilengen, olardıń shamaları birdey hám ıdıs diywalı menen birdey múyesh jasaydı). Bul boljawlar tek ápiwayılıq ushın islengen, haqıyqatında gazdiń ishki qásiyetleri ıdıstıń formasına, diywalınıń qásiyetlerine ǵárezli bola almaydı.



1-súwret

Gazdiń parallepipedtiń qaptatallarına túsiretuǵın basamın anıqlaymız. Bunıń ushın 1 sek dawamında usı qaptalǵa kelip urılatuǵın molekulardıń beretuǵın impulsın anıqlaw kerek. Urılǵanda impulstiń tek ǵana diywal betine perpendikulyar bolǵan qurawshısı v_z ǵana ózgeriske ushıraytuǵın hám bul jaǵdayda tezliktiń tek belgisi ózgeretuǵın bolǵanlıqtan bir urılıwda molekula tárepinen ıdıs diywalına beriletuǵın impuls $mv_z - (-mv_z) = 2mv_z$ ke teń (bul jerde m arqalı molekulanıń massası belgilengen). Erkin sıpatında qozǵala otırıp molekula qarama-qarsı diywalǵa h/v_z waqıt aralıǵında barıp jetedi (h arqalı qarama-qarsı diywallar arasındǵı qashıqlıq belgilengen) hám $2h/v_z$ waqıt aralıǵında qaytıp keledi. Demek 1 sek waqıt ishinde berilgen diywal menen hár bir molekula $v_z/2h$ ret soqlıǵısadı hám oǵan $2mv_z(v_z/2h) = mv_z^2/h$ impulsın beredi. Diywalǵa tásir etiwshi tolıq kúsh \bar{G}_z barlıq molekulalardan 1 sek waqıt ishinde alatuǵın impulsına teń:

$$F_z = \frac{1}{h} \sum m v_z^2.$$

Bul jerdegi \sum belgisi barlıq molekulalar boyınsha summanıń alınatuǵınlıǵın bildiredi.

Eger ıdıstaǵı molekulalar sanı N ge teń bolsa, onda joqarıdaǵı ańlatpadaǵı summanı N menen ortasha mánis bolǵan $\overline{mv_z^2}$ tiń kóbeymesine almasırw kerek. Gazdiń ózine qatnası boyınsha barlıq baǵıtlar birdey $\overline{mv_x^2} = \overline{mv_y^2} = \overline{mv_z^2}$ hám $v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 = v^2$ bolǵanlıqtan

$$\overline{mv_z^2} = \frac{1}{3} \overline{mv^2}.$$

Solay etip

$$F_z = \frac{1}{h} \frac{N}{3} \overline{mv^2}.$$

F_z tı pS penen almasırw (r gazdiń basımı, S qaptal bettiń maydanı) hám hS tiń parallelopipedtiń kólemi ekenligine itibar bersek mınanı alamız:

$$pV = \frac{1}{3} N \overline{mv^2} = \frac{2}{3} N \frac{\overline{mv^2}}{2}.$$

Anıqlama boyınsha molekulanıń kinetikalıq energiyasınıń ortasha mánisi $(3/2)kT$ ǵa teń. Sonlıqtan *ideal gazdiń hal teńlemesin* alamız:

$$pV = NkT.$$

Bul teńleme universallıq xarakterge iye – bul teńlemege gazdiń tábiyatına baylanıslı bolǵan hesh bir shama kirmeydi. Bul jaǵday molekulalardıń "individuallıǵın" (jeke ózgesheligin) biykarlap, olar arasındǵı tásirlesiwdi esapqa almaǵannıń tábiyiy aqıbeti bolıp tabıladı.

Eger birdey kólemde, birdey basımda hám birdey temperaturada turǵan hár qıylı bolǵan eki túrli ideal gazdı alatuǵın bolsaq, onda olardaǵı molekulalar sanı birdey boladı. Bul *Avagadro nızamı* dep atalatuǵın nızam bolıp tabıladı. Mısalı $q \text{ sm}^3$ ideal gaz ádettegidey sharayatlarında (yaǵnıy 0°S temperaturada hám 1 atm basımda)

$$L = \frac{pV}{kT} = \frac{1.013 \cdot 10^6}{1.38 \cdot 10^{-16} \cdot 273} = 2.7 \cdot 10^{19}$$

molekula boladı (bul sandı *Loshmidt sanı* dep te ataydı).

Gazdegi molekulalar sanı N di $N = \nu N_0$ túrinde de jazıw múmkin. Bul jerde ν arqalı gazdiń gramm-molekulaları (mollerı) sanı belgilengen, al N_0 Avagadro sanı. Bunday jaǵdayda bılayınsha jazamız:

$$pV = \nu RT.$$

$R = kN_0$ *gaz turaqlısı* dep ataladı. Dara jaǵdayda gazdiń bir moli ushın iye bolamız:

$$pV = RT.$$

k menen N niń mánislerin kóbeytip mınaǵan iye bolamız:

$$R=8.314 \cdot 10^7 \text{ erg}/(\text{grad} \cdot \text{mol})=8.314 \text{ dj}/(\text{grad} \cdot \text{mol}).$$

(eger energiyaniń ólshem birliǵi retinde kaloriya paydalanılatuǵın bolsa R diń shaması úlken dálilikte $2 \text{ kal}/(\text{grad} \cdot \text{mol})$ ge teń); ólshem birlikti ańlatatuǵın simvoldaǵı *mol* sózi 1 *gramm-molekulanı* ańǵartadı.

Eger gazdiń basımı atmosferalarda, al kólemi litrlerde ólshenetuǵın bolsa, onda

$$R=0.082 \text{ (l} \cdot \text{atm)} / (\text{grad} \cdot \text{mol})$$

ge teń. Bul mánisti paydalanıp gazdiń gramm-molekulasınıń 1 atm basımdaǵı hám 0°S daǵı kólemin esaplaw múmkin:

$$V=RT/p=(0.082 \cdot 273)/1=22.4 \text{ l}.$$

Turaqlı temperaturada belgili muǵdardaǵı gazdiń kólemi menen basımınıń kóbeymesi turaqlı shama boladı:

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

Bul belgili *Boyl-Mariott nızamı* bolıp tabıladı.

Ideal gaz halınıń teńlemesinen jáne bir áhmiyetli nátiye alınadı: eger belgili bir muǵdardaǵı gaz turaqlı basımda jaylasqan bolsa, onda onıń kólemi absolyut temperaturaǵa proporcional. YAǵnıy

$$p = \text{const} \text{ bolǵanda } \frac{V}{V_0} = \frac{T}{T_0}.$$

Bul ańlatpada V menen V_0 temperatura T hám T_0 bolǵandaǵı gazdiń kólemleri. Usınday jollar menen mına ańlatpanı da alamız:

$$V = \text{const} \text{ bolǵanda } \frac{p}{p_0} = \frac{T}{T_0}.$$

Bul áhmiyetli qatnas temperaturalardıń absolyut shkalasın molekulalardıń tezlikleri menen energiyaların ólshemey-aq ideal gazdiń qásiyetlerin paydalanıp anıqlawdıń múmkin ekenligin kórsetedi.

Eger T_0 arqalı suwdıń qatıw temperaturası belgilengen bolsa hám absolyut temperaturanıń ornına Celsiya shkalasındaǵı temperatura t alınsa ($T=273+t$), onda joqarıda jazılǵan qatnas mına túrge enedi:

$$p = \text{const} \text{ bolǵanda } V = V_0 \left(1 + \frac{t}{273}\right).$$

Bul belgili *Gey-Lyussak nızamı* bolıp tabıladı. Bul nızam boyınsha 1° qa qızdırılǵanda gazdiń kólemi 0°S daǵı kóleminiń $1/273$ bólegine artadı.

Ideal gazdiń hal teńlemesin keltirip shıǵarǵanıımızda bizler molekulalardı birdey dep shárt qoyǵanıımız joq. Sonlıqtan alınǵan teńleme ideal gazlerdeń aralaspası bolǵan jaǵday ushın da jaramlı boladı, al bul da óz gezeginde molekulalar arasındaǵı tásirlesiwdi esapqa almaǵanıımızdıń nátiyjesi bolıp tabıladı. Usıǵan baylanıslı N di gaz molekulalarınıń ulıwmalıq sanı dep, yaǵnıy hár qıylı molekulalardıń ulıwmalıq sanı dep esaplawımız kerek: $N = N_1 + N_2 + N_3 + \dots$, bul jerde N_i arqalı i-sort molekulalardıń sanı belgilengen. Dáslep hal teńlemesin bılayınsha kóshirip jazamız:

$$pV = N_1 kT + N_2 kT + N_3 kT + \dots$$

Bunnan keyin eger gazdiń kóleminiń barlıǵın i-sorttaǵı molekulalar iyeleytuǵın bolsa hal teńlemesin $p_i V = N_i kT$ túrinde jazıwımızdıń kerekligin esapqa alıp biz mınaday juwmaqqa kelemiz:

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots$$

YAǵnıy gazlerdiń aralaspasınıń basımı hár bir gaz tap sonday kólemde payda etken basımlardıń qosındısına teń eken (*Dalton nızamı*). Joqarıdaǵı p_1 , p_2 , p_3 basımların sáykes gazlerdiń *parciallıq basımları* dep ataymız.

§ 54. Sırtqı maydandaǵı ideal gaz

Qanday da bir kúsh maydanında, mısalı salmaq maydanında turǵan ideal gazdı qaraymız. Bul jaǵdayda gaz molekulalarına sırtqı kúshler tásir etetuǵın bolǵanlıqtan onıń basımı barlıq orınlarda birdey bolmaydı, al noqattan nokatka ótkende ózgeredi.

Ápiwayılıq ushın maydan kúshleri ózgermeytuǵın baǵıtqa iye jaǵdaydı qaraymız. Bul baǵıt retinde z baǵıtın qabıl etemiz. SHaması bir birinen dz aralıǵına kashıqlasqan hám hár qaysısınıń beti 1 sm^2 bolǵan z ke perpendikulyar eki maydandı alamız. Eger gazdıń basımı eki maydanda r hám dr bolsa, onda basımlar ayırması ultanı 1 sm^2 hám biyikligi dz bolǵan parallelopipedtiń kóleminde jaylastırılǵan gazdıń bólekshelerine tásir etetuǵın qosındı qúshke teń. Bul kúsh $Fndz$ ke teń (molekulalardıń tıǵızlıǵı n , F bolsa z noqatında turǵan bir molekulaǵa tásir etetuǵın kúsh). Sonlıqtan

$$dp = nFdz.$$

Ǵ kúshi molekulanıń potencial energiyası $U(z)$ penen $Ǵ = -dU/dz$ túrinde baylanısqa hám sonlıqtan

$$dp = -ndz \frac{dU}{dz} = -ndU.$$

Gaz ideal gaz dep esaplanganlıqtan $pV = NkT$. $N/V = n$ ekenligin itibarǵa alıp bul teńlemenı $p = nkT$ túrinde kóshirip jazıw múmkin. Gazdıń temperaturası barlıq noqatlarda bardey dep boljaymız. Onda

$$dp = kTdn.$$

Bul ańlatpanı joqarıda alınǵan $dp = -ndU$ ańlatpasına teńep

$$\frac{dn}{n} = d(\ln n) = -\frac{dU}{kT}$$

ekenligin tabamız. Bunnan

$$\ln n = -\frac{U}{kT} + \text{const}$$

hám eń keyninde mına formulanı alamız:

$$n = n_0 e^{-\frac{U}{kT}}.$$

Bul jerde n_0 arqalı $U=0$ noqatındaǵı molekulalardıń tıǵızlıǵına turaqlı shama belgilengen.

Joqarıda alınǵan gazdıń tıǵızlıǵın onıń molekulalarınń potencial energiyası menen baylanıstıratuǵın formula *Bolcman formulası* dep ataladı. Basım tıǵızlıqtan turaqlı kobeyme kT ǵa pariqladı hám sonlıqtan bunday teńleme basım ushın da durıs bolıp tabıladı:

$$p = p_0 e^{-\frac{U}{kT}}.$$

Jer betiniń qasında z biyikligindegi molekulanıń potencial energiyası $U = mgh$ qa teń (m molekulanıń massası). Sonlıqtan eger gazdıń temperaturası biyiklikten ǵárezsiz dep esaplasa, onda z biyikligindegi basım r Jer betindegi basım r_0 menen bılayınsha baylanısqa ekenligin ańsat keltirip shıǵarıwǵa boladı:

$$p = p_0 e^{-\frac{mgz}{kT}}.$$

Bul formula *barometrlık formula* dep ataladı. Bul formulanı bilayınsha kórsetken qolaylıraq:

$$p = p_0 e^{-\frac{\mu g z}{kT}},$$

bul jerde μ arqalı gazdıń molekulalıq salmaǵı belgilengen, R gaz turaqlısı.

Bul formulanı gazlerdiń aralaspası ushın da paydalanıw múmkin. Ideal gazlerdiń molekulaları bir biri menen tásirlespeytuǵın bolǵanlıqtan hár bir gazdi óz aldına qarawǵa boladı, yaǵnıy sáykes formulanı har bir gazdiń parciallıq basımı ushın paydalanıwǵa boladı.

Gazdiń molekulalıq salmaǵı kansha úlken bolsa onıń basımı biyiklikke baylanıslı tezirek kemeyedi. Sonlıqtan biyiklik úlkeygen sayın atmosfera jeńil gazler menen bayıydı; mısalı atmosferada kislorod azotqa salıstırǵanda tezirek kemeyedi.

Biraq haqıyqıy atmosfera ushın barometrlık formulanıń qollanıluwı sheklengen. Sebebi atmosfera haqıyqatında jıllılıq teń salmaqlıǵında bolmaydı hám onıń temperaturası biyiklikke baylanıslı ózgeredi.

Eger Jer betinen qálegen biyikliktegi atmosferaǵa qollanatuǵın bolsaq Bolcman formulasınan qızıqlı nátiyjelerdi shıǵarıwǵa boladı. Jer betinen úlken qashıqlıqlarda U ushın mgz ańlatpasın emes, al bóleksheniń potencial energiyasınıń dál mánisi bolǵan

$$U = -G \frac{Mm}{r}$$

formulasın paydalanamız. Bul jerde G gravitaciya turaqlısı, M Jerdiń massası, r Jerdiń orayınan qashıqlıq (22-paragraftı qarańız). Bul formulanı Bolcman formulasına qoyıw gazdiń tıǵızlıǵı ushın mınaday ańlatpanı beredi:

$$n = n_{\infty} e^{GMm/kTr},$$

bul jerde biz $U=0$ bolǵan orındaǵı (yaǵnıy Jerden sheksiz úlken aralıqqa kashıqlasqan orındaǵı) gazdiń tıǵızılıǵın n_{∞} arqalı belgiledik. Bul ańlatpadaǵı r diń ornına Jerdiń radiusı R di qoysaq, onda sheksizliktegi Jer atmosferasınıń tıǵızlıǵı n_{∞} ti anıqlay alamız:

$$n_{\infty} = n_0 e^{GMm/RkT}.$$

Bul formulada Jer atmosferasınıń Jerden sheksiz úlken qashıqlıqlarda nolge teń bolmaytuǵınlıǵın kóremiz. Bunday nátiyje absurd (mánissiz) bolıp tabıladı. Sebebi atmosferanıń payda bolıwı Jerdiń ózi menen baylanıslı ham gazdiń shekli muǵdarı sheksiz úlken keńislikte tıǵızlıǵı hesh bir jerde joǵalmaytuǵınday bolıp tarqalǵan bolıwı múmkin emes. Bunday juwmaqqa keliwde biz atmosferanı jıllılıq teń salmaqlıǵında turadı dep úndemesten qabıl ettik. Bul haqıyqatlıqqa sáykes kelmeydi. Biraq bul nátiyje gravitaciyalık maydannıń teń salmaqlıqta tarǵan gazdi uslap tura almaytuǵınlıǵın bildiredi. Eger jıllılıq teń salmaqlıǵında turatuǵın bolsa, onda atmosfera kenislikte tarqalıp ketken bolar edi. Jer jaǵdayında bul tarkalıw júdá ástelik penen júredi hám Jer óziniń ómiriniń ishinde óz atmosferasınıń sezilerliktey bólegin jaǵaltqan joq. Biraq, mısalı, Ay jaǵdayında gravitaciyalık maydan ádewir ázzi bolǵanlıqtan atmosferanı joǵaltıw ádewir tezirek júrgen hám usınıń akıbetinde Ay házirgi waqıtları atmosferaǵa iye emes.

§ 55. Maksvell bólistiriliwi

Jıllıq tezligi v_T bólekshelerdiń jıllılıq qozǵalıwınıń ortasha xarakteristikasını beredi. Haqıyqatında hár qıylı molekulalar hár qıylı tezlikler menen qozǵaladı hám molekulalardıń

tezlikler boyınsha bólistiriliwi haqqında máseleni qoyıw múmkin: denedegi molekulalardıń neshewi (ortasha) anaw yamasa mınaw tezlikke iye boladı?

Jıllılıq teń salmaqlıǵında turǵan ideal gaz ushın bul máseleni sheshemiz. Bul ushın bir tekli salmaq maydanında turǵan gaz baǵanasın qaraymız. Dáslep biz gaz molekulalarınń tezliginiń tek vertikalıq qurawshısı v_z boyınsha molekulalardıń tarqalıwın (bólistiriliwin) karaymız.

Tezliginiń qurawshısınıń mánisi bazı bir v_z hám $v_z + dv_z$ shamaları arasındaǵı sheksiz kishi intervaldaǵı jatatuǵın 1 sm^3 gazdegi molekulalar sanın

$$nf(v_z)dv_z$$

arqalı belgileyemiz. Bul jerde n berilgen kólemdegi molekulalardıń ulıwma sanı. Sonlıqtan $f(v_z)$ tezliginiń kurawshısınıń mánisi anaw yamasa mınaw v_z bolǵan molekulalar sanınıń úlesi bolıp tabıladı.

z biyikligindegi gazdıń sheksiz juqa qatlamındaǵı (qalınlıǵı dz) tezlikleri dv_z intervalında bolǵan molekulalardı qaraymız. Bul qatlamnıń kólemi dz ke sáykes keledi (eger gaz baǵanasınıń ultanınıń maydanı 1 sm^2 bolsa). Sonlıqtan qarap atırǵan molekulalardıń sanı mınaǵan teń:

$$n(z)f(v_z)dv_z dz.$$

Bul jerde $n(z)$ gazdıń z biyikligindegi tıǵızlıǵı. Erkin bóleksheler sıpatında qozǵalıp (ideal gazlerdegi soqlıǵısıwları esapqa almawǵa boladı) bul molekulalar bazı bir waqıt ishinde qalınlıǵı dz' bolǵan qatlamdı iyelep z' biyikligine ótedi hám tezligi bazı bir v_z' hám dv_z' aralıǵındaǵı intervalda jatqan shamaǵa qosıladı. Molekulalardıń sanınıń ózgermesligi mına teńlik járdeminde jazıladı:

$$n(z)f(v_z)dv_z dz = n(z')f(v_z')dv_z' dz'.$$

Salmaq maydanındaǵı qozǵalısta tezliktiń gorizont baǵıtındaǵı qurawshaları (v_x, v_y) ózgermeydi, al v_z tiń ózgerisi energiyanıń saqlanıw nızamı boyınsha anıqlanadı:

$$\frac{mv_z^2}{2} + mgz = \frac{mv_z'^2}{2} + mgz'.$$

Bul teńlikti differenciallap (z penen z' tiń berilgen turaqlı mánislerinde) mına qatnastı alamız:

$$v_z dv_z = v_z' dv_z'.$$

Qatlamlardıń qalınlıqları bılayınsha baylanısqan:

$$\frac{dz}{v_z} = \frac{dz'}{v_z'}.$$

Bul ańlatpa mına jaǵdaydı ańlatadı: $dt = dz/v_z$ waqıt aralıǵında molekula z biyikligindegi dz qatlamın kesip ótedi hám z' biyikliginde $dz' = v_z' dt$ aralıǵın ótedi. Eki qatnastı da aǵzama-aǵza kóbeytip mınanı tabamız:

$$dv_z dz = dv_z' dz'.$$

Sonlıqtan molekulalardıń sanınıń turaqlılıǵı shárti boyınsha eki táreptegi differenciallar óz-ara qısqaradı hám biz alamız:

$$n(z)f(v_z) = n(z')f(v_z').$$

Barometrlık formulanıń járdeminde mınanı tabamız:

$$\frac{f(v_z')}{f(v_z)} = \frac{n(v_z)}{n(v_z')} = e^{-\frac{mg}{kT}(z-z')}.$$

Endi

$$mg(z - z') = \frac{mv_z'^2}{2} - \frac{mv_z^2}{2}$$

ekenligin eske túsiremiz hám

$$f(v_z)e^{\frac{mv_z^2}{2kT}} = f(v_z)e^{\frac{mv_z^2}{2kT}}$$

ekenligine iye bolamız. Bul jerde biz alıńǵan kóbeymeniń konstanta ekenligin kóremiz. Basqa sóz benen aytqanda $f(v_z)$ funkciyası tómendegidey túrge iye boladı eken:

$$f(v_z) = \text{const} * e^{-\frac{mv_z^2}{2kT}}.$$

[Bul formulaǵa salmaq kúshiniń tezleniwiniń kirmegenligine itibar beremiz. Usınday bolıwı kerek, sebebi gaz molekularınıń tezlikler boyınsha tarqalıw mexanizmi molekulardıń bir biri menen soqlıǵısıwına baylanıslı hám sırtkı maydangá hesh qanday qatnası joq. Biz joqarıda bayanlaǵan formulanı keltirip shıǵarıwda sırtkı maydan tek járdemshi orındı iyeleydi: bunday maydandı paydalanıwdıń járdeminde tezlikler boyınsha tarqalıwdı bizge belgili Bolcman formulası menen baylanıstırdıq].

Biz tezliktiń bir qurawshısınıń mánisi boyınsha molekulardıń teń salmaqlıq bólistiriliwin (tarqalıwın) taptıq. Al tezliktiń barlıq úsh kurawshısına iye molekulardıń sanı bilayınsha anıqlanadı:

$$f(v_x, v_y, v_z) = \text{const} * e^{-\frac{mv_x^2}{2kT}} e^{-\frac{mv_y^2}{2kT}} e^{-\frac{mv_z^2}{2kT}}.$$

Dáreje kórsetkishlerin qosıp, $v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 = v^2$ ekenligin esapqa alsaq, onda izlenip atırǵan bólistiriwdiń eń keyingi túrin alamız:

$$f = \text{const} * e^{-\frac{mv^2}{2kT}}.$$

Solay etip gazdegi tezlikleriniń qurawshıları v_x, v_y, v_z hám $v_x + dv_x, v_y + dv_y, v_z + dv_z$ arasındagı intervaldagı molekular sanı dN mınaǵan teń:

$$dN = \text{const} * e^{-\frac{mv^2}{2kT}} dv_x dv_y dv_z.$$

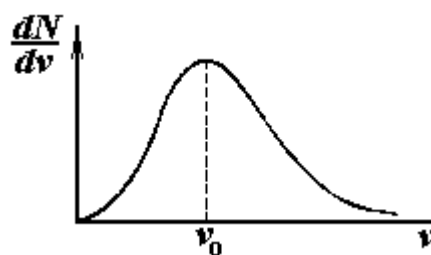
(turaqlı koefficient const tı alıw ushın tezliktiń barlıq múmkin bolǵan mánislerine iye iye molekulardıń sanı gazdegi molekular sanına teń bolıwı kerek dep esaplanadı; biz házir bul koefficienttiń mánisin jazıp otırmaymız). Alıńǵan formula *Maksvell bólistiriliwiniń* formulası dep ataladı.

Joqarıda alıńǵan formulanıń sırtkı maydandagı keńistlik boyınsha molekulardıń tıǵızlıǵınıń bólistiriliwin beretuǵın Bolcman formulasına uqsaslıǵına dıqqat awdaramız: eki jaǵdayda da biz

$$e^{-\frac{\varepsilon}{kT}}$$

túrindegi eksponencial ańlatpaǵa iye bolamız. Bul jerde ε arkalı molekulanıń energiyası belgilengen – tezlikler boyınsha bólistiriliwde kinetikalıq energiya $mv^2/2$, al kenislik boyınsha bólistiriliwde sırtkı maydandagı potencial energiya $U(x,y,z)$. Bunday ańlatpanı kóp jaǵdaylarda *Bolcman kóbeytiwshisi* dep ataydı.

Úsh v_x, v_y, v_z qurawshıların beriw molekulanıń tezliginiń shamasın da, baǵıtın da anıqlaydı. Biraq molekulardıń tezlikleriniń baǵıtları boyınsha bólistiriliwi teń ólsheuli – barlıq baǵıtlarda ortasha birdey sandagı molekular ushadı [Bul tezliklerdiń tek absolyut mánisi kiretuǵın Maksvell bólistiriliwinen de kórinedi. Eger baǵıtlar boyınsha bólistiriliw teń ólsheuli bolmaǵanda gazde molekulardıń qozǵalıwınıń bazı bir artıqmashlıqqa iye baǵtı bolǵan bolar edi, bul gazdiń tınıshlıq halına emes, al bir baǵıttaǵı qozǵalıwına sáykes keledi].



2-súwret

Maksvell formulasın molekularadıń tezlikleriniń absolyut shaması boyınsha bólistiriliwine juwap beretuǵınday etip túrlendiriwge boladı (tezlikleriniń baǵıtları boyınsha emes). Bul ushın tezlikleri $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$ birdey, al tezlikleriniń qurawshıları v_x, v_y, v_z ler hár qıylı bolǵan molekularadıń sanların qosıp shıǵıwımız kerek. Bunı mınaday geometriyalıq analogiyanı qollanıp ańsat islewge boladı: Eger koordinata kósherleri v_x, v_y, v_z bolǵan koordinata sistemasın engizetuǵın bolsaq, onda $dv_x dv_y dv_z$ kóbeymesi tárepleriniń uzınlıqları dv_x, dv_y, dv_z bolǵan sheksiz kishi parallelopipedtiń kólemin beredi. Bizler endi koordinata basınan birdey qashıqlıqlarda turǵan usınday elementar kólemlerdi bir birine qosıp shıǵıwımız kerek (v nıń usı koordinatalardıǵı "radius-vektordıń" uzınlıǵın beretuǵınlıǵı óz-ózinen túsinikli). Bul kólemler radiusları v hám $v+dv$ bolǵan eki sfera arasındǵı shar qatlamın beredi. Onıń qólemi sferalıq bettiń maydanı $4\pi v^2$ menen qatlam qalıńlıǵı dv nıń kóbeymesine teń.

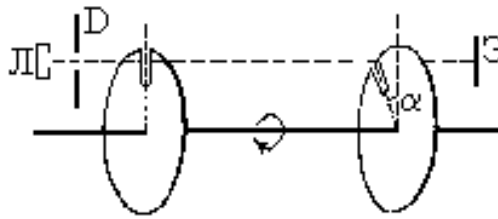
Solay etip Maksvell bólistiriliwindegi $dv_x dv_y dv_z$ kóbeymesin $4\pi v^2 dv$ ge almastırıp biz tezlikleri v menen $v+dv$ aralıǵında bolǵan moleulalar sanın alamız:

$$dN = \text{const} * e^{-\frac{mv^2}{2kT}} v^2 dv.$$

Bul formuladaǵı dv nıń aldında turǵan ańlatpa tezlik birigindegi molekular sanı bolıp tabıladı. Argument v nıń funkciyası sıpatında ol 2-súwrette kórsetilgendey túrge iye boladı. Bul funkciya $v=0$ de nolge teń, al $v=v_0$ mánisinde maksimumǵa jetedi, bunnan keyin tezliktiń úlkeyiwi menen tez nolge umtıladı. Iymekliktiń maksimumı tezliktiń $v_0 = \sqrt{2kT/m}$ mánisine sáykes keledi. Bul tezliktiń shemesı 50-paragrafta anıqlanǵan jıllılıq tezligi v_{jil} tıń shamasınan bir qansha kishi.

Hár qıylı molekular hár qıylı tezliklerge iye bolatuǵın bolǵanlıqtan ortasha xarakteristikalarǵı anıqlaǵanda qanday shamanı ortashalaw kerek ekenligi úlken áhmiyetke iye. Mısalı tezliktiń birinshi dárejesiniń ortasha mánisi \bar{v} nıń mánisi $v_{jil} = \sqrt{\overline{v^2}}$ ǵa sáykes kelmeydi (bul tezliktiń kelip shıǵıwına baylanıslı ortasha kvadratlıq tezlik dep ataydı). Maksvell bólistiriliwinen $\bar{v} = 0.92v_{jil}$ ekenligi kórsetiw múmkin.

Bir atomlı gaz ushın joqarıda keltirilip shıǵarılǵan Maksvell bólistiriliwi haqıyqatında ádewir ulıwmalıraq bolǵan teoriyalıq kóz-qaraslar boyınsha da ámelge asırılıwı múmkin hám universallıq xarakterge iye. Bul bólistiriliw qálegen deneniń atomları hám molekuları ushın durıs orınlanadı. Biraq Maksvell bólistiriliwiniń klassikalıq mexanikaǵa tiykarlanǵanlıǵın atap ótemiz. Sonlıqtan klassikalıq mexanikanıń jıllılıq kızıǵıslarına qullanılıwı qanday bolsa, bul bólistiriliwdiń de qullanılıw shekleri kvantlıq qubılıslar menen sheklengen.



3-súwret

Jıllılıq qozǵalıslarınıń bólistiriliwin eksperimentallıq jaqtan úyreniw moleulalıq dástelerdi paydalanıwshı hár qıylı usıllar menen ámelge asırıladı. Bunday dásteler ishinde hawası sorıp alınǵan kameraǵa zatlardı arnawlı túrde puwlandırıw jolı menen alınadı. Molekulalardıń soqlıǵıspay ushıwı ushın kamerada jetkilikli dárejedege vakuumnıń alınıwı kerek.

Usınday usıllardıń biri tezliklerdiń mexanikalıq selektori ideyasına tiykarlanǵan hám mánisi tómendegilerden turadı: Hawası sorılıp alınǵan keńislikte ulıwmalıq kósherge bekitilgen radial baǵıttaǵı kesimleri bar bir birinen l qashıqlıǵında turǵan eki dóńgelek disk aylanadı. Disktegi kesimler bir birine salıstırǵanda α múyeshine burılǵan (3-súwret). Bul disklerge P peçinen D diafragması arqalı molekulalar dástesi jiberiledi. Birinshi disktegi kesimnen v tezligi menen ótken molekula $t=l/v$ waqtı ishinde ekinshi diskke kelip jetedi. Usı waqt ishinde disk $\Omega t = \Omega l/v$ múyeshine burıladı (Ω arqalı aylanıwdıń múyeshlik tezligi belgilengen). Sonlıqtan ekinshi disktegi kesimnen ótetuǵın molekulalardıń (hám E ekranında iz qaldıratuǵın) tezligi tek Ω/v ni qanaatlandıratuǵın bolıwı kerek. Disklerdiń tezligin ózertip hám ekranǵa kelip jetken molekularadıń tıǵızlıǵın ólshep hár qıylı tezliklerge sáykes keliwshi bólekshelerdiń sanın anıqlay alamız.



4-súwret

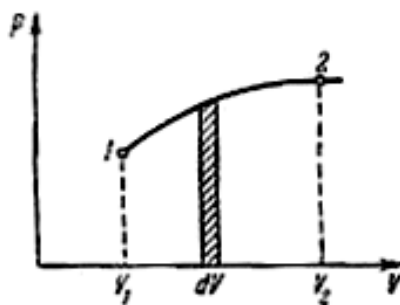
Maksvell bólistiriliwiniń eksperimentte molekulalar dástesiniń salmaq maydanındaǵı awısıwın baqlaw jolı menen de ámelge asırıldı. 1-peçte qızdırılǵan ceziy atomları dástesi (4-súwret) hawası sorılıp alınǵan kameraǵa ótkeriledi. 2- hám 3-diafragmalar járdeminde kesip alınǵan jıńışke dáste salmaq maydanınıń tásirinde tómek karap burıladı hám detektor járdeminde tutıp alınadı. Detektor bolıp 4-qızdırılǵan wolfram sabaǵı xızmet etip, onı ásbaptıń kósherinen h aralıǵına tómekge qoyıw múmkin (sol qızdırılǵan wolfram sabaqqa kelip urılǵan ceziy atomları oń zaryadlanǵan ionlar túrinde sabaqtan ushıp shıǵadı hám teris zaryadlanǵan plastinka járdeminde kaytadan terip alınadı). Atomnıń awısıwı h onıń tezligi v ǵa ǵárezli boladı (tájiriybede dásteniń jolı 2 m bolǵanda awısıwdıń shaması millimetrdiń onnan birin quradı). Hár kıylı h larda dásteniń intensiviligin ólshep biz dástedegi atomlardıń tezlik boyınsha bólistiriliwin anıqlaymız.

§ 56. Jumıs hám jıllılıq muǵdarı

Keñeygende dene ózin qorshaǵan denelerdi ısıradı, yaǵnıy sol ısırılǵan deneler ústinen jumıs isleydi.

Cilinder tárizli ıdistaǵı porshenniń astında turǵan gazdı qaraymız. Eger gaz keñeyse, onda porshendi sheksiz kishi dh aralıǵına ısıradı hám $\bar{G}dh$ qa teń bolǵan dA jumısın isleydi. Bul jerde \bar{G} arqalı porshenge gaz tárepinen tásir etetuǵın kúsh belgilengen. Biraq basımınń anıqlaması boyınsha $\bar{G}=rS$, bul jerde r gazdıń basımı, al S porshenniń maydanı. Sonlıqtan $dA=rSdh$. Sdh shaması boyınsha gazdıń kóleminiń ósimi dV ǵa teń. Sonlıqtan

$$dA=rdV.$$



5-súwret

Bul ápiwayı hám áhmiyetli formula deneniń kólemi sheksiz kishi shamaǵa ózgergendegi elementar processtegi jumıstı anıqlaydı. Biz bul jerde jumıstıń tek ǵana deneniń basımı menen onıń kóleminiń ulıwmalıq ózgerisine baylanıslı ekenligin, al deneniń formasınan ǵárezsiz ekenligin kóremiz (ǵúman payda etpew ushın bul tastıyıqlawdıń qattı denelerge baylanısıń joq ekenligi atap ótemiz, 101-paragraftı qaranız).

Jumıs dA nıń shaması dene keñeygende oń ($dV>0$), bul jaǵdayda dene qorshaǵan ortalıq ústinen jumıs isleydi. Al dene kısılsa ($dV<0$) jumıs qorshaǵan deneler tárepinen dene ústinen islenedi. Bul jaǵdayda biziń anıqlamamız boyınsha teris belgige iye jumıs islenedi.

Eger r hám V koordinataların qollanatuǵın bolsaq anaw yamasa minaw processtegi islengen jumıstı grafikalıq túrde súwretlew múmkin. Meyli gaz qeñeygende onıń basımınıń ózgerisi 5-súwrettegi 1-2 iymekligi menen berilsin. Gazdıń kólemi dV ǵa úlkeygende gaz táreipnen islengen jumıs rdV ǵa teń (yaǵnıy súwrettegi shtrixlangan sheksiz ensiz tuwrı múyeshliktiń maydanına teń). Sonlıqtan gazdıń kólemi V_1 den V_2 ge úlkeygende islengen jumıs iymekliktiń astı hám shetki eki vertikal tuwrılar menen sheklengen $12V_1V_2$ maydanına teń. Solay etip diagrammanıń maydanı biz qarap atırǵan processtegi jumıstı dárhál beredi eken.

Aylanbalı process dep atalatuǵın process jiyi ushırasadı. Bunday processtiń nátiyjesinde dene óziniń dáslepki halına qaytıp keledi. Meyli gazde 6-súwrette kórsetilgen tuyıq 1a2b1 iymekligi boyınsha process júretuǵın bolsın. 1a2 uıastkasında gaz keñeyedi hám 1a2 iymekliginiń tómendegei maydanǵa teń jumıs isleydi. Al 2b1 uıastkasında gaz qısıladı, islengen jumıstıń belgisi teris, al shaması boyınsha 2b1 iymekligi astındaǵı maydanǵa teń. Gaz tárepinen islengen ulıwmalıq jumıs usı eki maydannıń ayırmasına teń (súwrette bul ayırma shtrixlangan).

Turaqlı basımda dene V_1 kóleminden V_2 kólemine shekem keñeygende islengen jumıs ańsat esaplanadı. Ol mınaǵan tań:

$$A=r(V_2-V_1).$$

Endi ideal gazdın izotremalıq keńeygenindegi islengen jumısın anıqlaymız. Gazdın bir gramm-molekulası ushın basım $p = RT/V$. Sonlıqtan

$$dA = p dV = \frac{RT}{V} dV = RT d \ln V.$$

Temperatura turaqlı bolǵanlıqtan $dA = d(RT \ln V)$ dep jaza alamız. Bunnan A jumısınırn processtın bası menen aqırındaǵı $RT \ln V$ shamalarınırn ayırmasına teń ekenligi kelip shıǵadı. YAǵnıy

$$A = RT \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

Eger dene sırttan hesh qanday energiya almaytuǵın bolsa, onda keńeygendegi jumıs deneniń ishki energiyası esabınan islenedi. E arqalı belgilenetuǵın bul energiya zattırn atomlarınırn kinetikalıq energiyaları menen olardıń bir biri menen tásirlesiwiniń potencial energiyalarınırn qosındısına teń boladı.

Biraq bazı bir processlerdegi deneniń ishki energiyasınıń ózgerisi islengen jumıs penen sáykes kelmeydi. Sebebi dene mexanikalıq jumıs islemey-aq energiyasınıń basqa denelerge beriwı (yamasa alıwı) múmkin. Usınday jollar menen alıǵan energiyanı *jıllılıq muǵdarı* dep ataydı. Eger dene jıllılıq alatıtuǵın bolsa biz jıllılıq muǵdarınıń mánisin on dep esaplaymız,. Dene jıllılıq beretuǵın bolsa jıllılıq muǵdarınıń shaması teris belgige iye boladı.

Solay etip deneniń ishki enregiyasınıń sheksiz kishi ózgerisi eki bólimnen turadı: dene tárepinen alıǵan energiyanı (onı dQ arqalı belgileyemiz) esabınan ishki energiya ósedi hám dene tárepinen islengen jumıstın esabınan ishki energiya kemeydi. Demek biz bılayınsha jaza alamız:

$$dE = dQ - rdV.$$

Bul áhmiyetli anlatpa jıllıq processlerindegi energiyanıń saqlanıw nızamın anlatadı (usıǵan baylanıslı bul anlatpanı *termodinamikanıń birinshi nızamı* dep te ataydı).

Jumıs penen jıllılıq muǵarınıń deneniń dáslepki hám aqırǵı hallarına baylanıslı bolıp qoymay, deneniń halı ózgeretuǵın jolǵa da baylanıslı ekenligin atap ótemiz. Usı sebepke baylanıslı "denedegi jıllılıq muǵdarı" dep aytıwǵa hám jıllılıq effektin dáslepki hám aqırǵı hallardıǵı jıllılıq muǵarlarınırn ayırması dep qarawǵa bolmaydı. Bunday túsiniktiń mániske iye emes ekenligi dene óziniń dáslepki halına kaytıp keletuǵın aylanbalı proceslerde kórgizbeli túrde kórinedi. Al jutılǵan (hám shıǵarılǵan) jıllıqtıń ulıwma muǵdarı nolge teń emes.

Tek erkin energiya E ǵana *hal funkciyası* bolıp tabıladı: hár bir anıq halda dene belgili muǵdardaǵı ishki enregiyaǵa iye. Sonlıqtan deneniń energiyasınıń processtegi ózgerisi tek dáslepki hám aqırǵı hallarǵa ǵárezli bolǵan shama bolıp tabıladı (bul hallardaǵı energiyalardıń ayırması $E_2 - E_1$). Bul ózgeristi jıllıq muǵdarı Q ǵa hám jumıs A ǵa bóliw bir mánisli emes, al dáslepki haldan aqırǵı halǵa ótkendegi jolǵa baylanıslı. Dara jaǵdayda aylanbalı processtegi energiyanıń tolıq ózgerisi nolge teń, al dene tárepinen jutılǵan energiya Q menen dene tárepinen islengen jumıs A nolge teń emes hám olar bir biri menen $Q = A$ teńligi menen baylanısqan.

Jıllıqtı ólshewlerde ólshem birlik sıpatında jaqın waqıtlaǵa shekem ayırıqsha birlik bolǵan *kaloriya (kal)* qollanıwı keldi. Bul birlikti 1 g suwdı 1° qa kızıdıw ushın zárúr bolǵan jıllılıq muǵdarı sıpatında anıqlaw jetkilikli dárejede dál emes. Sebebi suwdıń jıllılıq sıyımlıǵınıń ózi temperaturaǵa ǵárezli. Usıǵan baylanıslı shaması boyınsha bir birinen parıq

qılatuǵın koloriyanıń hár qıylı anıqlamaları bar edi. Kaloriya menen djouldıń shama menen alınǵan qatnası tómendegidey:

$$1 \text{ kal} = 4,18 \text{ dj}.$$

Eger dQ jıllılıǵın jutqanda deneniń temperaturası dT ǵa kóteriletuǵın bolsa, onda

$$C = \frac{dQ}{dT}$$

deneniń *jıllılıq sıyımlıǵı* dep ataladı. Biraq bunday anıqlama jetkilikli emes. Sebebi deneni qızdırıw ushın jumsalatuǵın jıllılıq tek temperaturaǵa ǵárezli emes, al jıllılıq beriletuǵın basqa sharayatlardıǵa da baylanıslı. Deneniń temperatursınan basqa qanday shamalardıń ózgeretuǵınlıǵın esapqa alıp ótiw kerek. Usınday bir mánisiliktiń joqlıǵınan jıllılıq sıyımlılıǵınıń hár qıylı anıqlamalarınıń bolıwı múmkin.

Fizikada *turaqlı kólemdegi jıllılıq sıyımlılıǵı* S_V hám *turaqlı basımdaǵı jıllılıq sıyımlılıǵı* S_r túsiniqlerin kóbirek qollanǵan durıs boladı. Bunday jaǵdaylarda jıllılıqtıń denegе qanday sharayatlarda berilgenligi (turaqlı basımda yamasa turaqlı kólemde) anıq kórsetiledi.

Eger kólem turaqlı bolıp qalsa, onda $dV=0$, $dQ=dE$, yaǵnıy jıllılıqtıń barlıǵı da deneniń ishki energiyasın ósiriw ushın jumsaladı. Sonıń ushın bilayınsha jazamız:

$$C_V = \left(\frac{dE}{dT} \right)_V.$$

Tuwındıdaǵı V indeksi differenciallawdıń kólemniń turaqlı mánisi V da júrgiziletuǵınlıǵın bildiredi. SHarayattıń usınday etip kórsetiliwi zárúrli, sebebi deneniń energiyası tek ǵana temperaturadan ǵárezli bolmay, deneniń halın xarakterlewshi basqa parametrlerge de baylanıslı. Al differenciallawdıń nátiyjesi sol shamalardıń qaysısınıń turaqlı bolıp qalatuǵınlıǵına baylanıslı.

Eger qızdırıwda deneniń basımı turaqlı bolıp qalatuǵın bolsa, onda berilgen jıllılıq deneniń ishki energiyasın arttırıp ǵana qoymay, jumıs islewge de jumsaladı. Bul jaǵdayda basım $p=\text{const}$ bolǵanlıqtan jıllılıq muǵdarın bilayınsha jazamız:

$$dQ=dE+rdV=d(E+rV).$$

Biz jıllılıq muǵdarınıń

$$W = E + rV$$

shamasınıń ózgerisine teń ekenligin kóremiz. Bul shama *jıllılıq funkciyası* (bunnan basqa *jıllılıq saqlaw* yamasa *entalpiya* atları da qollanıladı) dep ataladı. Energiya menen bir qatar bul shama da deneniń halınıń anıq funkciyası bolıp tabıladı. Solay etip turaqlı basımdaǵı jıllılıq sıyımlılıǵı

$$C_p = \left(\frac{dW}{dT} \right)_p$$

tuwındısı túrinde esaplanadı.

S_r jıllılıq sıyımlılıǵı barlıq wakıtta da S_V jıllılıq sıyımlılıǵınan úlken:

$$S_r > S_V.$$

Usı teńsizliktiń orın alıwı turaqlı basımlarda dene keńeygende jumıs isleytuǵınlıǵına baylanıslı dep esaplaǵan durıs emes. Bul teńsizlik qızdırǵanda keńeyetuǵın deneler ushın da, qısılatuǵın deneler (bunday deneler kóp emes) ushın da durıs. Hakiyqatında bul teńsizlik mazmunı tómendegidey bolǵan jıllılıq haqqındaǵı tálimattıń áhmiyetli nátiyjeleriniń biri bolıp tabıladı:

Deneni jıllılıq teń salmaqlıǵı halınan shıǵarıwǵa baǵdarlanǵan sırtqı tásirler denede usı sırtqı tásirlerdiń nátiyjelerin ázziletiwge baǵdarlanǵan processlerdi júzege keltiredi. Deneni

kızdırıw jıllılıqtı jıtıwǵa baylanıslı processlerdiń payda bolıwına, al salqınlatıw bolsa, kerisinshe, jıllılıqtıń bólinip shıǵıwına baylanıslı bolǵan processlerdiń júzege keliwine alıp keledi. Bul awhal *Le SHatale principi* dep ataladı.

Endi sırtqı ortalıq penen teń salmaqlıqta turǵan denege onıń kólemi turaqlı bolıp qalatuǵınday jaǵdayda bazı bir jıllılıq berilsin dep kóz aldımızǵa keltireyik. Bunday jaǵdayda temperatura bazı bir $(\Delta T)_v$ shamasına kóteriledi. Usınıń nátiyjesinde deneniń basımı da ózgeredi ham teń salmaqlıq buzıladı (teń salmaqlıq halda deneniń basımı qorshaǵan ortalıqtıń basımına teń bolıwı kerek). Le SHatale principi boyınsha dáslepki basımınıń qayta tikleniwine alıp keletuǵın teń salmaqlıqtıń tikleniwi bazı bir salqınlaw menen júriwi kerek. Basqa sóz benen aytqanda turaqlı basımdaǵı deneniń temperaturasınıń ózgerisi $(\Delta T)_r$ turaqlı kólemdegi temperaturanıń ózgerisi $(\Delta T)_v$ den kishi boladı (eki jaǵdayda da denege birdey jıllılıq berilgende). Bul óz gezeginde temperaturanı birdey shamaǵa kóteriw ushın turaqlı basımda turaqlı kólemdegige qaraǵanda kóbirek jıllılıqtıń kerek bolatuǵınlıǵın bildiredi.

Bir shama ózgergende ekinshi shamanıń qaysı baǵdarda ózgeretuǵınlıǵın anıqlaw maqsetinde biz bir neshe ret Le SHatale principine kaytıp kelemiz.

§ 57. Gazlerdiń jıllılıq sıyımlıǵı

Ideal gazdiń molekulları bir biri menen tásirlespeydi dep esaplanadı, sonlıqtan gaz keńeygendegi olar arasındaǵı ortasha qashıqlıqtıń úlkeyiwi onıń ishki energiyasına tásir jasamaydı. Basqa sóz benen aytqanda ideal gazdiń ishki energiyası tek temperaturanıń funkciyası bolıp tabıladı (al basım menen kólemniń fuknciyası emes). Sonlıqtan gazdiń jıllılıq sıyımlıǵı $S_v = dE/dT$ da temperaturadan ǵárezli boladı.

Tap sonday jaǵday $S_r = dW/dT$ jıllılıq sıyımlıǵı ushın da orın aladı. Sonıń menen birge sol eki jıllılıq sıyımlıǵı arasında júdá ápiwayı baylanıs bar.

Gaz molekullarınıń bir gramm-molekulasın qaraymız; sáykes jıllılıq sıyımlıǵı *mollik jıllılıq sıyımlıǵı* dep ataladı (onı kishi s háripı járdeminde belgileybiz). Hal teńlemesi $rV = RT$ boyınsha bir mol gazdiń jıllılıq funkciyası onıń ishki energiyası menen bılayınsha baylanısqa:

$$W = E + rV = E + RT.$$

Bul teńlikti temperatura boyınsha differenciallap, alamız:

$$s_r = s_v + R.$$

Demek gazdiń mollik jıllılıq sıyımlıqlarınıń ayırması $s_r - s_v$ gaz turaqlısı teń eken:

$$R = 8,3 \text{ dj}/(\text{grad} \cdot \text{mol}) = 2 \text{ kal}/(\text{grad} \cdot \text{mol}).$$

Bir atomlı gazdiń jıllılıq sıyımlıǵın ańsat esaplawǵa boladı (inert gazler sonday). Bul jaǵdayda gazdiń ishki energiyası bóleksheleriniń ilgerilemeli qozǵalıslarınıń ápiwayı qosındısınan turadı. Temperaturanıń anıqlaması boyınsha bir bóleksheniń ortasha kinetikalı energiyası $(3/2)kT$ ǵa teń bolǵanlıqtan bir mol gazdiń ishki energiyası

$$E = \frac{3}{2} N_0 kT = \frac{3}{2} RT.$$

Sonlıqtan jıllılıq sıyımlıǵı

$$c_v = \frac{3}{2} R = 12,15 \frac{\text{dj}}{\text{grad} \cdot \text{mol}}, \quad s_p = \frac{5}{2} R = 20,8 \frac{\text{dj}}{\text{grad} \cdot \text{mol}}.$$

Bul shamalardıń temperaturaǵa ǵárezli emes ekenligin atap ótemiz.

Biz tómende kóp processlerde gazdıń áhmiyetli xarakteristikası bolıp γ arqalı belgilenetuǵın jıllılıq sıyımlıqları s_r menen s_v nıń qatnasları bolıp tabılatuǵınlǵın kóremiz:

$$\gamma = \frac{s_p}{c_v}.$$

Bir atomlı gazler ushın

$$\gamma = 5/3 = 1,67.$$

Kóp atomlı gazlerdıń jıllılıq sıyımlıqlarınıń kelip shıǵıwı quramalıraq bolıp tabıladı. Olardıń ishki energiyaları molekulalardıń ilgerilemeli hám aylanbalı qozǵalıslarınıń energiyalarından hám molekula ishindegi atomlarınıń terbelis energiyalarından turadı. Solay etip qozǵalıslardıń sol úsh túri de jıllılıq sıyımlıǵına belgili bir úles qosadı.

Usıǵan baylanıslı 50-paragrafqa kaytıp kelemiz. Molekula óziniń ilgerilemeli qozǵalıсында úsh erkinlik dárejesine iye bolǵanlıqtan, sol erkinlik dárejesiniń hár birine $kT/2$ energiya sáykes keledi. Klassikalıq mexanikaǵa sáykes bunday nátiye ilgerilemeli qozǵalı ushın da, terbelmeli qozǵalı ushın da, aylanbalı qozǵalı ushın da alınıwı kerek. Sonıń menen birge terbelmeli qozǵalısta potencial energiyanıń ortasha mánisi kinetikalıq energiyanıń ortasha mánisine teń ekenligin de bilemiz. Sonlıqtan klassikalıq mexanikaǵa sáykes molekula ishindegi atomnıń jıllılıq potencial energiyası da $kT/2$ ge teń bolıwı kerek. Nátiyjede hár bir gaz tolıǵı menen molekulasınıń erkinlik dárejesi boyınsha alınatuǵın temperaturadan ǵárezsiz bolǵan (molekuladaǵı atomlar sanı menen anıqlanatuǵın) turaqlı jıllılıq sıyımlıǵınıń da bolıwı kerekligi alınadı.

Haqıyqatında molekulalardıǵı atomlardıń terbelmeli qozǵalısnıń jıllılıq sıyımlıǵına úlesi tek jetkilikli dárejedegi joqarı temperaturalarda baqlanadı. Sebebi bunday qozǵalıslar ózleriniń "nollik terbelisler" xarakterin tek tómengi temperaturalarda emes, al salıstırmalı joqarı temperaturalarda da saqlaydı. Bul nollik terbelisler energiyasınıń salıstırmalı úlken mánisine baylanıslı. "Nollik" energiya bolsa óziniń mánisi boyınsha temperaturadan ǵárezli emes hám sonlıqtan jıllılıq sıyımlıǵına úlesi joq. Eki atomlı gazlerdıń molekulalarında (azot, kislorod, vodorod h.b.) atomlardıń molekulalar ishindegi terbelisleri shama menen bir neshe mırnı graduslarda júzege keledi. Tómenirek temperaturalarda olardıń jıllılıq sıyımlıǵına qosatuǵın úlesi tez kemeyedi hám ójire temperaturalarında ámeliy jaqtan pútkilley joǵaladı.

Molekulalardıń aylanısınıń nollik energiyası júdá az. Sonlıqtan bunday qozǵalısqı klassikalıq mexanikanı erterek qollanıw kerek boladı (eki atomlı molekulalar ushın Kelvin boyınsha bir neshe graduslarda, al eń jeńil molekula bolǵan vodorodta bolsa 80 K temperatura zárúr).

Ójire temperaturalarında eki atomlı gazlerdıń jıllılıq sıyımlıǵı molekulalardıń ilgerilemeli hám aylanbalı qozǵalısları menen baylanıslı hám óziniń klassikalıq mexanikaǵa tiykarlanǵan teoriyalıq mánisine júdá jaqın:

$$c_v = \frac{5}{2}R = 20,8 \frac{\text{dj}}{\text{grad} \cdot \text{mol}}, \quad c_r = \frac{7}{2}R = 29,1 \frac{\text{dj}}{\text{grad} \cdot \text{mol}}.$$

Jıllılıq sıyımlıqlarınıń katnasları $\gamma = 7/5 = 1,4$.

"Kvant oblastında" jıllılıqqa baylanıslı bolǵan aylanbalı hám terbelmeli qozǵalıslardıń ortasha energiyaları (sonıń menen birge gazdıń jıllılıq sıyımlıǵı da) tek ǵana temperaturaǵa emes, al molekulanıń "individuallıq" qásiyetleri bolǵan olardıń inerciya momenti menen terbelisler jiyiligine de baylanıslı boladı (atap aytqanda usı sebepke baylanıslı ilgerilemeli qozǵalı energiyasınday bolıp temperaturanı tikkeley anıqlaw ushın jaramlı emes).

Bunnan da quramalı xarakterge kóp atomlı gazlerdiń jıllılıq sıyımlıǵı iye boladı. Kóp atomlı molekulada atomlar hár qıylı "nollik" energiyaǵa iye kóp sanlı terbelislerdiń tiplerine iye bolıwı múmkin. Temperatura joqarılaǵan sayın bul terbelisler bir birinen keyin jıllılıq qozǵalıǵına "qosıladı" hám usıǵan sáykes gazdiń jıllılıq sıyımlıǵı artadı. Biraq barlıq terbelislerdiń tolıq iske qosılıwına shekem jetiw múmkinshiligi bolmaydı. Sebebi joqarı temperaturalarda molekulalar bóleklerge ıdırap ketedi.

Joqarıda ayılǵanlardıń barlıǵı da ideal gaz dep esaplaw múmkin bolǵan gazler ushın orınlı. Kúshli kısıwlarda gazdiń qásiyetleri ideal gazlerdiń qásiyetlerinen úlken ayırmaǵa iye boladı hám molekulalardıń bir biri menen tásirlesiwiniń aqıbetinde onıń jıllılıq sıyımlıǵına qosatuǵın úlesi artadı.

§ 58. Kondensaciyalanǵan deneler

Barlıq gazler ushın ulıwmalıq bolǵan hal teńlemesin dúziwge múmkinshilik beretuǵın ideal gazdiń jıllılıq qásiyetleriniń ápiwayılıǵı usı gazdegi molekulalardıń bir biri menen tásirlesiwiniń roliniń azlıǵına baylanıslı. Kondensaciyalanǵan denelerde bolsa molekulalardıń bir biri menen tásirlesiwı áhmiyetli orın iyeleydi. Usıǵan baylanıslı bunday denelerdiń jıllılıq qásiyetleri tiykarınan individuallıq (tek ózine tán) xarakterge iye hám olar ushın ulıwmalıq hal teńlemesin dúziwdiń múmkinshiligi bolmaydı.

Kondensaciyalanǵan deneler kishi qısılıwshılıqqa iye (gazlerde pútkilley basqasha ekenligin eske túsiremez). Olardıń qısılıwshılıǵın táriyiplew ushın ádette turaqlı temperaturada kólemnen basım boyınsha tuwındı túrinde anıqlanıwshı *qısılıwshılıq koefficientinen* paydalanadı:

$$\kappa = -\frac{1}{V} \left(\frac{dV}{dp} \right)_T.$$

Bul formuladan qısılıwshılıq koefficientiniń izotermalıq qısılıwdı táriyipleytuǵınlıǵın kóremiz (basım úlkeygende kólem kishireyetuǵın bolǵanlıqtan bul tuwındınıń mánisi teris, sonıń ushın minus belgisi onı shamanı alıw ushın qoyılǵan). Formuladan κ nıń basımniń ólshem birligine keri ólshem birligine iye bolatuǵınlıǵı kórinip tur.

Mısal ushın bazı bir suyıqlıqlardıń qısılıwshılıq koefficientleriniń mánislerin keltiremez (1 bar basım ushın):

Sınap	$0,4 \cdot 10^{-5}$	bar^{-1}
Suw	$4,9 \cdot 10^{-5}$	bar^{-1}
Spirt	$7,6 \cdot 10^{-5}$	bar^{-1}
Efir	$14,5 \cdot 10^{-5}$	bar^{-1}

Qattı denelerdiń kópshiliginiń qısılıwshılıq koefficientiniń mánisi joqarıda keltirilgen shamalardan da kishirek:

Almaz	$0,16 \cdot 10^{-6}$	bar^{-1}
Temir	$0,61 \cdot 10^{-6}$	bar^{-1}
Mıs	$0,76 \cdot 10^{-6}$	bar^{-1}
Alyuminiy	$1,4 \cdot 10^{-6}$	bar^{-1}
SHıyshe	$2,7 \cdot 10^{-6}$	bar^{-1}
Ceziy	$62 \cdot 10^{-6}$	bar^{-1}

Salıstırıw ushın gazdıń kısılıwshılıǵın tabamız. Izotremalıq kısıwda gazdıń kólemi $V=RT/p$ basımǵa kerip proporcional kishireydi. Bul ańlatpanı joqarıda keltirilgen κ ushın ańlatpaǵa qoyıp hám differencallawdı orınlap tómendegini alamız:

$$\kappa = 1/r.$$

q bar basımda gazdıń kısılıwshılıǵı $\kappa = 1 \text{ bar}^{-1}$.

Kondesaciyalanǵan denelerdiń jıllılıq qásiyetlerin táriyiplew ushın qollanılatuǵın basqa shama *jıllılıq keńeyiwi koefficienti* bolıp tabıladı. Ol bılayınsha anıqlanadı:

$$\alpha = \frac{1}{V} \left(\frac{dV}{dT} \right)_p.$$

Tuwındıdaǵı r belgisi deneni qızdıruwdıń turaqlı basımda ámelge asırılatuǵınlıǵın bildiredi.

Denelerdiń kópshiligi qızdırganda keńeyedi (α koefficientiniń mánisi oń). Bul tábiyiy: jıllılıq qozǵalısları kúsheydi hám molekulalardı bir birinen iyteredi. Biraq bul qaǵıyda barlıq waqıtları orınlanbaydı. Mısalı 0 den 4⁰S ǵa shekemgi intervalda qızdırganda suwdıń kólemi kishireydi. Tap sol sıyaqlı 2,19 K nen tómengi temperaturalarda geliydi qızdırganda qısıladı (bul 74-paragrafta gáp etiletuǵın geliy II bolıp tabıladı).

Mısal retinde bazı bir suyıqlıqlardıń jıllılıq keńeyiwi koefficientin keltiremez (ójire temperaturalarındaǵı):

Sınap	$1,8 \cdot 10^{-4}$	grad^{-1}
Suw	$2,1 \cdot 10^{-4}$	grad^{-1}
Spirt	$10,8 \cdot 10^{-4}$	grad^{-1}
Efir	$16,3 \cdot 10^{-4}$	grad^{-1}

[Salıstırıw ushın gazlerdiń jıllılıq keńeyiwi koefficientin keltiremez: $V=RT/p$ nı α nıń anıqlamasına qoyıp $\alpha=1/T$ ekenligine iye bolamız; $T=273 \text{ K}$ de $\alpha=3,4 \cdot 10^{-3}$ ekenligin kóremiz].

Qattı denelerdiń jıllılıq qeńeyiwi koefficienti joqarıdaǵılardan da kishi:

Temir	$3,5 \cdot 10^{-5}$	grad^{-1}
Mıs	$5,0 \cdot 10^{-5}$	Grad^{-1}
SHiyshe	$2,4-3,0 \cdot 10^{-5}$	Grad^{-1}

Júdá kishi jıllılıq keńeyiwi koefficientine invar (temir 64%, nikel 36% bolǵan quyma) iye ($\alpha=1,2 \cdot 10^{-6}$). Bul materiallar temperatura ózgergende ólshemleriniń ózgeriwi maqsetke muwapıq kelmeytuǵın ásbaplardıń bóleklerin soǵıw ushın qollanıladı.

45-paragrafta kristallardıń (kublıq emes kristallardıń) jıllılıq keńeyiwiniń hár qıylı baǵıtlarda hár qıylı bolatuǵınlıǵı ayılǵan edi. Bul ayırmanıń shaması ádewir úlken bolıwı múmkin. Mısalı cink kristallıdıń jıllılıq keńeyiwinde geksagonallıq kósher baǵıtında sıızqlı ólshemler oǵan perpendikulyar baǵıttaǵı sıızqlı ólshemlerge salıstırganda 4,5 ese tezirek úlkeyedi.

Kondansaciyalanǵan denelerdiń jıllılıq sıyımlıǵı gazlerdiń jıllılıq sıyımlıǵı sıyaqlı temperaturanıń ósiwi menen ósedi.

Qattı denelerdiń jıllılıq sıyımlıǵı atomlarınń teń salmaqlıq orınları átirapındaǵı kishi terbelis energiyaları menen baylanıslı. Temperatura joqarılaǵanda bul jıllılıq sıyımlıǵı belgili bir anıq shekke umtıladı. Bul jaǵday atomlardıń terbelislerin klassikalıq mexanika járdeminde qarawǵa bolatuǵın jaǵdayǵa sáykes keledi. Atomlardıń barlıq qozǵalısları

terbelmeli xarakterge iye bolǵanlıqtan, onda atomnıń hár bir erkinlik dárejesine ortasha kT energiyası sáykes keledi: ortasha kinetikalıq energiya menen ortasha potencial energiyannıń hár biri $kT/2$ ge teń (bul haqqında aldınǵı paragrafta daǵazalandı). Qattı denenniń bir atomına sáykes keliwshi ortasha energiya $3kT$ ǵa teń bolıwı kerek.

Biraq bul shek qanday da bir quramalı birikpeler ushın hesh qashan da orınlanbaydı. Sebebi bunday temperaturalarǵa jetemen degenshe olar erip yamasa ıdırap ketedi. Ádettegidey temperaturalarda kóplegen elementler ushın jıllılıq sıyımlıǵınıń sheklik mánisi ornaydı. Sonlıqtan qattı elementtiń bir gramm-atomınıń jıllılıq sıyımlıǵı shama menen mınaǵan teń:

$$c = 3R = 25 \frac{\text{dj}}{\text{grad} \cdot \text{mol}} = 6 \frac{\text{kal}}{\text{grad} \cdot \text{mol}}$$

(Bul tastıyıqlawdı Dyulong hám Pti nızamı dep ataydı).

Qattı denenniń jıllılıq sıyımlıǵı tuwralı gáp etilgende biz basım yamasa kólem turaqlı bolǵandaǵı jıllılıq sıyımlıǵı ekenligin sanalı túrde aytpaymız. Ádette jıllılıq sıyımlıǵı turaqlı basımda ólshenedi, biraq qattı denelerde s_r menen s_v lar arasındǵı ayırma júdá az (mısalı temir ushın $\gamma = s_r/s_v = 1,02$). Bul jaǵday qattı denelerdiń jıllılıq keńeyiwı koefficientiniń kishi ekenligine baylanıslı.

Jıllılıq sıyımlıqları ayırması $S_r - S_v$ nı jıllılıq keńeyiwı α hám qısılıwshılıq κ penen baylanıstıratuǵın ulıwmalıq katnas bar:

$$C_p - C_v = \frac{T\alpha^2}{\rho\kappa}$$

(bul jerde ρ zattıń tıǵızlıǵı, S_r menen S_v salıstırmalı jıllılıq sıyımlıqları, yaǵnıy 1 g zattıń jıllılıq sıyımlıǵı). Bul jerde biz $S_r - S_v$ ayırmasınıń α koefficientiniń kvadratına proporcional ekenligin kóremiz.

Temperatura tómengende qattı denenniń jıllılıq sıyımlıǵı kishireyedi hám absolyut nolde nolge umtıladı. Bul oǵada áhmiyetli bolǵan tastıyıqlawdıń nátiyjesi bolıp tabıladı (onı *Nernst teoreması* dep atadı): jetkilikli dárejedegi tómengi temperaturalarda kondensaciyalanǵan deneni táriyipleytuǵın barlıq shamalardıń temperaturaǵa ǵárezziligi joǵaladı.

Dara jaǵdayda absolyut nolge jaqınlaǵanda denenniń energiyası menen jıllılıq funkciyasınıń temperaturadan ǵárezligi joǵaladı. Sonlıqtan usı fukciyalardan temperatura boyınsha alınǵan tuwındılar bolǵan jıllılıq sıyımlıqları S_r menen S_v lar da nolge umtıladı.

Nernst teoreması boyınsha $T \rightarrow 0$ de jıllılıq keńeyiwı de nolge umtıladı. Sebebi denenniń kóleminiń temperaturadan ǵárezligi toqtaydı.

VIII BAP. JYLLYLıQ PROCESSLERI

§ 59. Adiabatalıq process

Endi bazı bir ápiwpayı jıllılıq processlerin úyreniw menen shuǵıllanamız.

Gazdıń boslıqqa keńeyiwı eń ápiwayı process bolıp tabıladı: gaz dáslep ótkermeytuǵın diywal menen beklengen ıdıstıń bóliminde turǵan bolsın, al sol diywaldı alıp taslagannan keyin gaz ıdıstıń barlıq bólimlerin toltıradı. Bunday keńeyiwde gaz hesh qanday jumıs islemeytuǵın bolǵanlıqtan onıń energiyası turaqlı bolıp qaladı: gazdıń keńeygenge shekemgi energiyası E_1 keńeygennen keyingi energiyası E_2 ge teń

$$E_1=E_2.$$

İdeal gazdın energiyasınıń tek temperaturaǵa ǵárezli ekenligin biz bilemiz. Sonlıqtan energiyanın turaqlılıǵınan ideal gaz boslıqqa keneygende temperaturasınıń da turaqlı bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Al hakiykiy gazlerdın energiyası boslıqqa keneygende ózgeredi.

Adiabatalıq process dep atalıwshı process gazdın boslıqqa keneygenneninen pútkilley basqasha boladı. Processlerdın bul túri áhmiyetli orın iyeleydi. Sonlıqtan adiabatalıq processti tolıǵıraq qarap shıǵamız.

Adiabatalıq process ushın gazdın serpimliligine teń sırtqı basımda turatuǵınlıǵı xarakterli. Processtın adiabatalıq bolıwı ushın processtın barısında gaz sırtqı ortalıqtan jıllılıq izolyaciyasında bolıwı kerek, sonlıqtan bunday processte gaz sırttan energiya almaydı hám sırtqa energiya bermeydi.

Porshenge iye cilindr tárizli ıdıstı turǵan gazdın adiabatalıq keńeyiwın (yamasa qısılıwın) kóz aldımızǵa keltiriw eń ańsat bolıp tabıladı. Porshen jetkilikli dárejede aqırınlıq penen qozǵalganda gaz porshenniń izinen wakıttıń hár bir momentindegi kólemge sáykes basımǵa iye bolıp keńeyedi. Usı jerdegi "jetkilikli dárejede aqırınlıq penen" dep ayılǵanda porshenniń hár bir bir zamatlıq awhalına sáykes jıllılıq teń salmaqlıǵınıń ornap úlgeriwi ańǵartıladı. Al porshen úlken tezlik penen qozǵalsa gaz onıń izinen keńeyip úlgermegen hám cilindr ishinde kishi basımǵa iye bolǵan oblast (porshen gazdı kısıqanda kerisinshe awhal – úlken basımǵa iye oblast) payda bolǵan bolar edi. Bunday process adiabatalıq process bolmaǵan bolar edi.

Ámeliy kóz-qaras boyınsha berilgen jaǵdaylarda akırınlıq shárti ańsat orınlanadı. Tallawlar bunday shárttiń porshen gazdegi sestıń tezligi menen salıstırǵanday tezlikler penen qozǵalganda ǵana buzılatuǵınlıǵın kórsetedi. Sonlıqtan adiabatalıq processti ámelge asırǵanda birinshi planǵa "jetkilikli dárejede tez ornaytuǵın" jıllılıq izolyaciyası shıǵadı hám. Bunday process dawamında gaz sırtqı ortalıq penen jıllılıq almasıp úlgermegen bolıwı kerek. Bul "jetkilikli dárejede tez ornaytuǵın" shárti joqarıdaǵı aqırınlıq shárti menen úylesetugınlıǵı óz-ózinen túsinikli. Bul ıdıstıń jıllılıq boyınsha izolyaciyalanıwınıń puqtalıǵına baylanıslı hám sonlıqtan ekinshi dárejeli áhmiyetke iye. Usı sebepke baylanıslı fizikada adiabatalıq process "jetkilikli dárejede aqırınlıq" penen júretuǵın process sıpatında táriyiplenedi ham bul principiallıq xarakterge iye. Bul shárttiń tutatuǵın orna biz 62-paragrafta qayta kelemiz.

Adiabatalıq processte gazdın óziniń ishki energiyası turaqlı bolıp qaladı dep tastıyıqlawǵa bolmaydı. Sebebi bul jaǵdayda gaz jumıs isleydi (yamasa gaz qısılganda onıń ústinen jumıs islenedi). Jıllılıq izolyaciyasına sáykes jıllılıq muǵdarı dQ dı nolge teń dep esaplasaq $dQ=dE+rdV$ qatnasınan adiabatalıq processtın ulıwmalıq teńlemesin alamız. Solay etip adiabatalıq processtegi deneniń halınıń sheksiz kishi ózgerisi

$$dE+rdV=0$$

teńlemesi menen táriyiplenedi.

Bul teńlemeni ideal gazdın adiabatalıq keneyiwine (yamasa qısılıyına) qollanamız hám ápiwayılıq ushın barlıq shamalardı gazdın bir moli ushın alamız.

İdeal gazdın energiyası tek temperaturanıń funkciyası bolıp tabıladı, al dE/dT gazdın jıllılıq sıyımlıǵı s_v bolıp tabıladı. Sonlıqtan adiabatalıq processtın teńlemesindegi dE ni $s_v dT$ menen almasıtırıw múmkin:

$$s_v dT+rdV=0.$$

Bul ańlatpaǵa $r=RT/V$ nı qoyıp hám teńlikti T ǵa bólip mına ańlatpanı alamız:

$$c_V \frac{dT}{T} + R \frac{dV}{V} = 0.$$

Temperaturalardıń bizdi qızıqtıratuǵın intervalında jıllılıq sıyımlıǵın turaqlı bolıp qaladı dep esaplap (bunday boljawdıń bir atomlı gazler ushın barlıq waqıtlarda da durıs, al eki atomlı gazlerde temperaturanıń ádewir úlken intervalenda durıs ekenligin eske túsirip ótemiz) alıńǵan teńlemenı bılayınsha kóshirip jazamız:

$$d(c_V \ln T + R \ln V) = 0.$$

Bunnan

$$c_V \ln T + R \ln V = \text{const}$$

ekenligin, al potenciallyaǵannan keyin

$$T^{c_V} V^R = \text{const}$$

ańlatpasın alamız. Ideal gaz ushın $s_V - s_r = R$ ekenligin eslep, joqarıda jazılǵan teńlikti $1/s_V$ dárejesine kóterip aqırǵı teńlemenı alamız:

$$TV^{\gamma-1} = \text{const}.$$

Bul jerde $\gamma = s_r/s_V$.

Biz adiabatalıq processte ideal gazdıń temperaturası menen kóleminiń $TV^{\gamma-1}$ kóbeymesi turaqlı bolıp qalatuǵınday bolıp ózgeretuǵınlıǵın kóremiz. Dareje kórsetkishindegi γ barlıq waqıtta da birden úlken bolǵanlıqtan $\gamma-1 > 0$ hám soǵan sáykes adiabatalıq keńeyiwde gaz salqınlaydı, al qısılıwda gaz kızadı.

Jazılǵan teńlemenı $rV = RT$ formulası menen kombinaciyalap adiabatalıq processtegi temperatura menen basımınıń ózgerislerin baylanıstıratuǵın

$$Tp^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \text{const}$$

hám basımdı kólem menen baylanıstıratuǵın

$$pV^{\gamma} = \text{const}$$

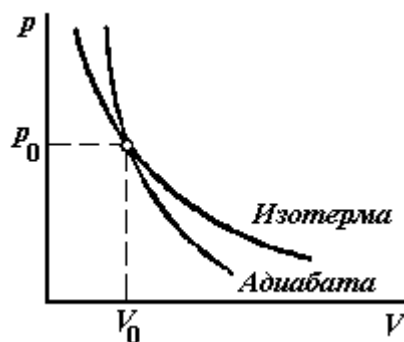
ańlatpaların alamız. Keyingi teńlemenı *Puasson adiabatasınıń* teńlemesi dep ataydı.

Gazdıń basımı izotermalıq keńeygende kólem V nıń birinshi dárejesine keri proporcional ózgeredi. Al adiabatalıq keńeygende bolsa basımınıń V^{γ} ǵa keri proporcional kishireyetuǵınlıǵın ańǵardıq (yaǵnıy tezirek kishireyedi, sebebi barlıq waqıtları $\gamma > 1$). Usı processlerdi r, V diagrammasında izoterma hám adiabata túrinde kórsetetuǵın bolsaq (gazdıń baslanǵısh halına sáykes keletuǵın bazı bir r_0 hám V_0 noqatında kesilisetuǵın), onda adiabatınıń izotermaǵa salıstırǵanda biraz tik ekenligin kóremiz.

Eger kólemniń ózgerisin basımınıń funkciyası (yaǵnıy 1-súwretti 90° qa bursaq) hám bul baylanıstı qısılıwshılıq koefficienti $\kappa = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp}$ menen táriyiplemekshi bolsaq bul qásiyetti basqasha da keltirip shıǵarıwǵa boladı (biz izotremalıq jaǵdaydı názerde tutqan 58-paragraftı qarańız). Bunday jaǵdayda gazdıń adiabatalıq qısılıwshılıǵınıń onıń izotermalıq qısılıwshılıǵınan kishi ekenligin kóremiz:

$$\kappa_{\text{adiab}} < \kappa_{\text{izot}}.$$

Gazler ushın alıńǵan bul teńlik haqıyqatında barlıq deneler ushın da durıs. Bul La SHatale principiniń nátiyjesi bolıp tabıladı.



1-сúwret

Al buǵan kerisinshe gazdegi adiabatlıq processtıń basqa qasıyeti bolǵan qısılgandaǵı gazdıń qızıwı qálegen deneniń adiabatlıq qısılıwınıń universallıq qásiyeti bolıp tabılmaıdı. Bunıń durısıǵı Le SHatale principinen de kórinip tur. Eger deneni jıllılıq bermey qısatuǵın bolsaq, onda deneniń temperaturası qısılwǵa kesent jasaytuǵınday bolıp ózgeredi. Qızdırganda keńeyetuǵın deneler ushın (bunday deneler denelerdiń basım kópshiligin quraydı) bul adiabatlıq qısılwıda temperaturanıń joqarılaytuǵınlıǵın ańlatadı (keńeygende kerisi – temperatura tómenleydi). Biraq bul tallawdan anıq kórinedi: eger qızdırganda deneniń kólemi kishireyetuǵın bolsa, onda adiabatlıq qısıw salqınlaw menen júredi.

§ 60. Djoul-Tomson processı

Gaz yamasa suyıqlıq jıllılıq almasıwsız bir basımnan ekinshi basımǵa stacionar túrde ótetuǵın processler úlken qızıǵıwshılıq payda etetuǵın processlerden bolıp esaplanadı. Bul jerde *processtıń stacionarlıǵı* barlıq ótiw barısında eki basımınıń da ózgermey qalatıǵınlıǵın ańlatadı.

Ulıwma aytqanda bunday process gazdıń (yamasa suyıqlıqtıń) tezligi nolge teń bolǵan halınan aǵıwı menen júredi. Biraq aǵıw tezligin jasalma jollar menen júdá kishireytiwge boladı (mısalı bir basımnan ekinshi basımǵa úlken súykelis payda etetuǵın ortalıq arqalı gazdıń ótiwin ámelge asırsaq; bunday ortalıq kishi tesik yamasa mayda tesikli ótkel bolıp tabıladı).

Jıllılıq izolyaciyasındaǵı gazdıń tezligin sezilerliktey ózgeretpey bir basımnan basımnan ekinshi basımǵa stacionar ótiwi *Djoul-Tomson processı* dep ataladı.

Djoul-Tomson processı sxemalıq túrde 2- *a* hám *b* súwretlerde kórsetilgen. Bul jerde gaz mayda tesiksheleri bar P ótkeli arqalı ótedi. Bul ótkeldiń eki tárepindegi basımlardıń turaqlılıǵı hám olardıń r_1 jáne r_2 shamalarına teń bolıwı 1- hám 2-porshenleri járdeminde alınadı.

Meyli gaz dáslep 1-porshen hám P ótkeli arasındaǵı V_1 kólemine iye bolǵan bolsın (2- *a* súwret). Endi r_1 hám r_2 basımların turaqlı etip salıp 1-porshendi ótkelge qaray, al 2-porshendi qarama-qarsı baǵıtta qozǵaltamız. Usınıń nátiyjesinde gaz ótkel arqalı kishi tezlikte ótip 2-porshen menen ótkel arasındaǵı V_2 kólemine hám r_2 basımına iye boladı.

Bul processte gaz sırttan energiya almaǵanlıqtan porshen tárepinen islengen jumıs gazdıń ishki energiyasınıń ózgerisine teń boladı. Process barısında basım turaqlı bolıp qalǵanlıqtan 1-porshenniń gazdı V_1 kóleminden qısıp shıǵargandaǵı jumısı $r_1 V_1$ kóbeymesine teń. Al ótkel arqalı ótken gaz 2-porshen ústinen jumıs isleydi. Sonlıqtan

porshenler tárepinen islengen ulıwmalıq jumıs $r_1V_1 - r_2V_2$ ge teń. Joqarıda ayılǵanıday, bul jumıs gazdıń ishki energiyasınıń ósimine teń:

$$r_1V_1 - r_2V_2 = E_2 - E_1.$$

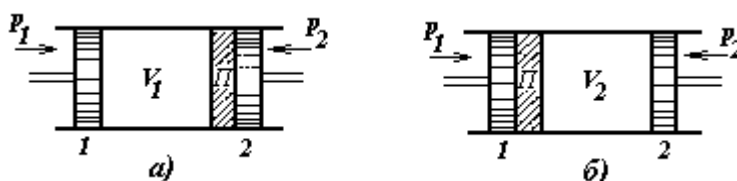
Bul jerde E_1 hám E_2 arqalı berilgen muǵdardaǵı gazdıń dáslepki hám aqırǵı hallarındaǵı ishki energiyası. Sonlıqtan

$$E_1 + r_1V_1 = E_2 + r_2V_2$$

Yamasa $W_1 = W_2$. Bul jerde $W = E + rV$ jıllılıq funkciyası bolıp tabıladı.

Solay etip Djoul-Tomson processinde gazdıń jıllılıq funkciyası saqlanadı eken.

Ideal gazde energiya sıyaqlı jıllılıq funkciyası da tek temperaturaǵa ǵárezli. Sonlıqtan Djoul-Tomson effektine ideal gaz qatnasatugın bolsa, onda onıń temperaturası ózgermey qaladı.



2-súwret

Hákiyqiy gazlerde bolsa Djoul-Tomson processinde temperatura ózgeredi. Qala berse temperaturanıń ózgerisi úlken shamalarǵa teń bolıwı múmkin. Mısalı hawa ójire temperaturalarında 200 atm basımnan 1 atm ǵa shekem kólemin keńeytse, onda ol shama menen 40° ka salqınlaydı.

Jetkilikli dárejedegi joqarı temperaturalarda barlıq gazler Djoul-Tomson processinde keńeygende qızadı, al tómenirek temperaturalarda (hám júdá úlken bolmaǵan basımlarda) salqınlaydı. Sonıń ushın Djoul-Tomson processinde temperaturalar óziniń belgisin ózertetuǵın temperatura (*inversiya noqatı*) bar. Inversiya noqatınıń shaması basımǵa baylanıslı hám hám hár qıylı gazler ushın hár qıylı. Mısalı hawa ójire temperaturalarında Djoul-Tomson processinde salqınlaydı, al usınday effektı alıw ushın 200 K ge shekem, al geliydi 40 K ge shekem aldın ala salqınlatıw kerek.

Djoul-Tomson processindegi temperaturanıń ózgeriwi texnikada gazlerdi suıltıw ushın keńnen qollanıladı. Bunday jaǵdaylarda gazdıń tezligin kishireytiw ushın jıńışke tesik qollanıladı (onı drossellik ventil dep ataydı), al sol processtiń barlıǵın *drossellew* processı dep ataydı.

§ 61. Stacionar aǵıs

Djoul-Tomson processinde gaz stacionar túrde bir basımnan ekinshi basımǵa ótedi, al usı ótiwde gazdıń tezligi jasalma túrde súykelistiń járdeminde joq etiledi. Biraq bul processti talqılawda alıńǵan nátiyjelerdi jıllılıq boyınsha izolyaciyalanǵan nolden ózgeshe tezlik penen qozǵalıwshı qálegen gaz (yamasa suıqlıq) aǵısı ushın ulıwmalastırıwǵa boladı.

Ayırma sonnan ibarat, endi aǵıwshı gazdıń kinetikalıq energiyasın esapqal almay ketiwge bolmaydı. Gaz ústinen islengen jumıs gazdıń energiyasın úlkeytiwge jumsaladı, al bul energiyaǵa endi tek ishki energiya emes, al ǵazdıń tutası menen qozǵalıwına sáykes keliwshı kinetikalıq energiya da kiredi.

Basqa sóz benen aytqanda gaz yamasa suıqlıqtıń stacionar aǵısı ushın

$$\frac{Mv^2}{2} + E + pV = \text{const}$$

yamasa

$$\frac{Mv^2}{2} + W = \text{const}$$

teńligi orınlanadı. Bul jerde W menen M zattıń baǵı bir muǵdarınıń jıllılıq energiyası hám massası. Jazılǵan teńleme $Mv^2/2 + W$ shamasınıń zattıń berilgen muǵdarı ushın aǵıstaǵı qay orında jaylasqanlıǵınan ǵárezsiz birdey ekenligin ańǵartadı.

Salmaq maydanındaǵı potencial energiyası da esapqa alıw zárúr bolǵan jaǵdaylarda (suyıqlıq aqqanda, gaz ushın salmaq áhmiyetli orın iyelemeydi) sáykes túrde bilayınsha jazamız:

$$\frac{Mv^2}{2} + Mgz + E + pV = \text{const}.$$

Bul jerde z arqalı aǵıstıń berilgen ornınıń biyikligi belgilengen.

Endi aǵıs sezilerliktey súykelissiz qozǵaladı dep esaplayıq (aǵıwshı zat ishinde yamasa sırtqı tosıqınlıqlardıń tásirindegi súykelis, bul jaǵday súykelis áhmiyetli orın iyeleytuǵın Djoul-Tomson processiniń kerisi bolıp tabıladı). Bunday sharayatlarda tolıǵı menen aǵıstıń ózi emes (dáslep usınday dep kelisilgen edi), al zattıń ayırım uıatskalarınıń qozǵalıstı da jıllılıq boyınsha izolyaciyalanǵan dep esaplanadı (sezilerliktey súykelis orın alǵanda aǵıstıń ishinde de jıllılıq bólinip shıqqan bolar edi). Basqa sóz benen aytqanda qozǵalıstı processinde zattıń hár bir uıastkası adiabatlıq keńeyedi (yamasa qısıladı).

Tap usınday sharayatlardaǵı ishindegi basım p bolǵan (sırtqı basım p_0) ıdistan gazdıń shıǵıwın qaraymız. Eger gaz jetkilikli kishi tesikshe arkalı shıǵatuǵın bolsa, onda ıdıs ishindegi gazdıń tezligin nolge teń dep esaplawımızǵa boladı. SHıǵıwshı aǵıstıń tezligi v nı mına teńlik járdeminde anıqlaymız:

$$W_0 + \frac{v^2}{2} = W.$$

Bul jerde biz massanı 1 g ǵa teń dep aldıq, sonlıqtan W menen W_0 gazdıń 1 grammınıń ıdıs ishindegi hám sırtka shıǵıp atırǵan aǵıstaǵı jıllılıq funkciyaları. Gazdı ideal, al onıń jıllılıq sıyımlıǵın temperaturadan ǵárezsiz dep esaplasaq, onda $S_r = dW/dT$ formulasınan yamasa $dW = S_r dT$ dan $W - W_0 = S_r(T - T_0)$ ekenligi kelip shıǵadı, onda

$$v^2 = 2 S_r(T - T_0).$$

59-paragraftaǵı $T p^{-(\gamma-1)/\gamma}$ shamasınıń gazdıń adiabatlıq keneyiwinde turaqlı bolıp qalatıqlılıǵın kórsetetuǵın teńleme járdeminde ıdistan shıǵıp atırǵan zattıń temperaturası T_0 di ıdıs ishindegi temperatura T menen arasındaǵı baylanıstı anıqlaymız:

$$T_0 = T \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}.$$

Solay etip gazdıń shıǵıw tezligin anıqlawshı mınaday aqırǵı formulanı alamız:

$$v^2 = 2C_p T \left[1 - \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right].$$

Suyıqlıqlardıń aǵısı olardıń kishi kısılıwshılıǵınıń saldarınan kóleminiń sezilerliktey ózgeriwi menen júzege kelmeydi. Basqa sóz benen aytqanda aǵıp turǵan suyıqlıqtı qısılmaytuǵın, ózgermeytuǵın tıǵızlıqqa iye suyıqlıq dep qaraw múmkin.

Bunday suyıqlıqtıń (súykelissiz) stacionar aǵısınıń teńlemesi júdá ápiwayı. Bul jaǵdayda adiabatlıq processtıń ulıwmalıq teńlemesi ($dE + rdV = 0$) suyıqlıq qısılmaydı dep

esaplanganlıqtan $dV=0$ bolğanlıqtan $dE=0$ teńlemesine alıp kelinedi. Basqa sóz benen aytqanda E energiyası turaqlı bolıp qaladı, sonlıqtan onı

$$\frac{Mv^2}{2} + Mgz + E + pV = \text{const.}$$

teńliginiń shep tárepinen alıp taslawğa boladı. Bul teńlemenı massa M ge bólemiz hám M/V nıń tıǵızlıq ρ ekenligin ańlaymız. Bunday jaǵdayda súykelissiz qozǵalatuǵın qısılmaytuǵın jıllılıqtan izolyaciyalangan aǵıs boyınsha mına shama turaqlı bolıp kaladı:

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gz = \text{const.}$$

Bul *Bernulli teńlemesi* dep atalıwshı teńleme bolıp tabıladı.

Mısal retinde ózgeriwshı kese-kesimge iye nay arkalı suyıqlıqtıń aǵısın qaraymız. Ápiwayılıq ushın naydı gorizont baǵıtında jaylastırılğan dep esaplaymız. Bunday jaǵdayda qozǵalısqı salmaq kúshi tásir etpeydi hám Bernulli teńlemesi mınanı beredi:

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} = \frac{v_0^2}{2} + \frac{p_0}{\rho}.$$

Bul jerde v_0 hám v arkalı naydıń qanday da bir eki kesimindegi aǵıstır tezligi, al r_0 menen r lar sáykes tezlikler. Eger usı kesimlerdiń maydanları S_0 menen S ke teń bolsa, onda 1sek ishinde aǵıp ótken suyıqlıqlardıń kólemleri v_0S_0 hám vS ke teń. Suyıqlıq qısılmaytuǵın dep esaplanganlıqtan $vS=v_0S_0$, bunnan

$$v = v_0 \frac{S_0}{S}$$

ekenligi kelip shıǵadı, yaǵnıy qanday da bir kesimindegi suyıqlıqtıń tezligi kesimniń maydanına kerip proporcional bolıp shıǵadı. Bul ańlatpanı Bernulli teńlemesine qoyamız hám basımdı kesimniń maydanı menen baylanıstıratuǵın ańlatpa alamız:

$$p = p_0 + \frac{\rho}{2}(v_0^2 - v^2) = p_0 + \frac{\rho v_0^2}{2} \left(1 - \frac{S_0^2}{S^2}\right).$$

Biz bul jerde naydıń juwan jerlerindegi basımnıń jıńışke jerlerindegi basımnan úlken bolatuǵınlıǵın kóremiz.

Endi Bernulli teńlemesin ıdıstan kishi tesikshe arqalı shıǵıp atırǵan suyıqlıqtıń tezligin anıqlaw ushın paydalanamız. Tesiksheniń kese-kesimin ıdıstır kese-kesiminiń maydanınan kishi dep esaplanganlıqtan ıdıstaǵı suyıqlıqtıń betiniń tómen qarap túsiwiniń tezligin esapqa almaymız. ıdıstaǵı suwdıń basımın tesikshe arkalı aǵıp atırǵan suyıqlıqtıń basımı menen teń dep esaplap Bernulli teńlemesinen

$$\frac{v^2}{2} + gz_1 = gz_2$$

ańlatpasın alamız. Bul jerde v arqalı tesikshe arqalı aǵıp atırǵan suyıqlıqtıń tezligi, z_1 hám z_2 arkalı ıdıstaǵı suw betiniń biyikligi menen tesiksheniń biyiklikleri belgilengen. Bunnan

$$v = \sqrt{2gh},$$

bul jerde $h=z_2-z_1$. Bul Toricelli formulası dep atalatuǵın formula suyıqlıqtıń kishi tesikshe arqalı aǵıp shıǵıya tezliginiń deneni h biyiklikten taslap jibergende alatuǵın tezligine teń bolatugınlıǵın kórsetedi (bul biyiklik tesiksheniń ústindegi suw baǵanasınıń biyikligine teń).

§ 62. Jıllılıq processleriniń qaytımsızlıǵı

Mexanika nızamları boyınsha materiallıq denelerdiń mexanikalıq qozǵalısları tómendegidey zor qásiyetke iye boladı. Deneniń mexanikalıq qozǵalısrınıń qanday bolmaǵanlıǵına baylanıssız barlıq waqıtta da keri qozǵalıslar múmkin (yaǵnıy dene tuwrı qozǵalıstaǵıday barlıq noqatlardan sol noqatlarda iye bolǵan tezlikleri menen qarama-qarsı baǵıtta ótedi). Mısalı, meyli salmaq maydanında gorizontqa bazı bir múyesh penen ılaqtırılǵan bolsın. Ol qanday da bir traektoriya boyınsha barzı bir ornıda Jerge kelip túsedi. Eger endi usı orınnan deneni kelip túsken múyeshtey múyesh hám sonday tezlik penen ılaqtırsaq, onda dene dáslepkiy traektoriya menen qarama-karsı baǵıtta qozǵalıp óziniń birinshi ornına kelip túsedi (eger hawa menen súykelisti esapqa almasaq).

Mexanikalıq qozǵalıslardań bul *qaytımlılıǵın* bolajaq penen ótmishtiń simmetriyalılıǵınan, yaǵnıy waqıttıń belgisin ózgertiwge qarata simmetriyalılıqtıń orın alıwınan dep túsindiriledi. Mexanikalıq qozǵalıslardıń simmetriyalılıǵı tikkeley qozǵalıslar teńlemeleriniń ózinen kelip shıǵadı. Haqıyqatında da waqıttıń belgisin ózgertsek tezliktiń de belgisi ózgeredi, al teńlemege kiriwshi tezleniw óziniń belgisin saqlaydı.

Pútkilley basqasha situaciya jıllılıq qubılısları oblastında orın aladı. Eger qanday da bir jıllılıq processı júrsen, onda oǵan keri bolǵan processtiń (yaǵnıy tap sol jıllılıq processı keri baǵıttaǵı júretuǵın) júriwi múmkin emes. Basqa sóz benen aytqanda jıllılıq processleri *kaytımsız processler* bolıp tabıladı.

Mısalı, eger hár qıylı temperaturadaǵı eki deneni bir birine tiygizsek, onda kóbirek qızdırılǵan denen jıllılıqtı azıraq kızdırılǵan denegeden beredi. Biraq kerip process (azıraq kızdırılǵan deneniń ózinshe kóbirek qızdırılǵan denegeden jıllılıq beriwini) hesh waqıtta baqlanbaydı.

59-paragrafta aytılıp ótilgen gazdiń boslıqqa keneyiwini de tap sonday kaytımsız bolıp tabıladı. Gaz ótkeldiń eki tárepinde de tarkaladı, biraq ol hesh waqıtta da ózinen-ózi (bul processke sırttan hesh kim aralaspasa) gaz hesh kashan ıdistiń bir yarımına jıynalmaydı.

Ulıwma alǵanda óz-ózine qoyılǵan barlıq deneler sisteması birdey temperatura menen basımǵa iye bolıp jıllılıq teń salmaqlıǵı halına ótiwge umtıladı. Usı halǵat ótkennen keyin sistema ózinshe bul haldan shıqpaydı. Basqa sóz benen aytqanda jıllılıq teń salmaqlıǵı halına jakılasatuǵın processler menen birge júretuǵın barlıq jıllılıq qubılısları kaytımsız.

Mısalı qozǵasıǵı deneler arasındadı súykeliske baylanıslı barlıq processler kaytımsız. Súykelis qozǵalıstıń kem-kemnen ásteleniwini boldıradı (kinetikalıq energiya jıllılıqqa aylanadı). Bul jaǵday qozǵalıslar orın almaytuǵın teń salmaqlıq halına jakın. Usınday sebeplerge baylanıslı gaz ótkel arqalı úlken súykelis penen ótetuǵın bolǵanlıqtan Djoul-Tomson processı kaytımsız bolıp tabıladı.

Ulıwma aytqanda tábiyattadı jıllılıq processleriniń barlıǵı da anaya yamasa mınaw dárejeden kaytımsız bolıp tabıladı. Biraq bir qatar jaǵdaylarda kaytımsızlıq dárejesi sezilerliktey bolmawı múmkin. Sonlıqtan bunday jaǵdaylarda processti jetkilikli dálilikte kaytımlı dep esaplaydı.

Joqarıda aytıılǵanlardan kaytımlılıqqa jetiw ushın sistemadaǵı jıllılıq teń salmaqlıǵına jaqınlatıw xarakterine iye barlıq processlerdi joq kiliw kerek. Mısalı kóbirek kızdırılǵan deneden kemirek kızdırılǵan denegeden jıllılıqtıń tikkeley ótiwini boldırmaw shárt hám deneler qozǵalǵanda súykelistiń bolmawı kerek.

Joqarı dárejedegi kaytımlı processtiń mısalı retinde 59-paragrafta qarap ótilgen gazdiń adiabatlıq qısılwını yamasa keńeyiwini kórsetiw múmkin. Jıllılıq boyınsha

izodyaciyalanğanlıq qorshagan ortalıq penen tikkeley jıllılıq almasıwın joq etedi. Porshenniń qozǵalıwıń "jetkilikli ásteligi" gazdıń boslıqqa qaytımsız keńeyiwın boldırmaydı (bul porshen úlken tezlik penen qozǵalganda orın alǵan bolar edi). Biraq, qalay degen menen ámelde hám qarap ótilgen jaǵdayda barlıq wakıtta da qaytımsızlıqtıń qanday da bir derekleri saqlanıp qaladı (ıdıstıń jıllılıq izolyaciyasıwın jaqsı emesligi, porshen qozǵalganda orın alatuǵın súykelis).

Ulıwma aytkanda "Áste-akırınlıq" (yamasa "ástelik") qaytımlı processlerdiń xarakterli ayırıshalıqlarınıń biri bolıp tabıladı: processke qatnasıwshı deneler waqıttıń barlıq momentlerinde sırtqı shártlerge sáykes keliwshi teń salmaqlıq halǵa jetip úlgeriwi kerek (gazdıń keńeyiwi mısasında óziniń kólemi boyınsha bir teklikliktiń saqlanıwı ushın gaz porshenniń izine jetip úlgeriwi shárt). Al tolıq qaytımlılıq tek ideal jaǵdayda júdá ástelik penen júretuǵın processte jetiledi. Sonlıktan shekti tezlik penen júretuǵın qálegen hakiyqıy processtıń tolıq kaytımlı bolıwı múmkin emes.

Biz jıllılıq teń salmaqlıǵında turǵan deneler sistemasında sırttan aralasıw bolmaǵanda hesh kanday processlerdiń júriwiniń múmkin emes ekenligin aytıp óttik. Bul jaǵdaydıń basqa da aspekti bar: jıllılıq teń salmaqlıǵında turǵan deneler járdeminde hesh qanday jumıs júrgiziw múmkin emes. Sebebi jumıs mexanikalıq qozǵalıw penen, yaǵnıy energiyanıń deneniń kinetikalıq energiyasına ótiwi menen baylanıslı

Jıllılıq teń salmaqlıǵında turǵan deneler esabınan jumıstıń isleniwiniń múmkin emes ekenligi haqqındaǵı oǵada áhmiyetli tastıyıqtawdı *termodinamikanıń ekinshi baslaması* dep ataymız. Biz turaqlı túrde teń salmaqlıq halǵa jaqın halda turǵan kóp muǵdardaǵı jıllılıq energiyasınıń zapasına iyemiz. Termodinamikanıń ekinshi baslaması teń salmalıqta turǵan denelerdiń esabınan jumıs isleytuǵın "*ekinshi áwlad máńgi dvigateldiń*" bolıwın biykarlaydı. Al termodinamikanıń birinshi baslaması (energiyanıń saqlanıw nızamı) bolsa energiyanıń sırtkı deregisiz (yaǵnıy "hesh nársesiz") jumıs isleytuǵın "*birinshi áwlad máńgi dvigateldiń*" bolıwın biykarlaytuǵın edi.

§ 63. Karno cikli

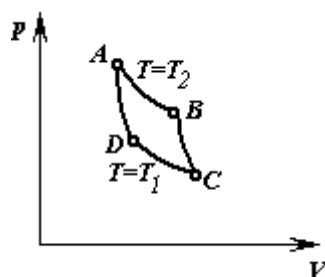
Solay etip jumıs tek bir biri menen jıllılıq teń salmaqlılıǵında turmaǵan deneler sisteması tárepinen ǵana islenedi eken.

Endi temperaturaları hár qıylı bolǵan eki deneden turatuǵın sistemanı kóz aldımızǵa elesleteyik. Eger usı eki deneni bir birine tiygizsek, onda jıllılıq temperaturası joqarı bolǵan deneden temperaturası tómén denegé ótedi hám hesh qanday jumıs islenbeydi. Qızǵan deneden salqın denegé jıllılıqtıń ótiwi qaytımsız process bolıp tabıladı hám bul misal mınaday bolǵan ulıwmalıq qaǵıydanı demonstraciyalaydı: qaytımsız processler jumıstıń isleniwine qarsılıq jasaydı.

Eger biz biziń qolımızdaǵı deneler tárepinen jumıs isletkimiz kelse, onda processtı qaytımlı etip shólkemlestiriwimiz kerek eken (barlıq qaytımsız processlerden qutılıwǵa tırısıw, eki baǵıt boyınsha birdey dárejede júretuǵın processlerdi paydalanıw).

Biziń eki deneden turatuǵın sistemamızǵa kaytıp kelemiz: olardıń temperaturaların T_1 hám T_2 ($T_2 > T_1$) bolsın, temperaturası joqarı deneni *qızdırǵısh*, al temperaturası oǵan salıstırǵanda tómén bolǵan deneni *salqınlatqısh* dep atayıq. Usı eki dene arasında jıllılıqtıń tikkeley ótiwin júzege keltiriwge bolmaytuǵın bolǵanlıqtan jumıs islew ushın jáne bir qosımsha deneniń zárurlıǵı óz-ózinén túsiniqli. Bul denedi *jumıs islewshi dene* dep atayıq.

Bunday dene sıpatında porshen astında turǵan gazi bar cilindr tárizli ıdıstı kóz aldığa keltiriw múmkin.



3-súwret

Jumis islewshi dene menen júretuǵın processti p, V diagrammasında kórsetemiz (3-súwret). Meyli gaz dáslep T_2 temperaturasına iye bolsın hám onıń halı diagrammadagı A noqatına sáykes kelsin. Jumis islewshi denegе qızdırgıshtı tiygizemiz hám gazdı keneytemiz. Bunday jaǵdayda gaz qızdırganda bazı bir muǵdardagı jıllılıq aladı hám barlıq waqıtta da qızdırgıshtıń T_2 temperaturasına iye bolıp qaladı (qızdırgıshtaǵı jıllılıqtıń zapasın úlken hám gazge jıllılıq bergende onıń temperaturası ózgermeydi dep esaplaymız). Solay etip gazdıń izotremalıq keneyiwi qaytımlı túrde júrgiziledi, sebebi jıllılıqtıń ótiwi temperaturaları birdey bolǵan deneler arasında orın aladı. 3-súwrette bul process AV izoterması menen sáwlelendirilgen.

Endi jumıs islewshi deneni qızdırgıshtan ayıramız hám gazdı adiabatılıq keńeyiwge ushıratamız. Bunday keńeyiwde gaz salqınlaydı. Gazdıń temperaturası salqınlatqıshtıń temperaturası T_1 ge teń bolǵansha keńeyiwdi dawam etemiz. Bul process diagrammada VS adiabatası menen sáwlelendiriledi. Bul iymeklik AV iymekligine salıstırǵanda tiklew boladı. Sebebi adiabatılıq keneyiwde basımńıń tómenelewı izotermalıq qeńeyiwdegi basımńıń tómenelewinen tezirek júredi.

Bunnan keyin jumıs islewshi deneni salqınlatqısh penen tutastıramız hám gazdı T_1 temperaturasında izotremalıq túrde kısıamız. Bul jaǵdayda gaz bazı bir muǵdardagı jıllılıqtı salqınlatqıshqa beredi.

Eń keyinde jumıs islewshi deneni salkınlatqıshtan ajıratamız hám gazdı adiabatılıq qısıp, onı óziniń dáslepki halına qaytıp alıp kelemiz. Bul ushın D nokatın durıs saylap alıwımız kerek (yaǵnıy SD izotermalıq qısıwdıń nátiyjesinde alıp kelinetugın kólemniń durıs saylap alınıwı kerek).

Solay etip jumıs islewshi dene óziniń dáslepki halına qaytıp kelip aylanbalı processti basınan keshirdi. Usınıń nátiyjesinde ol iymek sıızılı AVSD tórt múyeshliginiń maydanına teń jumıs isleydi. Bul jumıs joqarıdaǵı izotermada jumıs islewshi deneniń qızdırgıshtan alınǵan jıllılıqtıń tómengi izotermada salqınlatqıshqa berilgen jıllılıq muǵdarınan úlkenliginiń esabınan islendi. Bul aylanbalı processtiń barlıq etapları qaytımlı hám sonlıqtan islengen jumıs isleniwi múmkin bolǵan eń maksimumı bolıp tabıladı (qızdırgıshtıń tárepinen jumsalǵan jıllılıq muǵdarında).

Joqarıda táriyiplengen process *Karno cikli* dep ataladı. Bul cikl temperaturaları hár qıylı bolǵan eki dene bolǵanda qaytımlı túrde jumıstıń islenetuǵınlıǵın kórsetedi. Isleniwi maksimumlıq maniske iye bolǵan bul jumıstıń muǵdarı jumıs islewshi deneniń qásiyetlerine baylanıslı emes.

Islengen jumıstıń shamasınıń qızdırgıshtan alınǵan energiyaǵa qatnası *jıllılıq mashinasınıń paydalı tásir koefficienti* (p.t.k.) dep ataladı (onı η menen belgileybiz).

Joqarıda ayılǵanlardan Karno cikliniń paydalı tásir koefficientiniń qızdıırǵısh penen salqınlatqıstıń temperaturalarınń berilgen temperaturalarında isleytuǵın basqa mashınanıń paydalı tásir koefficientlerinen úlken bolatuǵınlıǵı túsinikli. Bul koefficienttiń

$$\eta_{maks} = \frac{T_2 - T_1}{T_2}$$

shamasına teń ekenligin kórsetiwge boladı.

Solay etip hátte jıllılıq mashınasınıń tolıq qaytımlı ideal sheklerinde de paydalı tásir koefficientiniń mánisi birden kishi; qızdıırǵısh tárepinen berilgen jıllılıqtıń T_1/T_2 bólegi jıllılıq túrinde paydasız salqınlatqıshqa beriledi. Bul bólimniń shaması T_2 kanshama joqarı bolsa (berilgen T_1 de) sonshama kishi boladı. T_1 temperaturası bolsa sırtkı ortalıqtıń temperaturası bolıp tabıladı hám onı tómendetiwdiń múmkinshiligi joq. Sonlıqtan paydasız jum salǵan jıllılıqtıń muǵdarın azaytıw ushın ámelde múmkin boǵanınsha joqarı temperaturalarda (T_2 de) isleytuǵın dvigatellerdi islewge umtıladı.

Haqıyqıy jıllılıq mashınalarınń paydalı tasir koefficienti bul mashinalarda kaytımsız processlerdiń de orın alıwınıń aqıbetinde barlıq wakıtta da η_{maks} nan kish. Dvigateldiń xarakterlik jetilissenliginiń xarakteristikası bolıp onıń ideal mashınaǵa jakınlıǵı - η/η_{maks} bolıp tabıladı (haqıyqıy mashınanıń paydalı tásir koefficientiniń ideal mashınanıń paydalı tásir koefficientine qatnası, ekewinde de kızdıırǵısh penen salqınlatqıshlardıń temperaturaları birdey bolıwı kerek). Basqa sóz benen aytqanda bul qatnas jıllılıq mashınasınıń islegen jumısınıń dvigatel tolıq qaytımlı isleytuǵın bolǵandaǵı maksimallıq jumısqı katnasına teń.

§ 64. Qayımsızlıqtıń tábiyatı

Aqırǵı esapta barlıq jıllılıq qozǵalısları deneniń molekulları menen atomlarınń mexanikalıq qozǵalıslarına alıp klinedi. Sonlıqtan birinshi ret qaraǵanda jıllılıq processleriniń qayımsızlıǵı mexanikalıq qozǵalıslardıń qaytımlılıǵına qayshı keletuǵınday bolıp kórinedi. Al bul tek birinshi ret qaraǵanda ǵana kórinetugin qarama-karsılıq bolıp tabıladı.

Meyli qanday da bir denen ekinshi deneniń beti boyınsha sırǵanaytuǵın bolsın. Súykelistiń tásirinde bul qozǵalı kem-kemnen ástelenedi hám akır-ayaǵında sistema jıllılıq teń salmaqlıǵı halına keledi, qozǵalı toqtaydı. Qozǵalıwshı deneniń kinetikalıq energiyası jıllılıq energiyasına, yaǵnıy eki deneniń molekullarınıń tártipsiz qazǵalıslarınıń kinetikalıq energiyasına aylanadı. Energiyanıń bunday bolıp jıllılıqqa aylanıwı sheksiz kóp usıllar menen ámelge asıwı múmkin: deneniń tutası menen qozǵalıslarınıń kinetikalıq energiyası oǵada kóp sanlı molekullar arasında oǵada kóp usıllar menen bólistiriledi. Basqa sóz benen aytqanda makroskopiyalıq qozǵalı orın almaytuǵın teń salmaqlıq halı tártipli qozǵalıstıń (deneniń tutası menen qozǵalıslarınıń) kinetikalıq energiyası túrinde jıynalǵan halına salıstırǵanda oǵada kóp sanlı usıllar menen júzege keldi.

Solay etip teń salmaqlı emes haldan teń salmaqlı halǵa ótiw az sanlı usıllar járdeminde payda etiletuǵın haldan salıstırmas dárejede kóp sanlı usıllar menen payda etiletugin halǵa ótiw bolıp tabıladı. Eń kóp usıllar menen júzege keletuǵın deneniń (yamasa deneler sistemasınıń) eń itimal halınıń jıllılıq teń salmaqlıǵı halı ekenligi túsinikli. Sonlıqtan qandayda bir waqıt momentinde teń salmaqlıq halında turmaǵan ózi ozine qoyılǵan

sistemanıń (yaǵnıy tuyıq sistemanıń) waqıttıń ótiwi menen oǵada kóp usıllar menen júzege keletuǵın halǵa, yaǵnıy teń salmaqlıqqa ótiwi eń itimal bolıp tabıladı.

Al, kerisinshe, tuyıq sistema teń salmaqlıq halǵa kelgen bolsa, onda usı sistemanıń ózinshe bul haldan shıǵıwınıń timallılıǵı oǵada az bolǵan bolar edi.

Solay etip jıllılıq processleriniń qaytımsızlıǵı *itimallılıq xarakterine* iye. Anıq aytkanda deneniń teń salmaqlıq xaldan ózinshe teń salmaqlıq emes halǵa ótiwin múmkin emes dep aytpaymız, al teń salmaqlı emes haldan teń salmaqlıq halǵa ótiwine qaraǵanda salıstırmas dárejede itimallılıǵı az dep esaplaymız. Aqırǵı esapta jıllılıq processleriniń qaytımsızlıǵı deneler turatugın molekulalardıń sanlarınıń oǵada kópliginde bolıp tabıladı.

Gazdıń boslıqqa keneygenindegi teń salmaqlıq haldan awısıwı haqqında túsiniikke iye bola alamız. Meyli gaz dáslep diywal menen teńdey ekige bólingen ıdıstıń bir bóliminde jaylasqan bolsın. Diywal alıńǵannan keyin gaz ıdıstıń barlıq kólemi boyınsha teń ólshewli tarqaladı. Al ıdıstıń bir bólimine gazdıń ózinshe qayıp ótiwi hesh qashan ámelge aspaydı. Buniń sebebin ápiwayı esaplaw menen anıqlawǵa boladı. Gazdıń hár bir molekulası óziniń qozǵalıwında ortasha ıdıstıń eki bóliminde de birdey waqıt ishinde boladı. Sonıń ushın molekulanı ıdıstıń hár bóliminde tabıwdıń itimallılıǵı $\frac{1}{2}$ ge teń. Eger gazdı ideal gaz dep esaplasaq. Onda onıń molekulaları bir birinen gárezsiz. Sonıń ushın berilgen eki molekulanı ıdıstıń bir bóliminde tabıwdıń itimallılıǵı $\frac{1}{2} * \frac{1}{2} = 1/2^2$, al gazdıń N dana molekulasını ıdıstıń bir bóliminde tabıwdıń itimallılıǵı 2^{-N} ge teń boladı. Solay etip, misalı, 10^{20} molekulası bar gazdıń kóp emes muǵdarı ushın itimallılıq oǵada kishi sanǵa teń $2^{-10^{20}} \approx 10^{-3*10^{19}}$. Basqa sózler menen aytqanda bunday qubılıstı $10^{-3*10^{19}}$ sanı menen ańlatılatuǵın sekund yamasa jıl (bul sanǵa salıstırǵanda jıl menen sekundtıń hesh bir ayırması joq, sebebi ol waqıt Jerdiń payda bolǵan berli waqıttan salıstırmas dárejede úlken) ishinde bir ret baqlaw múmkin.

$10^{-3*10^{19}}$ ǵa teń tap usınday oǵada kishi san menen temperaturası 0°S bolǵan deneden temperaturası 1°S bolǵan denegе 1 erg ke teń jıllılıqtıń ótiwi de sáwlelendiriledi.

Keltirilgen mısallardan jıllılıq processiniń ózinen ózi baǵıtın sezilerliktey ózgertiwiniń abstraktlıq xarakterge iye ekenligi kórinip tur; onıń itimallılıǵı oǵada kishi. Sonlıqtan jıllılıq processleriniń qaytımlı emesligi principiallıq maǵanaǵa iye dep esaplawǵa boladı.

Biraq (bári bir) qaytımlı emesliktiń itimallılıq tábiyatını mınadan ibarat: tábiyatta júdá az hám qısqa waqıtlar ishinde teń salmaqlılıqtan ózinshe awısıwlar bári bir baqlanıp turadı. Bunday awısıwlardı *fluktuaciyalar* dep ataydı. Fluktuaciylardıń aqıbetinen deneniń teń salmaqlıqta turǵan úlken emes uıastkalarında tıǵızlıq penen temperatura dál turaqlı mániske iye bolıp qalmay, bazı bir shama átirapında (kishi bolsa da) terbeliske ushıraydı. Misalı ójire temperaturasında turǵan 1 milligramm suwdıń temperaturası shama menen 10^{-8} gradusqa terbeledi. Sonıń menen birge fluktuaciyalar úlken orın iyeleytuǵın qubılıslar bar.

§ 65. Entropiya

Deneniń baska halǵa otiwge umtılwıń táriyipleytugın jıllılıq halınıń sanlıq xarakteristikası bolıp usı hal júzege keletuǵın mikroskopiyaqlıq usıllardıń sanı bolıp tabıladı. Bul san haldıń *statistikalıq salmaǵı* dep ataladı. Olnı G háripı járedminde belgileyemiz. Óz ózine qoyılǵan dene statistikalıq salmaǵı úlken bolǵan halǵa ótiwge umtıladı.

Biraq G sanınıń ornına usı sannıń logarifmin k ǵa kóbeymesin qollanıw qabıl etilgen. Usınday jollar menen anıqlanǵan

$$S = k \ln G$$

shamasın deneniń *entropiyası* dep ataymız.

Mısalı, eki deneden turatuǵın sistemanı payda etiwdiń usıllarınıń sanı usı denelerdiń hár birin payda etiwshi usıllar G_1 menen G_2 lerdiń kóbeymesine teń: $G = G_1 G_2$. Sonlıqtan

$$S = k \ln G = k \ln G_1 + k \ln G_2 = S_1 + S_2.$$

Biz bul jerde kuramalı sistemasınıń entropiyasınıń onıń bólekleriniń entropiyalarınıń qosındısına teń ekenligin kóremiz.

Jıllılıq processleriniń baǵıtın anıqlawshı nızamdı *entropiyanıń ósiw nızamı* dep aytıw múmkin: jabıq sistemada júretuǵın barlıq jıllılıq processlerinde entropiya ósedi; entropiyanıń maksimalıq múmkin bolǵan mánisi jıllılıq teń salmaqlıǵında alınadı. Bul tastıyqlaw *termodinamikanıń ekinshi nızamınıń* eń dál aytıluı bolıp tabıladı. Bun nızam Klauzius tárepinen ashıldı, al onıń molekulaıq-kinetikalıq talqılanıwı Bolcman tárepinen berildi.

Keri túrde bılayınsha ayta alamız: jabıq sistemanıń entropiyasınıń osiwi menen júretuǵın qalegen process qaytımsız process bolıp tabıladı, entropiya ósken sayın qaytımsızlıq dárejesi de ósedi. Toliq kaytımlı processtıń ideallıq mısalına jabıq sistemanıń entropiyasınıń ózgermey qalıwı sáykes keledi.

Deneniń jıllılıq halınıń "payda etiwdiń mikroskopiyaıq sanı" degenniń dál mánisi *statistikalıq fizikada* beriledi. Sol jerde ǵana hár qıylı denelerdiń entropiyasın esaplawǵa hám onıń basqa da jıllılıq shamaları menen baylanısın anıqlawǵa múmkinshilik tuwıladı.

Tereńirek teoriyaıq tallaw entropiya túsiniǵın termodinamikaıq jaqtan qollanıw ushın qatnaslardı dúziwge múmkinshilik beredi. Bul qatnas deneniń shamasınıń sheksiz kishi kaytımlı ózgerisinde deneniń entropiyasınıń ózgerisi dS shamasın usı processte alıńǵan jıllılıq muǵdarı dQ menen baylanıstırıwǵa múmkinshilik beredi (bul jaǵdayda ǵap jabıq emes sistema haqqında aytıladı, sonlıqtan processtıń qaytımlılıǵı entropiyanıń turaqlılıǵın talap etpeydi!). ǵap etilip atırǵan qatnas $dS = dQ/T$ túrinde boladı (T arkalı deneniń temperaturası belgilengen).

dS penen dQ arasındaǵı baylanıstır bar ekenligi tábiyiy. Denege jıllılıq beriw onıń atomlarınıń jıllılıq qozǵalıslarınıń qusheyiwine, yaǵnıy hár qıylı mikroskopiyaıq qozǵalıslar halları boyınsha bólistiriwdiń xotikililiginıń ósiwine alıp keledi. Bul statistikalıq salmaqtır ósiwin támiyinleydi. Bunnan basqa berilgen jıllılıq muǵdarınıń deneniń jıllılıq halınıń ózgerisine tásiiri usı muǵdardıń deneniń tolıq ishki energiyasına qatanası menen xarakterlenedi. Sonlıqtan onıń temperaturasınıń ósiwi menen kemeydi.

Dara jaǵdayda $dQ = TdS$ qatnası 63-paragrafta keltirilgen Karno cikliniń paydalı tásir koefficienti ushın alıńǵan ańlatpaǵa alıp keledi. Biz bul processte úsh deneniń qatnasatuǵınlıǵın kórdik: qızdırǵısh, salqınlatqısh hám jumıs islewshi dene. Jumıs islewshi dene cikldiń nátiyjesinde óziniń dáslepki halınday halǵa hám sonlıqtan sonlıqtan onıń entropiyası da óziniń dáslerpki shamasına qaytıp keledi. Processtıń qaytımlılıq shárti (baska sózler menen aytqanda sistemanıń tolıq entropiyasınıń ózgermewine qoyılǵan talap) bul jaǵdayda qızdırǵıstıń entropiyası S_1 menen salqınlatqıshtıń entropiyasını S_2 niń entropiyalarınıń qosındısınıń ózgermesligine kelip tireledi. Meyli cikli barısında salqınlatqısh bazı bir kishi ΔQ_1 jıllılıǵın alatuǵın, al qızdırǵısh ΔQ_2 jıllılıǵın beretuǵın bolsın. Onda

Bunnan

$$\Delta Q_1 = \frac{T_1}{T_2} \Delta Q_2.$$

Bir cikldegi jumis $A = \Delta Q_2 - \Delta Q_1$. Sonliqtan

$$\eta = \frac{A}{\Delta Q_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2}.$$

IX BAP

FAZALIQ ÓTIWLER

§ 66. Fazalıq ótiwler

Suyıqlıqtıń puwlanıwı yamasa qattı deneniń eriwi fizikada *fazalıq ótiwler* dep atalatuǵın processlerdiń kategoriyasına kiredi. Bul processlerdiń xarakterli ayrıqshalıǵınıń biri olardıń sekirmeliliginde. Mısalı muz qızdırılǵanda onıń jıllılıq halı kem-kemnen ózgeredi, al temperatura 0°S ǵa kóterilgende muz birden qásiyetleri pútkilley basqasha bolǵan suwǵa aylana baslaydı.

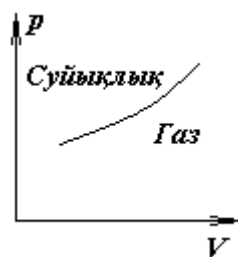
Arasında fazalıq ótiw orın alatuǵın zatlardıń halları onıń *fazaları* dep ataladı. Bunday mániste zatlardıń agregat (gaz tárizli, suyıq hám qattı) halları hár qıylı fazalar bolıp tabıladı. Biraq faza túsinigi agregat hal túsinigine salıstırǵanda keńirek, biz bir agregat haldıń ózinde hár qıylı fazalardıń bar bola alatuǵınıń kóremiz.

Zattıń suyıq fazadan basqa ayrıqsha fazası bolǵan qattı hal haqqında aytqanımızda biziń qattı kristallıq haldı názerde tutatuǵınımızdı atap ótkenimiz zárúrli. Qızdırǵanda amorf qattı dene áste aqırınlıq penen jumsarıp sekiriwsiz suyıq halǵa ótedi (bul haqqında 52-paragrafta ayıldı). Sonlıqtan amorf hal zattıń ayrıqsha fazası bolıp tabılmaıdı. Mısalı qattı hám suyıq shıyshe hár qıylı fazalar bolıp tabılmaıdı.

Berilgen basımda bir fazanıń ekinshi fazaǵa ótiwi barlıq waqıtları belgili bir temperaturada júredi. Mısalı atmosferalıq basımda muz 0°S temperaturada eriy baslaydı hám qızdırıwdı dawam etkende tolıq erip bolǵansha temperaturası ózgermey kaladı. Usı processtıń dawamında muz benen suw bir birine tiyip birgelikte jasaydı.

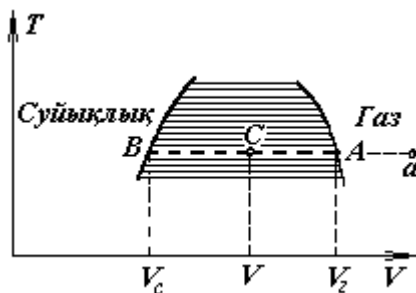
Bul jerde fazalıq ótiw temperaturasınıń basqa aspekti kórinedi: bul eki faza jıllılıq teń salmaqlıǵında turatuǵın temperatura bolıp tabıladı. Sırtqı tásirler bolmasa (sonıń ishinde jıllılıqtıń beriliwi de orın almasa) usı temperaturada eki faza sheksiz kóp waqıt birgelikte jasaydı. Al fazalıq ótiw temperaturasınıń (ótiw noqatınan) kishi yamasa joqarı temperaturalarda tek bir faza (fazalardıń ekewiniń biri) bar boladı. Mısalı 0°S dan tómengi temperaturalarda ham ádettegi atmosferalıq basımlarda tek muzǵa, al 0°S dan joqarı temperaturalarda tek suwǵa iye bolamız.

Basım ózgerse fazalıq ótiw temperaturası da ózgeredi. Basqa sózler menen aytqanda fazalıq ótiw tek zattıń basımı menen temperaturası arasında qatań ǵárezlilik bar bolǵanda ǵana orın aladı. Bul ǵárezlilikti koordinata kósherlerine r menen V qoyılǵan *fazalıq diagrammada* (yamasa *hallar diagrammasında*) grafikalıq iymeklik túrinde súwretlew múmkin.



1-súwret.

Anıqlıq ushın suyıqlıq penen onıń puwı arasındaǵı fazalıq ótiw haqqında aytamız. Bul jaǵdayda fazalıq ótiw iymekligi (usı misal qaralǵanda *puwlanıw iymekligi* dep te ataladı) suyıqlıq penen onıń puwınıń qanday jaǵdaylarda teń salmaqlıqta turatuǵınlıǵınıń shártlerin anıqlaydı. Iymeklik tegislikti eki bólimge bóledi: onıń birewi bir fazanıń halına, ekinshisi ekinshi fazanıń halına sáykes keledi (1-súwret). Bul jaǵdayda berilgen basımǵa hám joqarıraq temperaturalarǵa puw, al tóménirek temperaturalarǵa suyıqlıq sáykes kelgenlikten iymektiktiń oń tárepindegi oblastqa gaz tárizli, al oń tárepindegi oblastqa suyıq faza sáykes keledi. Al iymektiktiń ústinde jatqan noqatlar eki faza bir waqıtta jasaytuǵın hallarǵa sáykes keledi.



2-súwret.

Fazalıq diagrammanı tek r, T tegisliginde emes, al r, V yamasa T, V koordinatalarında da dúziw múmkin. Bul jerde V arqalı zattıń qanday da bir muǵdarına sáykes keliwshi kólem belgilengen. Mısalı V arqalı salıstırmalı kólem, yaǵnıy zattıń bir grammınıń kólemi belgilengen bolıwı múmkin (bunday jaǵdayda $1/V$ zattıń tıǵızlıǵı bolıp tabıladı).

Endi V, T tegisligindegi fazalıq diagrammanı qaraymız. Meyli bizde 2-súwrettegi a noqatına sáykes keliwshi temperaturaǵa hám salıstırmalı kólemge iye gaz bar bolsın. Eger gazdı ózgermeytuǵın temperaturada qıssaq, onda gazdıń halın sáwlelendiretuǵın noqat V kósherine parallel baǵıtta ońǵa qaray qozǵaladı. V_g salıstırmalı kólemine sáykes keletuǵın basımda (A noqatı) gazdıń suyıqlıǵına kondensaciya baslanadı. Sistemanı qısıwdı dawam etkende suyıqtıqtıń muǵdarı kóbeyedi, al gazdıń muǵdarı kemeyedi. Al anıq bir V noqatına jetkende barlıq zat salıstırmalı kólemi V_s bolǵan suyıqlıqqa aylanadı.

Bir birinen alınatuǵın suyıqlıq penen gazdıń salıstırmalı kólemleri (V_g hám V_s) fazalıq ótiw júretuǵın temperaturanıń funkciyaları bolıp tabıladı. Bul eki funkciyanı sáykes iymeklikler járdeminde súwretlep biz 2-súwrette kórsetilgen túrdegi fazalıq diagrammanı alamız. Diagrammadaǵı shtrixlanǵan oblasttıń oń hám shep tárepleri gaz tárizli hám suyıq fazalarǵa sáykes keledi. Eki iymekliktiń ortasındaǵı shtrixlanǵan oblast eki faza bir wakıtta jasaytuǵın oblast bolıp tabıladı. Diagrammanıń bul bóliminiń gorizontallıq shtrixlanıwı anıq mániske iye: bazı bir S noqatı arqalı ótkerilgen gorizont baǵıtındaǵı tuwrınıń sol iymeklikler menen kesilisiw noqatları A menen V usı noqatka sáykes keliwshi suyıqlıq penen puwdıń salıstırmalı kólemlerin anıqlaydı.

AV kesindisiniń hár qıylı noqatları hár qıylı salıstırmalı muǵdarlardagı bir suıqlıq penen bir puwdır teń salmaqlıǵına saykes keledi. Bazı bir S noqatındagı puw menen suıqlıqtıń salıstırmalı muǵdarın x hám $1-x$ arqalı belgileyik. Bunday jaǵdayda sistemanıń ulıwmalıq kólemi mınaǵan teń ($1 g$ ǵa qatnası):

$$V = xV_g + (1-x)V_s.$$

Bunnan

$$x = \frac{V - V_s}{V_g - V_s}, \quad 1 - x = \frac{V_g - V}{V_g - V_s},$$

Bul shamalardıń qatnası

$$\frac{x}{1-x} = \frac{V - V_s}{V_g - V} = \frac{VS}{AS}.$$

Biz bul jerde puw menen suıqlıqtıń muǵdarınıń S noqatınan puw menen suıqlıqqa saykes keliwshi A hám V noqatlarına shakemgi aralıqlarǵa kerı proporcional ekenligin kóremiz (bul qatnas *rııag qádesi* dep ataladı).

Eger koordinata kósherine temperatura emes, al basım qoyılǵan diagrammalarda da joqarıda táriyiplengendey jaǵdayǵa iye bolamız. Biz bul diagrammanıń r, T kósherlerinde dúzilgen diagrammaǵa uqsas emes ekenligin kóremiz. Buringı r, T diagrammasında bir sıziqqa qısılǵan eki fazanıń qatıamlasıw oblastı V, T yamasa V, r diagrammasında pútin oblastqa aylanadı. Bunıń kelip shıǵıwı mınaǵan baylanısı: jıllılıq teń salmaqlıǵı shárti boyınsha teń salmaqlıqta turǵan fazalar birdey temperatura menen basımǵa iye boladı, al bul fazalardıń salıstırmalı kólemleri hár qıylı.

Endi bazı bir zatlardıń atmosfera basımındaǵı eriw menen qaynawı ushın keste keltiremiz:

	Eriw noqatı, °S.	Qaynaw noqatı, °S.
Geliy (Ne ³ izotopı)	-	-270,0 (3,2 K)
Geliy (Ne ⁴ izotopı)	-	-268,9 (4,2 K)
Vodorod	-259,2 (14 K)	-252,8 (20,4 K)
Kislorod	-219	-183
Etil spirti	-117	78,5
Etil efiri	-116	34,5
Sınap	-38,9	356,6
Qorgásın	327	1750
Alyuminiy	660	2330
NaCl	804	1413
Gúmis	961	2193
Mıs	1083	2582
Temir	1535	2800
Kvarc	1728	2230
Platina	1769	4000
Volfram	3380	6000

Tábiyattaǵı bar zatlardıń ishinde geliy eń tómengi temperaturada suıqlıqqa aylanadı (geliydiń qattı halǵa ótiwi haqqında 72-paragrafta ayıladı). Ximiyalıq elementlerdiń ishinde volfram eń úlken eriw hám qaynaw temperaturalarına iye.

§ 67. Klapayron-Klauzius formulası

Zattıń bir fazasınıń ekinshi fazaǵa ótiwi barlıq waqıtta da bazı bir muǵdardaǵı jıllılıqtıń jutılıwı yamasa shıǵarılıwı menen ámelge asadı. Bunday jıllılıq muǵdarın *jasırın jıllılıq* yamasa *ótiw jıllılıǵı* dep ataydı. Suyıqlıq gaz halına ótkende puw payda bolıwdıń jıllılıǵı, al qattı dene suyıq halǵa ótkende eriw jıllılıǵı haqqında aytadı.

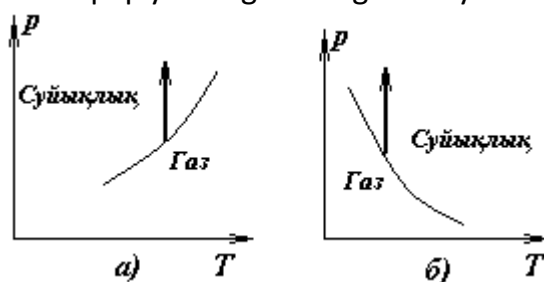
Fazalıq ótiw turaqlı basımda júretuǵın bolǵanlıqtan 1-fazanıń 2-fazaǵa ótiw jıllılıǵı q_{12} zattıń usı fazalardıǵı jıllılıq funkciyalarınıń ayırmasına teń (56-paragraftı qarańız):

$$q_{12} = W_2 - W_1.$$

$q_{12} = -q_{21}$ ekenligi óz-ózinen túsiniikli, yaǵnıy bazı bir fazalıq ótiwde jıllılıq jutılatuǵın bolsa, onda keri ótiw jıllılıqtı bólip shıǵarıw menen júredi.

Eriwde yamasa puwlanıwda jıllılıq jutıladı. Bul ulıwmalıq qádeniń dara jaǵdayı bolıp tabıladı (bul qáde boyınsha qızdırılǵanda bolatuǵın fazalıq ótiw jıllılıqtıń jutılıwı menen júzege keldi). Óz gezeginde bul qaǵıyda Le SHatale principiniń nátiyjesi bolıp tabıladı: qızdırıw jıllılıqtıń jutılıw processiniń júzege keliwine alıp keledi xám usınıń menen sırtqı tásirge qarsılıq jasaladı.

Sol principitiń járdeminde fazalıq ótiwde baqlanatuǵın kólemniń ózgerisi menen r, T tegisligindegi fazalıq teń salmaqlıq iymekliginiń baǵıtın baylanıstırıw múmkin.

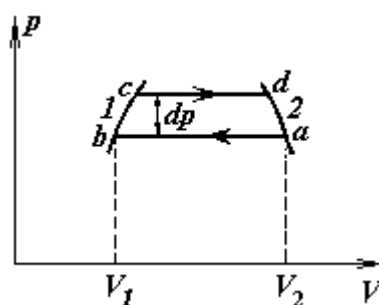


3-súwret.

Mısal retinde suyıqlıq penen puwdan turatuǵın teń salmaqlı sistmanı alamız hám bul sistmanı qısamız. Sonlıqtan onıń basımı artadı. Bunday jaǵdayda sistmanın kólemi kishireytetuǵın hám sonıń saldarınan basımniń tásin ázziletiwshi procesler júredi. Bunıń ushın puwdıń kondensaciyalanıwı kerek. Sebebi puwdıń suyıqlıqqa aylanıwı barlıq waqıtta kólemniń kishireyiwine alıp keledi. Sonlıqtan teń salmaqlıq iymektiginen joqarı qaray jılısaq biziń suyıq faza oblastına kiriwimiz kerek (3-súwret). Ekinshi tárepten bul jaǵdayda suyıqlıq "tómengi temperaturalı faza" bolıp tabıladı (yaǵnıy tómenerik temperaturalarda jasaytuǵın faza). Usılardıń barlıǵın esapqa alsaq suyıqlıq penen gazdıń teń salmaqlıq iymekligi 3-b súwrettegidey emes, al 3-a súwrette kórsetilgendey bolıwı kerek dep juwmaq shıǵaramız: basım ósken sayın ótiw temperaturasınıń joqarılawı kerek.

"Joqarı temperaturalı fazaǵa" ótkende kólem úlkeyetuǵın barlıq jaǵdaylarda temperaturanıń basımnan joqarıda keltirilgendey ǵárezziliginıń baqlanıwınıń kerekligi ózinen ózi túsiniikli. Kópshilik jaǵdaylarda erigende zattıń kólemi úlkeyedi, sonlıqtan basımniń úlkeyiwi menen eriw noqatı da ádette joqarılaydı. Biraq biraz zatlarda eriw kólemniń kishireyiwi menen de júredi (muz, shoyın, vismut). Bul zatlarda basım úlkeygende eriw noqatı tómenerleydi.

Usı sapalıq nátiyjelerdiń barlıǵı da fazalıq teń salmaqlıq iymekliginiń qıyalıǵın ótiw jıllılıǵı hám ótkendegi kólemniń ózgeriwi menen baylanıstıratuǵın formulada óziniń sanlıq ańlatpasın tabadı.



4-súwret.

Bul formulanı keltirip shıǵarıw ushın zattıń bazı bir muǵdarı menen júdá tar Karno cikli ámegle asırılatuǵın bolsın. Bul cikldegi izotermalıq processte bazı bir r basımında alınǵan zat 2-fazadan 1-fazaǵa ótsin. Al 1-fazadan 2-fazaǵa keri ótiw $r+dr$ basımında júzege keltirilsin. Bul ótiwler r, V diagrammasında (4-súwret) ab hám sd kesindileri menen súwretlenedi. Al bs hám da qaptal táreplerine keletuǵın bolsaq, onda usı kesindilerdiń ornına adiabatalardı alıw kerek boladı. Biraq sheksiz kishi cikl sheklerinde bul ayırma esapqa alǵanday úlken emes, ol ayırma bizdi qızıqtıratuǵın cikl maydanı $(V_2 - V_1)dr$ ǵa tásir jasamaydı (yaǵnıy orınlanǵan aylanbalı processtegi jumısta). Ekinshi tárepten bul jumıstıń shaması sd izotermasında jumсалǵan jıllılıq muǵdarı q_{12} menen Karno cikliniń paydalı tásir koefficientiniń kóbeymesine teń. Q_{12} niń shaması 1-fazadan 2-fazaǵa ótiw jıllılıǵı, al p.t.k. dT/T qatnasına teń (dT eki izotermadaǵı temperaturalar ayırması). Sonlıqtan

$$(V_2 - V_1)dr = q_{12}dT/T.$$

Bunnan

$$\frac{dp}{dT} = \frac{q_{12}}{T(V_2 - V_1)}.$$

Bul fazalıq teń salmaqlıq iymekligi $r=r(T)$ niń qıyalıǵın anıqlaytuǵın formula *Klapeyron-Klauzius formulası* dep ataladı. Onı bılayınsha da jazıwǵa boladı:

$$\frac{dT}{dp} = \frac{T(V_2 - V_1)}{q_{12}}.$$

Bul jerde ótiw temperaturası basımniń funkciyası sıpatında berilgen. Bul formulalardıǵı V_1 menen V_2 eki fazanıń kólemleri hám q_{12} jıllılıǵı bir zattıń tek birdey muǵdarına tiyisli (mısalı 1 g zatqa yamasa bir gramm-molekulaǵa).

Joqarıdaǵı formuladaǵı dr/dT tuwındısınıń kólemler ayırması $(V_2 - V_1)$ ge keri proporcional ekenligin kóremiz. Puwlanıwda kólemniń ózgerisi úlken, al eriwde kishi bolǵanlıqtan eriw iymekligi puwlanıw iymekligine salıstırǵanda tik bolıp keledi. Mısalı suwdıń qaynaw noqatın 1° qa tómenletiw ushın basımdı 27 mm sın.baǵ. basımınday basımǵa kishireytiw jetkilikli, al muzdıń eriw temperaturasın 1° qa tómenletiw ushın basımdı 130 atm ǵa úlkeytiw kerek.

§ 68. Puwlanıw

Óziniń suyıqlıǵı menen teń salmaqlıqta turǵan puw *toyınǵan puw* dep ataladı. Al onıń basımı haqqında *toyınǵan puwdıń serpimliligin* gáp etedi. Suyıqlıq-puwdıń teń salmaqlıq iymekligin (1-súwret) bul serpimlilikniń temperaturaǵa ǵárezlilik sıpatında qaraw múmkin.

Toyınǵan puwdıń serpimliliǵı temperaturanıń ósiwi menen barlıq waqıtta da artadı. Biz joqarıda ǵárezlilikniń bunday xarakteriniń puwlanıwda zattıń kóleminiń úlkeyiwine

baylanıslı ekenligin kórdik. Ádette bunday úlkeyiw júdá sezilerliktey boladı. Mısalı 100°S daǵı suw puwınıń kólemi suwdıń kóleminen 1600 ese úlken, -183°S da suyıq kislород qaynaǵanda onıń kólemi shama menen 300 ese úlkeyedi.

Jetkilikli tómen temperaturalarda toyınǵan puwdıń tıǵızlıǵı sonshama kemeyedi, ol ideal gazdıń qásiyetlerine iye boladı. Bunday sharayatlarda puwdıń serpimliliginiń temperaturaǵa ǵárezliligi ushın ápiwayı formula alıwǵa boladı. Bunıń ushın Klapeyron-Klauzius formulasınan paydalanamız:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{q}{T(V_g - V_s)}.$$

Bul jerde V_g menen V_s puw menen suyıqlıqtıń mollik kólemleri, q arqalı puwlanıw jıllılıǵı belgilengen. V_g nıń shaması V_s nıń shamasınan júdá úlken bolǵanlıqtan keyingisin esapka almay ketiwge de boladı. Gazdıń bir gramm-molekulasınıń kólemi $V_g = RT/p$. Sonlıqtan

$$\frac{dp}{dT} = \frac{pq}{RT^2} \text{ yamasa } \frac{1}{p} \frac{dp}{dT} = \frac{d \ln p}{dT} = \frac{q}{RT^2}.$$

Puwlaniw jıllılıǵınıń ózi de temperaturaǵa ǵárezli bolsa da ádewir úlken temperaturalar intervallarında onı ámeliy jaqtan turaqlı dep esaplawǵa boladı (mısalı suwdıń puwlaniw jıllılıǵı 0° tan 100° qa shekemgi intervalda tek 10% ke ǵana ózgeredi). Bunday jaǵdayda alınǵan formulanı mına túrde qaytadan jazıwǵa boladı:

$$\frac{d \ln p}{dT} = - \frac{d}{dT} \left(\frac{q}{RT} \right).$$

Bunnan

$$\ln p = \text{const} - \frac{q}{RT}$$

hám eń aqırında

$$p = ce^{-\frac{q}{RT}}.$$

Bul jerde s arqalı turalı koefficient belgilengen. Bul formula boyınsha toyınǵan puwdıń serpimliligi temperaturaǵa baylanıslı (eksponencial nızam boyınsha) tez ózgeredi.

Bunday eksponenciallıq ǵárezliliktiń payda bolıw sebebin kórgizbeli túrde bılayınsha túsindiriwge boladı. Suıqlıq molekuları bir biri menen kúshi arqalı baylanısqa. Bul kúshlerdi jeńiw hám qanday da bir molekulanı puwǵa ótkeriw ushın belgili bir jumıstıń isleniwi kerek. Molekulanıń suıqlıqtaǵı potencial energiyasın gazdegi potencial energiyasınan bir molekulaǵa sáykes keliwshi puwlaniw jıllılıǵına kem dep aytıwǵa boladı. Eger q arqalı puwlaniwdıń mollik jıllılıǵı belgilengen bolsa, onda potencial energiyalardıń ayırması q/N_0 ge teń (N_0 arqalı Avagadro sanı belgilengen).

Biz endi Bolcman formulasınan paydalana alamız (54-paragraf) hám onıń tiykarında molekulanıń potencial energiyasınıń q/N_0 shamasına úlkeyiwi gazdıń tıǵızlıǵınıń suıqlıqtıń tıǵızlıǵına salıstırǵanda

$$e^{-q/N_0 kT} = e^{-q/RT}$$

qatnasınday boladı dep ayta alamız. Usı ańlatpaǵa puwdıń basımı da proporcional boladı.

Atmosferalıq basımlardaǵı bazı bir zatlardıń puwlaniw jıllılıǵı menen eriw jıllılıqlarınıń mánislerin keltiremiz:

	q_{puwlaniw}	q_{eriw}
Geliy	80	-

Suw	40500	5980
Kislorod	6800	442
Etil spirti	39000	4800
Etil efiri	59000	7500
Sinap	28000	2350

[Puwlanıw jıllılıǵı boyınsha (kritikalıq noqattan alısta, 69-paragraftı qarańız) molekulalar arasındaqı Van-der-Vaals tásirlesiw kúshiniń shamasın anıqlawdıń múmkin ekenligin atap ótemiz. 39-paragrafta ayılǵanday usı kúshler zatlardıń kondensaciyasına alıp keledi. Sonlıqtan q_{eriw} di Avagadro sanına bólip (yaǵnıy bir molekulaǵa sáykes keliwshi puwlanıw jıllılıǵın anıqlap) Van-der-Vaals táselesiwiniń iymekligindegi minimumnıń tereńligin anıqlaymız. Usınday jollar menen geliy ushın shama menen júzden bir elektron-volt, al kestede keltirilgen basqa suyıqlıqlar ushın birden onlaǵan elektron-voltke shekemgi mánislerdi alamız].

Ádettegi sharayatlarda suyıqlıqtıń ústinde óziniń puwı menen bir katarda basqa gaz – hawa da bar boladı. Bul jaǵday fazalıq teń salmaqlıqqa az tásin jasaydı: puwdıń parcialıq basımı suyıqlıq temperaturasındaǵı toyınǵan puwdıń serpimliligine teń bolǵanǵa shekem puwlanıw dawam etedi.

Biraq atmosfera puwlanıw processiniń barısına úlken tásir etedi. Berilgen temperaturadaǵı suyıqlıqtıń basımınan toyınǵan puwınıń serpimliliginiń kishiligine yamasa úlkenligine ǵárezli bul processtıń kartınası pútkilley hár qıylı boladı.

Birinshi jaǵdayda suyıqlıqtıń beti arqalı áste-aqırınlıq penen puwlanıwı orın aladı. Bettıń tikkeley ústinde puwdıń parcialıq basımı derlik birden toyınǵan puwdıń basımına teń boladı. Biraq bul toyınǵan puw tek áste-aqırınlıq penen (diffuziya jolı menen) qorshaǵan ortalıqqa taraydı hám ol hawa menen aralasıp ketkennen keyin ǵana suyıqlıqtıń jańa porciyaları puwlanadı. Suyıqlıqtıń betindegi puwdı jasalma túrde úrlegende puwlanıw tezliginiń artıwı tábiyiy nárese.

Toyınǵan puwdıń serpimligi qorshaǵan ortalıqtıń basımına teń bolǵanda (yamasa qorshaǵan ortalıqtıń basımınan úlkenirek bola baslasa) processtıń xarakteri ózgeredi – suyıqlıqtıń tez qaynawı baslanadı. Qaynaw bette gaz kóbikleriniń burqıp payda bolıwı menen xarakterlenedi. Bul kóbikler suyıqlıqtıń ishinde payda bolıp, suyıqlıqtı aralastırıp kóteriledi. Usınday jaǵdayda suyıqlıqtıń erkin betinen qorshaǵan atmosferaǵa puw kóteriledi.

Keyinirek túsindiriletuǵın sebeplerge baylanıslı ulıwma aytqanda suyıqlıqtıń puwǵa aylanıwı taza suyıqlıqtıń túbinde (yamasa tereńde) puw kóbiksheleriniń ózinen ózi payda bolıwı menen júrmeydi. Bıdistıń diywallarında burınnan-aq bar yamasa qızǵanda suyıqlıqtan kısıp shıǵarılıwdıń nátiyjesinde payda bolatuǵın basqa gazlerdiń kóbiksheleri (yamasa suyıqlıqta júzip júrgen) gaz tárizli fazanıń payda bolıw orayları bolıp tabıladı. Qaynaw noqatınan tómengi temperaturalarda (qaynaw temperaturasında toyınǵan puwdıń serpimligi sırtqı basımǵa teń boladı) qorshaǵan suyıqlıqtıń basımı bul kóbikshelerdiń úlkeyiwine kesent jasaydı.

Suyıqlıq aldın-ala ıqshamlı etip tazartılǵanda yamasa suyıqlıqtıń kuramındaǵı basqa gazler joq qılınǵanda *puw payda bolıw orayları* ámeliy jaqtan joq halǵa kelemiz. Bul suyıqlıqtıń *asa qızıwına* alıp keledi (bunday jaǵdayda suyıqlıq qaynaw temperaturasınan joqarı temperaturalarda da suyıqlıq bolıp qaladı). Asa kızıwdı boldırmaw ushın suyıqlıq

quyılған ıdısqı aldın-ala puw payda bolıwdıń oraylanın kirkizedi (tesiksheleri bar deneler, shiyshe kapıllıylardıń kesindileri h.t.b.)

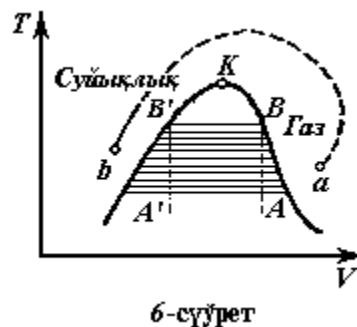
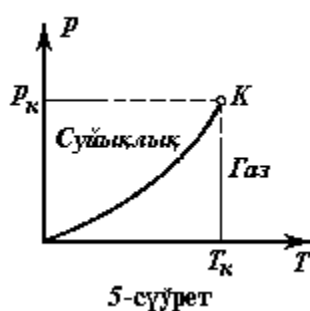
Asa qızdırılған suyıqlıq (yaǵnıy berilgen temperaturada puwǵa aylanıp ketiwi kerek bolǵan suyıqlıq) *metastabillik hallar* dep atalatuǵın hallarǵa mısıl boladı. Bul turaqlıǵı shekli bolǵan hal bolıp tabıladı. Abaylap sharayatlar dóretilgende belgili bir wakıtlar dawamında saqlanatuǵın bolsa da, bunday hallardıń teń salmaqlıǵı ańsat buzıladı hám zat basqa turaqlı bolǵan halǵa ótedi. Mısalı asa kızdırılған suyıqlıq oǵan puw payda bolıw orayları kiritilgende bir zamatta qaynap boladı.

Tap sol sıyaqlı qubılıslar keri process bolǵan puwdıń kondesaciyasında da baqlanadı. Bul jerde de fazalıq ótiwdiń júriwi ushın (puwǵa tiyip turǵan suyıqlıq bolmaǵan jaǵdaylarda) puwda *kendensaciyalanıw orayların* bar bolıwı talap etiledi. Bunday oraylar ornın sırttan endirilgen hár qıylı mayda kiritpeler iyeleydi (bul haqqında 99-paragrafta tolıǵıraq gáp etiledi). Usıǵan baylanıslı puwdıń *asa salqınlatılған* halı júzege keledi (yamasa asa toyınған puw dep te ataydı). Asa salqınlatılған halda basım berilgen temperaturadaǵı toyınған puwdıń serpimliliginen úlken boladı. Bunday haldı, mısalı, oǵada jaqsılap tazalanған puwdı adiabatalıq keńeytiwde alıw múmkin.

§ 69. Kritikalıq noqat

Temperatura jaqarılaǵan sayın toyınған puwdıń serpimliligi tez ósedi. Sonıń menen birge puwdıń tıǵızlıǵı da artadı hám suyıqlıqtıń tıǵızlıǵına jaqınlasadı. Bazı bir temperaturada puwdıń tıǵızlıǵı suyıqlıqtıń taǵızlıǵında boladı hám puw menen suyıqlıqtıń arasındǵı ayırma joǵaladı. Basqa sóz benen aytqanda r, T diagrammasındaǵı suyıqlıq penen gazdıń tań salmaqlıq iymekligi tamam boladı (5-súwrettegi K noqatı). Bunday noqat *kritikalıq noqat* dep ataladı. Kritikalıq noqattıń koordinataları zattıń *kritikalıq temperaturası* T_k menen *kritikalıq basımı* r_k nı anıqlaydı.

V, T diagrammada (hám soǵan sáykes V, r diagrammada) kritikalıq noqatka jaqınlaw temperatura joqarılaǵanda suyıqlıq penen puwdıń salıstırmalı kólemleriniń bir birine jaqınlasıwında kórinedi (yaǵnıy 2-súwrettegi shtrixlangan oblasttı shekleytuǵın eki iymekliktiń bir birine jaqınlasıwı). $T=T_k$ noqatında eki iymeklik bir biri menen qosıladı. Sonıń nátiyjesinde K noqatında maksimumǵa iye bolǵan tek bir úzliksiz iymeklikke iye bolamız (6-súwret). Bul noqat sol kritikalıq noqat bolıp tabıladı: onıń koordinataları kritikalıq temperatura T_k menen kritikalıq salıstırmalı kólem V_k bolıp tabıladı.



Suyıqlıq penen gazdıń qásiyetleriniń jaqınlasıwı menen olar arasındǵı q ótiw jıllılıǵı da kishireydi. Kritikalıq noqatta ótiw jıllılıǵı nolge aylanadı.

Kritikalıq noqattıń bar ekenligi zattıń suyıq hám gaz tárizli halları arasındǵı principiallıq ayırmashılıqtıń joq ekenligin anıq kórsetedi. Haqıyqatında da biz qarap

atırğan jaǵdaydaǵı ózleriniń tıǵızlıqları menen kúshli ayrılatuǵın eki haldıń (6-súwrettegi a hám b halları) tıǵızlıǵı joqarısın suyıq, al tıǵızlıǵı kemin gaz tárizli hal dep esaplaymız. Turaqlı temperaturada eki fazalıq oblast arqalı ótpey-aq a gazın qısıp b suyıqlıǵına aylandıra alamız. Biraq a menen b halları arasındaqı ótiwdi basqasha da ámelge asıra alamız: kólemdi kishireytiw menen birge dáslep temperaturanı kóteremiz, keyin túsiremiz, usınday jollar menen V, T tegisliginde kritikalıq noqattı joqarıdan aylanıp ótiwshi jol menen júremiz (6-súwrette bul jol punktir menen belgilengen). Bunday jaǵdayda haldıń sekirip ózgerisi orın almaydı, zat barlıq wakıtta da bir tekli bolıp kaladı hám biz zattıń gaz halınan suyıq halına qashan ótkenligin ayta almaymız.

V, T tegisliktegi diagrammadan ishinde bazı bir muǵdardaǵı suyıqlıq hám onıń ústinde onıń puwı bar jabıq ıdista (mısalı dánekerlengen nayda) neniń baqlanatuǵınlıǵın ańsat tabıwǵa boladı. Zattıń tolıq kólemi turaqlı bolǵanlıqtan biz V, T tegisligindegi vertikal sızıq boyınsha joqarıǵa karay qozǵalamız. Eger naydıń kólemi (zattıń berilgen muǵdarına sáykes keliwshi) kritikalıq kólemnen úlken bolatuǵın bolsa bul tuwrı (sızıq) kritikalıq noqattıń oń tárepinde jaylasadı (6-súwrettegi AV), qızdırw barısında puwǵa aylanıp bolman degenshe (V noqatında) suyıqlıqtıń muǵdarı kemeyedi. Bunday jaǵdayda suyıqlıq penen puwdıń arasındaqı shegara naydıń tómengi shetinde joǵaladı. Al naydıń kólemi kritikalıq kólemnen kishi bolsa (A' noqatı) qızdırw dawam etilgende suyıqlıqqa aylanıp bolǵansha (V' noqatında) puw kondensaciyanadı. Bunday jaǵdayda suyıqlıq penen puw arasındaqı shegara naydıń eń joqarǵı bóliminde joǵaladı. Naydıń kólemi kritikalıq kólemge teń bolǵan jaǵdayda shagara naydıń ishinde joǵaladı, bul joǵalıw kritikalıq temperatura T_k de orın aladı.

Bir katar zatlar ushın absolyut kritikalıq temperaturalar T_k , basımlar r_k hám tıǵızlıqlar ρ_k lerdiń mánislerin beremiz:

Zat	T_k, K	r_k, atm	$\rho_k, g/sm^3$
Suw	647,2	218,5	0,324
Spirt	516,6	63,1	0,28
Efir	467,0	35,5	0,26
Uglekisliy gaz, SO_2 .	304,2	73,0	0,46
Kislorod	154,4	49,7	0,43
Vodorod	33,2	12,8	0,031
Geliy (izotop Ne^4)	5,25	2,26	0,069
Geliy (izotop Ne^3)	3,33	1,15	0,041

Biz 52-paragrafta kristallıq denelerdiń ózleriniń anizotropiyası menen suyıqlıqlar jáne gazlerden principiallıq ayırmaǵa iye bolatuǵınlıǵın aytıp ótken edik. Sonlıqtan suyıqlıq penen gaz arasındaqı úzliksiz ótiwdey kristal menen suyıqlıq arasındaqı ótiwdiń úzliksiz júriwi múmkin emes. Bul jaǵdayda eki fazanıń kaysısınıń kristallıq, qaysısınıń suyıqlıq ekenligin anıq ayta alamız. Usınıń saldarınan eriw processı ushın kritikalıq noqattıń orın alıwı múmkin emes.

§ 70. Van-der-Vaals teńlemesi

Gazdıń tıǵızlıǵınıń artıwınıń barısında onıń qásiyetleri ideal gazdıń qásiyetlerinen ayrıla baslaydı hám aqır-ayaǵında gazdıń suyıqlıqqa kondensaciyası baslanadı. Bul

kubılıslar quramalı molekullıq tásirlesiwler menen baylanıslı hám bul tásirlesiwdi sanlıq jaqtan táriyiplewdiń múmkinshiligi joq. Sonlıqtan zatlardıń hal teńlemesin teoriyalıq jaqtan dál dúziw úlken qıyınshılıq penen ámelge asıwı múmkin. Biraq molekullıq tásirlesiwdiń tiykarǵı ózgesheliklerin esapqa alıp hal teńlemesin dúziwdi ápiwayılastırıwǵa boladı.

Biz 39-paragrafta molekullardıń tásirlesiwiniń xarakterin táriyiplegen edik. Kishi aralıqlardaǵı iyterisiw kúshleriniń tez artıwı (turpayı túrde aytqanda) molekullardıń belgili bir kólemge iye bolıwı menen baylanıslı (bunday kólemlerden kishi kólemlerge gazdıń kısılıwı múmkin emes). Tásirlesiwdiń ekinshi tiykarǵı qásiyeti úlken qashıqlıqlardaǵı tartısıwdıń orın alıwında bolıp tabıladı. Usı tartısıwdıń orın alıwınıń nátiyjesinde gaz suyıqlıqqa aylanadı.

Biz zattıń bir moli ushın hal teńlemesin jazıwdı gazdıń qısılıwshılıǵınıń shekelengenligin esapqa alıw menen baslaymız. Bul ushın ideal gaz teńlemesi $p = RT/V$ da V nı $V-b$ menen almasırmız kerek (molekullardıń ólshemlerin esapqa alatuǵın bazı bir oń mániske iye turaqlı b háripi arqalı belgilengen).

$$p = \frac{RT}{V - b}$$

teńlemesi kólemniń b dan kem bolmaytuǵınlıǵın kórsetedi, sebebi $V=b$ da basım sheksizlikke aylanadı.

Endi molekullar arasındaqı tartısıwdı esapqa alamız. Bul tartısıw gazdıń basımınıń kemeyiwine alıp keledi. Sebebi ıdıtıń diywalıńın qasında turǵan molekulaǵa basqa molekullar tárepinen ıdıtıń ishine karay baǵıtlangan kúsh tásir etedi. Turpayı túrde juwıqlaǵanda bul kúshtiń manisi gazdıń kólem birligindegi molekullar sanına (yaǵnıy gazdıń tıǵızlıǵına) proporcional boladı. Ekinshi tárepten basımniń ózi de usı sanǵa proporcional. Sonlıqtan molekullardıń bir birin tartısıwınıń aqıbetinen basımniń ulıwma kemeyiwi gazdıń tıǵızlıǵınıń kvadratına (yaǵnıy onıń kóleminiń kvadratına keri proporcional) tuwrı proporcional boladı. Usıǵan sáykes joqarıda basım ushın jazılǵan ańlatpadan a/V^2 túrindegi aǵzanı alıp taslawımız kerek (a arqalı molekullıq tartısıwdı táriyipleytuǵın bazı bir jańa turaqlı belgilengen). Solay etip

$$p = \frac{RT}{V - b} - \frac{a}{V^2}$$

teńlemesin alamız. Basqasha jazsaq

$$\left(p - \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT$$

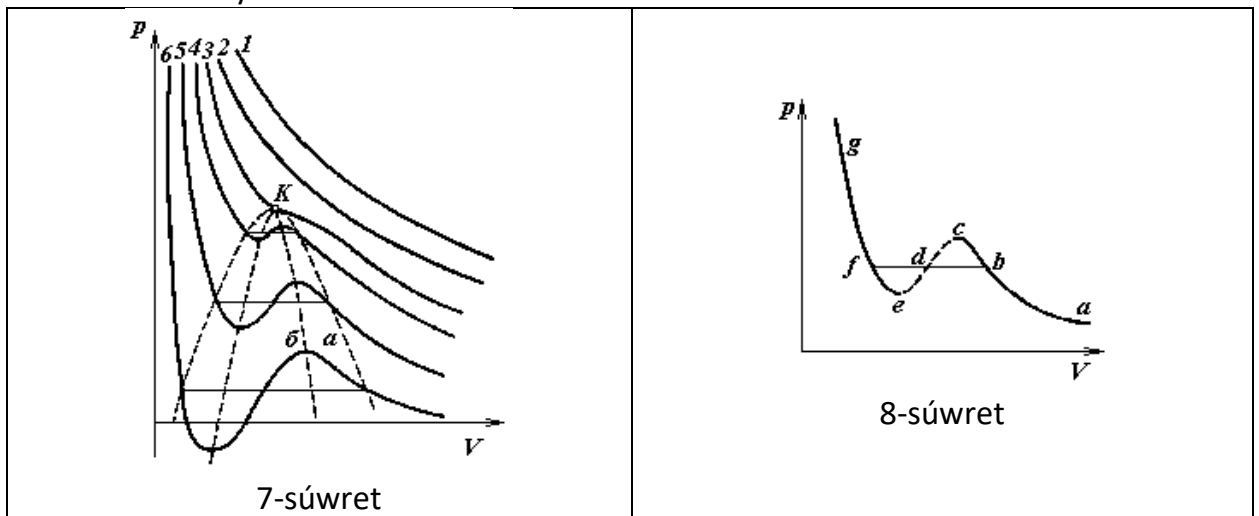
teńlemesine iye bolamız. Bul *Van-der-Vaals teńlemesi* dep atalatuǵın teńleme bolıp tabıladı. Gaz siyrekletilgen bolsa (úlken V kólemleri) a hám b shamaların esapqa almawǵa boladı. Bunday jaǵdayda ideal gaz halınıń teńlemesine qayıp kelemiz. Biz tómende úlken kısıwlar jaǵdayında da alınǵan teńlemeniniń qubılıslardıń xarakterin durıs táriyipleytuǵınlıǵın kóremiz.

Van-der-Vaals teńlemesi menen táriyiplenetuǵın gazdıń qásiyetlerin táriyiplew ushın bul teńlemeler járdeminde táriyiplenetuǵın izotermalardı – T niń berilgen mánislerindegi r niń V ǵa ǵárezziligininiń iymekliklerin qaraymız. Usınday maqsette teńlemenini bilayınsha kóshirip jazamız:

$$V^3 - \left(b + \frac{RT}{p}\right)V^2 + \frac{a}{p}V - \frac{ab}{p} = 0.$$

T menen r niń berilgen mánislerinde bul belgisiz V niń úshinshi dárejesine qarata teńleme bolıp tabıladı.

Úshinshi dárejeli teńlemeninń úsh koreniniń bolatuǵınlıǵı málim. Olardıń úshewi de bir waqıtta yamasa tek birewi haqıyqıy boladı (ekinshi jaǵdayda teńleme eki kompleksli túyinles korengede iye). Tek haqıyqıy hám oń mánisli korenler ǵana fizikalıq mániske iye bola aladı (sebebi kólem V barlıq waqıtta da oń hám haqıyqıy mániske iye). Biz qarap atırǵan jaǵdayda teńlemeninń teris mánisli korenlerge iye bolıwı pútkilley múmkin emes (r niń oń mánislerinde). Eger V teris mániske iye bolǵanda teńlemeninń barlıq aǵzaları birdey (teris) mániske iye bolǵan hám qosındı nolge teń bolar edi. Sonlıqtan temperatura menen basımnıń berilgen mánislerinde Van-der-Vaals teńlemesine kólemniń úsh hár qıylı yamasa tek bir mánisi sáykes keledi.



Ekinshi jaǵday (kólemniń tek bir mánisi bar jaǵday) tek jetkilikli dárejedegi joqarı temperaturalarda orın aladı. Sáykes izotermalar ideal gazdıń izotermalarınan formasınıń bir qansha mayısqańlıǵı menen ayrıladı hám monoton túrde tómengge túsetuǵın iymeklik bolıp qaladı (7-súwrettegi 1- hám 2-iymekler, bul súwrettegi iymekliklerdiń nomerleriniń ósiwi temperaturanıń tómenelewine sáykes keledi). Tómenirek temperaturalarda bolsa izotremalar maksimumǵa hám minimumǵa iye boladı (4-6 iymeklikler). Bul jaǵdayda basımnıń bir mánisine kólemniń hár qıylı úsh mánisi sáykes keledi (izotremanıń gorizontallıq tuwrı menen kesilisiwiniń úsh noqatı).

8-súwrette usınday izotermalardıń birewi keltirilgen. Endi usı izotermanıń hár qıylı uıastkalarınń qanday mániske iye bolatuǵınlıǵın anıqlaymız. Basımnıń kólemge ǵárezziligi ge hám sa uıastkalarında normal xarakterge iye (kólem kishireygende basım artadı). Tábiyiy emes awhalǵa es uıastkası sáykes keledi (bul uıastkada basımnıń úlkeyiwi kólemniń kishireyiwinı alıp keliwi kerek edi). Biraq oǵan qarama-qarsı awhal orın aladı. Bunday haldıń tábiyatta payda bolmaytuǵınlıǵın ańsat kóriwge boladı. Usınday qásiyetke iye zattı kóz aldımızǵa keltirip kóreyik. 64-paragrafta ǵáp etilgen flukuaciyanıń saldarınan usınday zat qanday da bir uıastka qısıldı dep kóz aldımızǵa keltireyik. Bunday jaǵdayda onıń basımı da kishireyedi, yaǵnıy qorshaǵan ortalıqtıń basımınan kishi bolıp qaladı. Bul bolsa óz gezeginde bunnan bılay júretuǵın qasılıwdı boldıradı. Sonlıqtan berilgen uıastka úlkeyiwshi tezlik penen qısılıwı kerek. Bul zattıń payda bolǵan halınıń pútkilley turaqsız bolatuǵınlıǵın bildiredi hám usıǵan baylanıslı haqıyqatta júzege kelmeydi.

Izotermadağı júzege keliwi múmkin emes es uýastkasınıń payda bolıwı kólem kem-kemnen ózgergende zattıń bir tekli ortalıq túrinde bolıp qalmaytuǵınlıǵın bildiredi. Usınıń aqıbetinde bazı bir momentte haldıń sekirmeli túrde ózgeriwi hám zattıń eki fazaǵa bóliniwiniń orın alıwı kerek. Basqa sóz benen aytqanda hakiyqıy izoterma abfg túrindegi sınıq sızıq túrinde bolıwı kerek. Onıń ab bólimi zattıń gaz tárizli halına, al fg bólimi suyıq halǵa, gorizontallıq bf tuwrı sızıqlı bólimi eki fazalıq halǵa saykes keledi. Bul uýastkada (berilgen temperaturada) belgili bir turaqlı basımda gaz suyıqlıqqa aylanadı [bf tuwrısınıń bcd hám def uýastkalarınıń maydanları birdey bolatuǵınday bolıp jaylasatuǵınlıǵın kórsetiwge boladı].

Izotermanıń bc hám ef uýastkaları metastabillik hallar bolǵan asa salqınlatılǵan puwǵa hám asa kızdırılǵan suyıqlıqqa sáykes keledi (68-paragraf). Endi biz puwdı asa salqınlatıw hám suyıqlıqtı asa kızdırıwdıń múmkin emes uýastkalarınıń bar ekenligin (s hám e uýastkaları menen súwretlengen) kóremiz. Temperatura joqarılaǵanda tuwrı sızıqlı uýastka kishireydi hám kritikalıq noqatta bir noqatqa jıynaladı (7-súwrettegi K noqatı). Usı noqat arqalı ótiwshi izoterma barlıq izotremalardı ekige ayıradı: 1- ham 2-monoton izotermalar, minimumları hám maksimumları bar izotermalar (4-6 izotermalar). Keyingi jaǵdaylarda zattıń eki fazaǵa bóliniwi orın aladı.

Izotremalardıń tuwrı sızıqlı uýastkasınıń bası menen ushın tutastırǵanda (7-súwrettegi a iymekligi) alınǵan iymeklik r, V diagrammasındaǵı suyıqlıq penen puwdıń teń salmaqlıq iymekligi bolıp tabıladı. Bul iymekliktiń maksimumı K kritikalıq noqat bolıp tabıladı. 8-súwrettegi s hám e sıyaqlı noqatlardı bir biri menen tutastırıp biz jańa iymeklik alamız (7-súwrettegi b iymekligi). Bul iymeklik fazalarǵa bólinbegen zat hátte metastabillik halda da tura almaytuǵın uýastkanı sheklep turadı.

Kritikalıq noqatta úsh noqat bir noqatqa kelip birigedi. Bul noqatta tuwrı sızıqlı uýastka Van-der-Vaals izotermasın kesip ótedi. Demek kritikalıq noqatta izotermaǵa túsirilgen urınba gorizontallıq baǵıtqa iye boladı hám sonlıqtan bul noqatta basımnan kólem boyınsha alınǵan tuwındı nolge teń boladı (turaqlı temperaturada ekenligin atap ótemiz):

$$\left(\frac{dp}{dV}\right)_T = 0.$$

Bul tuwındıǵa keri bolǵan shama zattıń qısılıwshılıǵı bolıp tabıladı. Sonlıqtan kritikalıq noqatta qısılıwshılıq sheksizlikke aylanadı dep juwmaq shıǵaramız.

Asa qızdırılǵan suyıqlıqqa sáykes keliwshi izotermanıń uýastkasınıń bólimi abscissa kósheriniń tómende de jaylasıwı múmkin (7-súwrettegi 6-izotremaday). Bul uýastka "sozılǵan" suyıqlıqtıń metastabillik halına sáykes keledi (bul haqqında 51-paragraftıń keyninde gáp etildi).

§ 71. Sáykes hallar nızamı

Kólemniń, temperaturanıń hám basımniń kritikalıq mánislerin Van-der-Vaals teńlemesine kiriwshi a hám b parametrleri menen baylanıstırıw múmkin.

Bunday maqsette $T=T_k$ hám $r=r_k$ de

$$V^3 - \left(b + \frac{RT_k}{p_k}\right)V^2 + \frac{a}{p_k}V - \frac{ab}{p_k} = 0.$$

Van-der-Vaals teńlemesiniń barlıq úsh koreni de birdey jáne V_k ǵa teń bolıwı kerek. Sonlıqtan jazılǵan teńleme

$$(V - V_k)^3 = V^3 - 3V^2V_k + 3VV_k^2 - V_k^3 = 0$$

teńlemesi menen birdey. Dárejeleri birdey V lardıń aldındaǵı koefficientlerdi salıstırıw úsh teńlikke alıp keledi:

$$b + \frac{RT_k}{p_k} = 3V_k, \quad \frac{a}{p_k} = 3V_k^2, \quad \frac{ab}{p_k} = V_k^3.$$

Bul V_k, r_k, T_k lar ushın jazılǵan teńlemelerdi sheshemiz hám bul bizge mınalardı beredi:

$$V = 3b, \quad p = \frac{a}{17b^2}, \quad T = \frac{8a}{27bR}.$$

Bul qatnaslar járdeminde Van-der-Vaals teńlemesin tómendegidey etip túrlendiriw múmkin. Bul teńlemege r, V, T ózgeriwshileriniń ornına olardıń kritikalıq mánislerine qatnasın kirgizemiz:

$$r^* = r/r_k, \quad T^* = T/T_k, \quad V^* = V/V_k$$

Bul shamalar keltirilgen basım, temperatura hám kólem dep ataladı. Ápiwayı túrlendiriwlerden keyin Van-der-Vaals teńlemesiniń mına túrge iye bolatuǵınlıǵın ańsat kórsetiwge boladı:

$$\left(p^* + \frac{3}{V^{*2}}\right)(3V^* - 1) = 8T^*.$$

Bul teńlemenin dál sırtqı túri bizdi qızıqtırmaydı. Onıń áhmiyeti sonnan ibarat, sońǵı teńlemege gazdıń tábiyatına baylanıslı bolǵan a jáne b shamaları kirmeydi. Basqa sóz benen aytkanda eger gazdıń basımınıń, kóleminiń hám temperaturasınıń ólshemi retinde olardıń kritikalıq mánislerin alatuǵın bolsaq hal teńlemesi barlıq zatlar ushın birdey túrge enedi. Bul jaǵday *sáykes hallar nızamı* dep ataladı.

Bul nızamdı hal teńlemesi ushın qollanatuǵın bolsaq, onda ol hal teńlemesi menen baylanısqa barlıq qubılıslar ushın (sonıń ishinde gaz hám suıqlıq arasındaǵı ótiwge de) jaramlı boladı. Mısalı

$$\frac{p}{p_k} = f\left(\frac{T}{T_k}\right)$$

túrindegi teńleme menen táriyiplenetuǵın toyingan puwdıń serpimliliginiń temperaturaga ǵárezziligi táriyipleytuǵın sáykes keltirilgen shamalardı baylanıstıratuǵın teńleme universallıq xarakterge iye.

Tap sol sıyaqlı juwmaqtı puwlanıw jıllılıǵı q ushın da islew múmkin. Bunday jaǵdayda jıllılıqtıń ólshem birligi sonday bolǵan shamaǵa qatnasın qaraw kerek (energiya/mol). Bunday shama retinde RT_k nı alıw múmkin. Sáykes hallar nızamı boyınsha q/RT_k qatnası barlıq zatlar ushın birdey keltirilgen temperaturanıń funkciyası bolıwı kerek:

$$\frac{q}{RT_k} = F\left(\frac{T}{T_k}\right).$$

Eksperimentlerdiń nátiyjelerine muwapıq kritikalıq temperaturalardan tómengi temperaturalarda bul funkciyanıń shama menen 10 ǵa teń turaqlı shekke umtılatuǵının atap ótemiz.

Sáykes hallar nızamınıń juwıq xarakterge iye ekenligin atap ótiwimiz kerek. Biraq soǵan karamastan onıń járdeminde paydalanıw múmkin bolǵan nátiyjelerdiń shamaların alıw múmkin.

Sáykes hallar nızamın biz Van-der-Vaals teńlemesi járdeminde alǵan bolsaq ta, nızam bul teńlemege karaǵanda ádewir dál. Sebebi nızam hal teńlemesiniń ayqın túrine baylanıslı emes, al Van-der-Vaals teńlemesine tek eki a hám b shamaların bolıwınıń

nátiyjesi. Eki parametri bar basqa hal teńlemesi de saykes hallar nızamına alıp kelgen bolar edi.

§ 72. Úshlik noqat

Biz eki fazanıń teń salmaqlıqta turıwı temperatura menen basım arasında anıq qatnas júzege kelgende ǵana ámelge asatuǵınlıǵın kórdik. Bul ǵárezlilik r, T tegisligindegi belgili bir iymeklik penen táriyiplenedi. Bir zattıń úsh fazasınıń bir waqıtta bir biri menen pútin sızıq boyınsha teń salmaqlıqta tura almaytuǵınlıǵı óz-ózinen túsinikli. Bunday teń salmaqlıq r, T diagrammasındaǵı anıq bir noqatta júzege keledi (yaǵnıy basım menen temperaturanıń belgili bir mánislerinde). Bul úsh fazanıń hár ekewiniń teń salmaqlıqta turıw iymekligi kesken noqat bolıp tabıladı. Úsh fazanıń teń salmaqlıqta turıw noqatı *úshlik noqat* dep ataladı. Mısalı suw ushın muzdıń, suwdıń hám puwdıń bir waqıtta bolıwı 4,62 mm sın.baǵ. basımında hám $+0,01^{\circ}\text{S}$ da múmkin.

Úsh fazanıń bir biri menen bir wakıtta teń salmaqlıqta tek bir noqatta tura alatuǵın bolǵanlıqtan tórt yamasa tórtten zıyat fazalar bir biri menen hesh wakıtta teń salmaqlıqta tura almaydı.

Úshlik noqatqa temperaturanıń anıq mánisi sáykes kelgenlikten, bul jaǵday temperaturalıq shkalanıń standart noqatların saylap alıwǵa múmkinshilik beredi. Bunday saylap alıwda belgili bir basımdı uslap turıw zárúrligi bolmaǵanlıqtan bazı bir kemshiliklerge iye emes (mısalı atmosferalıq basımdaǵı muzdıń eriw temperaturasınıń standart noqatın saylap alǵandaǵıday emes).

Házirgi waqıtları qabıl etilgen absolyut gradustıń anıqlanıwı usınday saylap alıwǵa tiykarlanǵan: suwdıń úshlik noqatı dál 273,16 K dep qabıl etilgen. Biraq temperatura menen basımdı ólshewdiń házirgi waqıtlardaǵı dálliginde muzdıń eriw temperaturası 273,15 K dep esaplanǵanǵa tuwrı keledi.

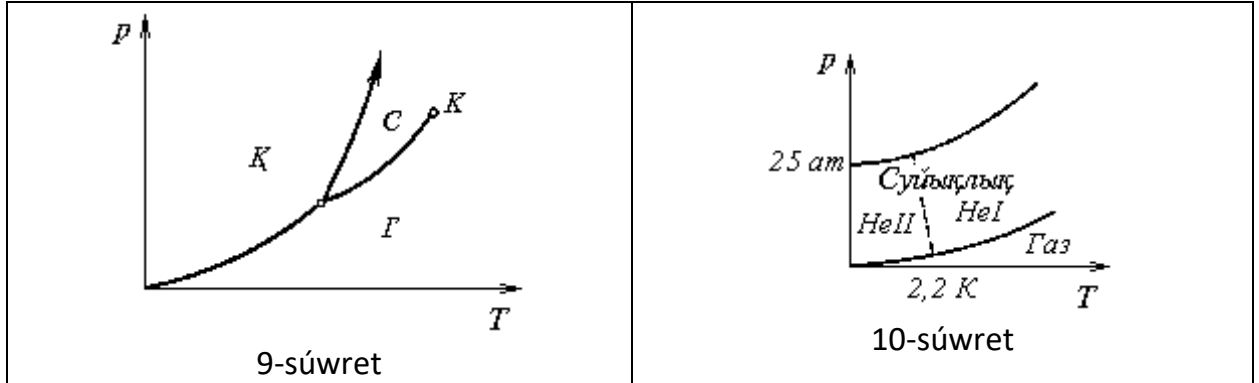
9-súwrette úsh fazaǵa (qattı, suyıq hám gaz tárizli) iye zattıń fazalıq diagrammasınıń sxemalıq túri keltirilgen. Bul qattı, suyıq hám gaz tárizli úsh fazaǵa diagrammadaǵı Q, S hám G háripleri menen belgilengen uıastkalar sáykes keledi. Al bólip turıwshı sızıqlar bolsa sáykes eki fazanıń teń salmaqlıq iymeklikleri bolıp tabıladı. Eriw iymekliginiń qıyalıǵı ádette deneler erigendegi keńeyiwge sáykes keletuǵında etip kórsetilgen (67-paragraftı karańız). Eriw zattıń qısılıwı menen júretuǵın kóp emes jaǵdaylarda iymeklik basqa (qarama-karsı) tárepke qaray qıyalanǵan.

Fazalıq diagrammadan qızǵanda qattı denelerdiń gazge aylanıwı ushın suyıq haldan ótiwiniń shárt emes ekenligi kórinip tur. Úshlik noqattan kishi basımlarda qızdırılǵanda qattı deneler tikkeley gazge aylanadı. Bunday fazalıq ótiw *sublimaciya* (yamasa *vozgonka*) dep ataladı. Mısalı qattı kómir kislotası atmosferalıq basımda sublimaciyaǵa ushıraydı. Sebebi onıń úshlik noqatına 5,1 atm basım (hám $-56,6^{\circ}\text{S}$ temperatura) sáykes keledi.

Suyıqlıq penen gazdıń teń salmaqlıq iymekligi kritikalıq noqatta tamam boladı (9-súwrettegi K noqatı). Suyıq hám qattı fazalar arasındaǵı ótiw ushın kritikalıq noqattıń bar bolıwı múmkin emes (bul 69-paragrafta atap ayıldı). Sonlıqtan eriw iymekligi bir noqatta toqtamaydı, al sheksiz dawam ete beredi.

Qattı deneniń gaz benen teń salmaqlıq iymekligi koordinata basına qaray ketedi (yaǵnıy temperaturanıń absolyut nolinde zatlar qálegen basımda qattı halda boladı). Bul nátiyje klassikalıq mexanikaǵa tiykarlanǵan temperatura haqqında kóz-qarastıń

tiykarında jatadı. Usınday kóz-qaras boyınsha absolyut nolde atomlardıń kinetikalıq energiyaları nolge aylanadı (yaǵnıy atomlardıń qozǵalıǵı toqtaydı). Deneniń teń salmaqlıq halı atomlardıń jaylasıwlarına sáykes keliwshi tásirlesiw energiyası minimum bolatuǵın jaǵday bolıp tabıladı. Bunday jaylasıwlar tártiplesken bolıwı hám bazı bir kenisliklik pánjereni payda etiwı kerek. Usı jaǵday barlıq denelerdiń absolyut nolde kristallıq bolıwınıń kerekligin ańǵartadı.



Biraq tábiyatta bir jaǵday usı qádege baǵınbaydı: geliy barlıq temperaturalarda da (absolyut nolge shekem salqınlatqanda da) suyıq bolıp qaladı. Geliydiń fazalıq diagramması (Ne^4 izotopı ushın) 10-súwrette keltirilgen (diagrammadaǵı punktir sıziqtıń mánisi 74-paragrafta ayıladı). Bul jerde puwlanıw menen eriw iymeklikleriniń hesh jerde de kesilispeytuǵınlıǵın kóremiz (yaǵnıy úshlik noqat joq). Eriw iymekligi ordinata kósherin $r=25 \text{ atm}$ da kesedi. Bul geliydi qattı halǵa ótkeriw ushın temperaturanı absolyut nolge jetkeriwdin jetkilikli emes ekenligin, sonıń menen birge basımdı da keminde 25 atm ǵa jetkeriwdiń zárúrligin bildiredi.

Joqarıda ayılǵanlardan geliydiń usınday qásiyetiniń klassikalıq kóz-karaslar menen túsindiriwdiń múmkin emes ekenligi kelip shıǵadı. Haqıyqatında bul kvantlıq qubılıslar menen baylanıslı. 50-paragrfta ayılǵanınday kvant mexanikası boyınsha atomlardıń qozǵalısları absolyut nolde de toqtamaydı. Usıǵan baylanıslı joqarıda biz kelgen absolyut nol temperaturadaǵı barlıq zatlardıń qattı halǵa aylanıwınıń zárúrligi joǵaladı. Zatlardıń kvantlıq qásiyetleri kópshilik jaǵdaylarda tek tómengi temperaturalarda kórinedi. Bunday jaǵdaylarda kvantlıq qásiyetler jıllılıq qozǵalısları tárepinen jasırınıp qala almaydı. Geliyden basqa barlıq deneler bunday qásiyetler kórinbesten burın qattı halǵa ótedi. Tek geliy ǵana "kvantlıq suyıqlıq" bolıwǵa úlgeredi. Sonlıqtan onıń qattı halǵa ótiwi shárt emes. Bul suyıqlıqtıń ádettegidey emes basqa da qásiyetleri haqqında 124-paragrafta jáne de ayıladı.

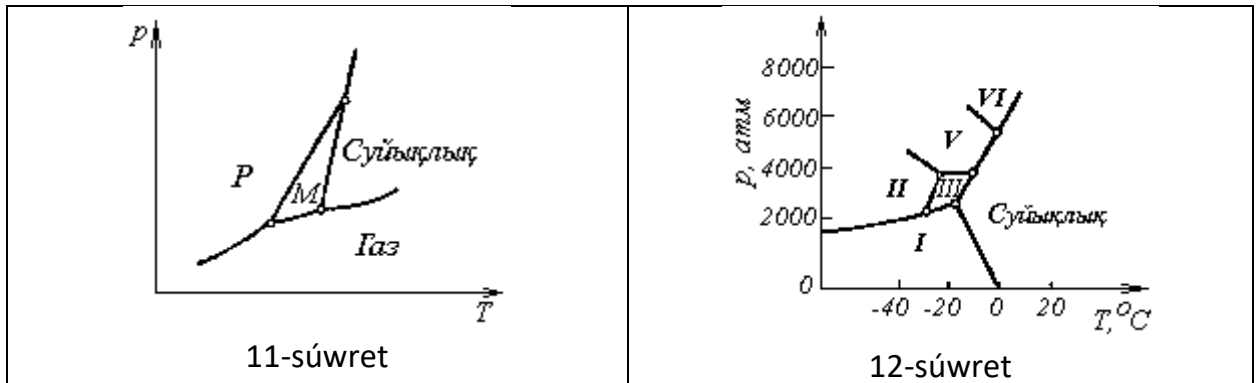
§ 73. Kristallıq modifikaciýalar

Qattı hal oblastınıń barlıǵı ádette bir faza bolıp tabılmaydı. Hár qıylı basımlar menen temperaturalarda zat hár qıylı kristallıq hallarda tura aladı. Bul kristallıq hallardıń hár biri óziniń kristallıq qurılısına iye boladı. Bul hár qıylı hallardıń ózleri zattıń hár qıylı fazaları bolıp tabıladı. Olardı *kristallıq modifikaciýalar* dep ataydı, al zattıń hár qıylı modifikaciýalarǵa iye bolıw qásiyeti haqqında aytqanda *polimorfizm* sıpatında aytadı.

Polimorfizm júdá keń tarqalǵan. Derlik barlıq zatlar (elementler, birikpeler) bir neshe modifikaciýaǵa iye boladı (elementler jaǵdayında bul modifikaciýalar *allotropiyalıq*

modifikaciýalar dep ataladı). Eñ belgili mısallar retinde uglerodtıń (grafit hám almaz), kúkırttıń (rombalıq hám monoklinlik kristallar payda etiwshi), kremnezemniń (kvarc, tridimit, kristobalit sıyaqlı hár kıylı minerallar) modifikaciýaların atap ótiwge boladı.

Hár kıylı fazalar sıyaqlı har kıylı modifikaciýalar da bir biri menen r, T diagrammadaǵı belgili bir sıyıqlar boyınsha teń salmaqlıqta tura aladı. Al bir modifikaciyanıń ekinshisine ótiwi (bul ótiw ádette *polimorfliq aylanıs* dep te ataladı) jıllılıqtıń jutılıwı yamasa shıǵarılıwı menen ámelge asadı. Mısalı α -temir dep atalıwshı (kólemde oraylasqan kublıq pánjerege iye) temirdiń γ -temirge (kublıq qaptalda oraylasqan pánjere) aylanıwı atmosferalıq basımda 910°S da shama menen 1600 dj/mol muǵdarındaǵı jıllılıqtı jutıw menen ámelge asadı.



11-súwrette mısal retinde kúkırttıń fazalıq diagramması sxema túrinde keltirilgen. R hám M háripleri járdeminde eki qattı fazanıń (rombalıq ádettegi sarı kúkırt hám monoklinlik) ornıqlı jasaytuǵın oblastları kórsetilgen. Bul jerde biz úsh úshlik noqattıń bar ekenligin kóremiz.

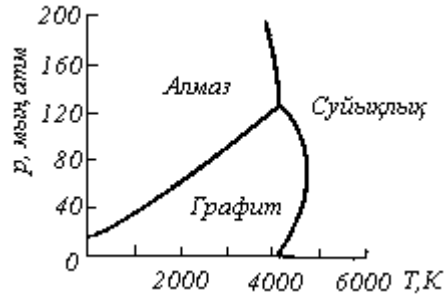
12-súwrette suwdıń hal diagramması keltirilgen. Muzdıń bes kristallıq modifikaciýası I, II, III, V, VI sanları menen belgilengen. Ádettegi muzǵa I oblastı sáykes keledi, basqa modifikaciýalar mırılǵan atmosfera basımında alınadı. Puwdıń oblastı sonshama kishi basımlarǵa sáykes kelgenlikten súwrette kórsetilmey qalǵan.

Hár kıylı kristallıq modifikaciýalar arasındaǵı fazalıq ótiwler ushın metastabillik hallardıń ańsat payda bolıwı xarakterli. Puw menen sıyıqlıqtıń asa qızıwı yamasa asa salqınlawın ámelge asırıw ushın tájiriybeniń júdá puqtalıq penen ótkeriliwi shárt. Al qattı halda bolsa fazalıq ótiwdi "keshiktiriw" hám kristallıq modifikaciýalardı olar ushın sáykes kelmeytuǵın sharayatlarda uslap turıw ańsat ámelge asırıladı. Bul jaǵdaydı túsiniw ańsat: kristallardıǵı atomlardıń tıǵız jaylasıwı hám olardıń jıllılıq qozǵalıslarınıń kishi terbelisler menen shekleniwı pánjereniń bir modifikaciýadan ekenishisine ótiwine tosqınlıq jasaydı. Temperatura kóterilgende jıllılıq terbelisleri kúsheyip, bunday ótiwlerdi tezlestiredi.

Usı ayılǵanlarǵa baylanıslı qattı deneniń polikristallıq kurılısınıń da (monokristallıq qurılısqa salıstırǵanda) turaqlı emes (metastabillik) bolıp tabılatuǵınlıǵın eske alıp ketemiz. Sonlıqtan qızdıırǵanda mayda kristallıq dene kopshilik jaǵdaylarda bir kristallardıń ekinshi kristallar esabınan ósiwiniń saldarınan iri kristallıq denegе aylanadı (bul qubılıstı *rekristallizaciya* dep ataydı). Deneniń amorflik halı da metastabillik bolıp esaplana aladı; júdá eski shiysheleardıń gúńgirtleniwı ózinen-ózi júretuǵın kristallanıwdıń aqıbeti bolıp tabıladı.

Eski fazada jańa fazanıń kishi oblastları bar bolsa (bunday oblastlar jańa fazanıń zarodışları bolıp esaplanadı) polimorfliq fazalıq ótiw ańsatlasadı. Bul jaǵdaydı

demonstratsiyalawshı misal retinde ádettegi (tetragonallıq qurılısqa iye) aq qalayınıń untaq sur qalayıǵa (kublıq pánjerege iye modifikatsiya) aylanıwın atap ótiwge boladı. Atmosfera basımında bul eki modifikatsiya 18°S da teń salmaqılıqta turadı. Bul temperaturadan joqarı temperaturalarda aq, al kishi temperaturalarda sur qalayı ornıqlı. Biraq aq kalayı suwıqta da jasay aladı, al oǵan sur modifikatsiyanıń kishkene kishi dáneshesi qosılsa dárhál sur qalayıǵa aylanıp untalıp ketedi.



13-súwret

Pánjereniń kaytadan qurılıwı tómengi temperaturalarda qıyınshılıq penen júretuǵın bolǵanlıqtan bul jaǵday tómengi temperaturalarda ornıqlı faza bolıp tabılmaıtuǵın modifikatsiyalardıń jasawına alıp keledi. Bunday modifikatsiyalar zatlardıń ornıqlı halların táriyipleytuǵın fazalıq diagrammada pútkilley bolmaıdı. Mısalı bunday jaǵday polattıń *zakalka* processinde ayqın kórinedi. γ -temirdegi uglerodtıń qattı eritpesi (austenit dep atalıwshı) uglerodtıń muǵdarına baylanıslı tek $700-900^{\circ}\text{S}$ temperaturalarda ornıqlı. Al tóménirek temperaturalarda austenittiń ıdırawı kerek. Biraq austenitti tez salqınlatısa (bul *zakalka* dep ataladı) metallda oǵada qattı bolǵan jańa fazanıń iyne tárizli kristalları payda boladı (bul *martensit* dep ataladı hám tetragonallıq pánjerege iye). Bul "aralıqlıq" faza barlıq waqıtta da metastabil bolıp áste-aqırınlıq penen $250-300^{\circ}\text{S}$ ǵa shekem qızdırganda ıdıraydı (bul *otpusk* dep ataladı).

13-súwrette uglerodtıń fazalıq diagramması keltirilgen (gaz tárizli faza súwrette qabil etilgen masshtablarda sezilmeytuǵın kishi basımlar oblastında jatadı). Bul súwrette ádettegi basımlar menen temperaturalarda grafittiń ornıqlı modifikatsiya ekenligi kórinip tur. Biraq usıǵan qaramastan grafit te, almaz da ádettegi sharayatlarda ornıqlı kristallar sıpatında jasaydı. Bul usı eki kristaldıń qurılıslarınıń ayırmasınıń úlkenliginde bolıp tabıladı. Sonlıqtan grafittiń almazǵa yamasa almazdıń grafitke aylanıwı ushın kristallıq qurılıs úlken kayta qurıwǵa ushırawı kerek (almazdın tıǵızlıǵınıń grafittiń tıǵızlıǵınan 1,5 ese úlken ekenligi xarakterli). Biraq joqarı temperaturalarǵa qızdarǵanda almaz grafitke aylanadı: 1700 K dan joqarı temperaturalarda almaz untaq grafitke tez aylanadı (janıp ketpewi ushın kızdırıwdı vakuumde ámelge asıradı). Diagrammadan grafittiń almazǵa aylanıwınıń tek júdá úlken basımlarda ámelge asıwınıń múmkin ekenligi kórinip tur. Almazdıń ornıqlılıq oblastı $10\,000\text{ atm}$ nan joqarı basımlardı jatadı. Sonıń menen birge processtiń tez júriwi ushın joqarı temperaturalar da kerek. Haqıyqatında grafittiń almazǵa aylanıw processı $50\,000-100\,000\text{ atm}$ basımlarda hám $1500-3000\text{ K}$ temperaturalarda júredi. Kala berse usı processtiń júriwi ushın metall katalizator da kerek boladı. Grafittiń ózinen-ózi almazǵa aylanıwı shama menen $130\,000\text{ atm}$ basımda hám 3300 K den joqarı temperaturalarda baqlanǵan. Bunday jaǵdayda biz grafittiń tek ǵana ornıqlı oblastınıń sırtında emes, al metastabilitik oblastınıń da sırtında (yaǵnıy grafittiń pútkilley ornıqlı emes oblastında) turamız.

§ 74. Ekinshi áwlad fazalıq ótiwleri

Biz joqarıda hár qıylı simmetriyaǵa iye fazalar arasındaqı ótiwdiń suıqlıqlar menen gazlerdeǵıdey úzliksiz júzege keliwiniń múmkin emes ekenligin kórdik. Hár bir halda dene birinshi yamasa ekinshi simmetriyaǵa iye bolıp, biz barlıq waqıtta da onıń qaysı fazada ekenligin ayta alamız.

Hár qıylı kristallıq modifikaciýalar arasındaqı ótiw ádette fazalıq ótiw menen júredi. Fazalıq ótiw waqtında kristallıq pánjereniń sekirmeli qaytadan dúziliwi orın aladı hám deneniń halı da sekirmeli ózgeredi. Biraq usınday sekirmeli ótiwler menen bir qatar simmetriyanıń ózgeriwi menen júretuǵın basqa tiptegi ótiwler de orın aladı.

Denelerdiń kristallıq strukturasınıń detallarına qatnası boyınsha bunday ótiwlerdiń reallıq mısalları salıstırmalı quramalı. Sonlıqtan bul ótiwlerdiń tábiyatın túsindiriw ushın qıyalımızda mısıl keltiremiz.

Tómengi temperaturalarda tetragonallıq qurılısqa iye bolǵan deneni kóz aldımızǵa keltireyik. Bunday dene ultanı kvadrat bolǵan tuwrı múyeshli parallelopipedlerden turadı. Kvadrattıń tárepi a hám biyikligi s arasındaqı ayırma úlken emes dep esaplaymız (yaǵnıy kristall tetragonallıq bolsa da onıń pánjeresi kublıq pánjerege jaqın). Jáne jıllılıq keńeyiwi barısında a kabırǵası s kabırǵasınan tezirek úlkeyetuǵın bolsın. Bunday jaǵdaylarda temperaturanıń ósiwi menen elementar parallelopipedtiń tárepleriniń uzınlıqları bir birine jaqınlaydı hám belgili bir temperaturada birdey bolıp qaladı. Qızdıruwdı dawam etsek barlıq úsh qabırǵa birdey bolıp uzaradı hám óz-ara teń bolıp kaladı dep esaplaymız. $a=s$ teńligi orınlanıwdan pánjereniń simmetriyası dárxál ózgeredi hám tetragonallıqtan kublıqqa aylanadı. Bunday jaǵdayda biz zattıń basqa modifikaciýasın alamız.

Biz kórgen mısalda deneniń halınıń sekirmeli ózgeriwi orın almaydı. Kristaldaqı atomlardıń orınları úzliksiz ózgeredi. Biraq kublıq simmetriyaǵa iye pánjeredegi atomnıń qálegen kishi aralıqqa jılıswı (temperatura keri baǵıtta ózgergende) pánjereniń simmetriyasınıń ózgeriwi ushın tolıq jetkilikli. Pánjereniń barlıq úsh kabırǵası óz-ara teń bolsa pánjere kublıq bolıp qaladı. Biraq a menen s arasındaqı oǵada kishi ayırmanıń payda bolıwı pánjereni tetragonal pánjerege aylandıradı.

Usınday jollar menen bir kristallıq modifikaciyanıń ekinshi modifikaciyaǵa ótiwi *ekinshi áwlad fazalıq* ótiwi dep ataladı. Al ádettegi fazalıq ótiwler *birinshi áwlad fazalıq* ótiwleri dep ataladı².

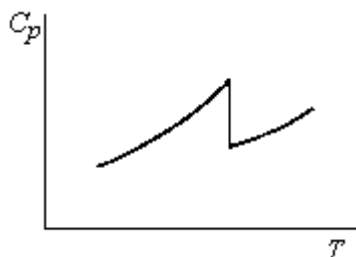
Solay etip ekinshi áwlad fazalıq ótiwlerde deneniń halı úzliksiz ózgeredi eken hám usı kóz-qarasta ekinshi áwlad fazalıq ótiwlerin úzliksiz dep aytamız. Biraq kristaldıń simmetriyası sekirmeli ózgeredi hám usıǵan baylanıslı kristaldıń kaysı fazaǵa tiyisli ekenligin barlıq waqıtta da ayta alamız. Birinshi áwlad fazalıq ótiwi noqatında dene hár kiyli eki hallardı teń salmaqlıqta tura aladı, al ekinshi áwlad fazalıq ótiwi noqatında eki fazanıń halları birdey boladı.

Ekinshi áwlad fazalıq ótiwinde haldıń ózgerisiniń sekiriwiniń orın almawı deneniń jıllılıq halın xarakterlewshi shamalardıń da sekirmeli ózgeriwin boldırmaydı (kólemi, ishki

² Joqarıda táriyiplengen mısıl tolıǵı menen qıyalımızdaǵı mısıl emes. Usınday ózgerislerge uqsas ózgerisler bariy titanatı (BaTiO_3) kristallında orın aladı. Ójire temperaturalarında onıń pánjeresi tetragonallıq kurılısqa iye. a hám s lar bir birinen 1 % ke ayrıladı. Temperatura joqarılaǵanda a nıń uzınlıǵı artadı, al s kishireyedi. 120°S da kublıq modifikaciyaǵa fazalıq ótiw baqlanadı. Biraq real jaǵdayda ótiw noqatında a menen s bári bir sekirmeli ózgeredi. Sonlıqtan ótiw birinshi áwlad fazalıq ótiwi bolıp tabıladı.

energiyası, jillılıq funkciyası h.t.b.). Usınıń saldarınan bunday ótiwde jillılıqtıń shıǵarılıwı yamasa jutılıwı bolmaydı.

Usı ayılǵanlar menen bir katarda ótiw noqatında sol shamalardıń temperaturaǵa ǵárezliligi sekirmeli ózgeredi. Joqarıda keltirilgen mısalda eger pánjereniń kóleminiń ulıwmalıq ózgerisi (kristall kublıq simmetriyaǵa iye bolǵanda) yamasa qızdırılǵanda qutıshalardıń forması deformaciyalanatuǵın bolǵanda (tetragonallıq simmetriyada qutıshalardıń biyikligi menen ultanınıń tárepiniń hár qıylı bolıp ózgerisi) kristaldıń jillılıqta keneyiw hár qıylı boladı. Tap sol sıyaqlı usınday sharayatlardaǵı birdey qızdırıw ushın zárúr bolǵan jillılıq muǵdarı da hár qıylı boladı.



14-súwret.

Bul ayılǵanlardıń barlıǵı da ekinshi áwlad fazalıq ótiwi noqatında deneniń jillılıq karakteristikalarınan alınǵan tuwındılardıń sekirmeli ózgeretuǵınlıǵın bildiredi: $\left(\frac{dV}{dT}\right)_p$ tuwındısı, yaǵnıy deneniń jillılıqta keńeyiw koefficienti, $\left(\frac{dW}{dT}\right)_p$ tuwındısı, yaǵnıy deneniń jillılıq sıyımlıǵı S_r sekirmeli ózgeredi h.t.b.

Usı sekiriwlerdiń bar ekenligi jillılıq ólshewlerinde kórinetuǵın ekinshi áwlad fazalıq ótiwleriniń xarakterli qásiyetlerinen bolıp tabıladı. 14-súwrette jillılıq sıyımlıǵınıń temperaturaǵa ǵárezliligi kóp ushırasatuǵın mısıl retinde keltirilgen: jillılıq sıyımlıǵınıń kem-kemnen úziksiz túrdegi ósiwi sekiriw menen bolatuǵın kishireyiw menen úziliske túsedı hám bunnan keyin jillılıq sıyımlıǵı qaytadan óse baslaydı.

Ekinshi áwlad fazalıq ótiwlerinde jillılıq shamalarınan basım boyınsha alınǵan tuwındılar da sekirmeli ózgeredi. Mısalı deneniń kısılgıshlıǵı $\left(\frac{dV}{dp}\right)_T$ tuwındısı da sekirip ózgeredi.

Kewlimizdegi ekinshi áwlad fazalıq ótiwine qayta kelemiz hám bunday ótiwdegi simmetriyanıń ózgeriwiniń tómendegidey qásiyetin atap ótemiz: kublıq modifikaciyanıń pánjeresi tetragonallıq modifikaciyanıń barlıq simmetriya elementlerine, sonıń menen birge basqa da simmetriya elementlerine iye boladı. Bunday mániste birewiniń simmetriyası joqarı bolǵan fazadan simmetriyası tómén bolǵan fazaǵa ótedi dep ayta alamız. Haqıyqatında bul qásiyet ulıwmalıq xarakterge iye bolıp, ekinshi áwlad fazalıq ótiwleriniń barlıǵına da tiyisli.

Bul jaǵday ekinshi áwlad fazalıq ótiwleri ushın shek te qoyadı (haqıyqatında tek jalǵız shek emes). Mısalı kublıq hám geksagonallıq sistemalar arasındaqı ótiwdiń bolıwı múmkin emes: bul simmetriyalardıń birewiniń ekinshisinen úlkenligi haqqında hesh nárese aytıw mumkin emes (birinshisinede ekinshisinde joq 4-tártipli simmetriya kósheri bar, biraq 6-tártipli simmetriya kósherine iye emes).

Kristal menen suyuqlıq arasında ekinshi tártipli fazalıq ótiwiniń múmkin emes ekenligin de kórsetiw múmkin.

Ekinshi áwlad fazalıq ótiwindegi jıllılıq sıyımlıǵınıń ózgeriw baǵıtı simmetriyanıń ózgeriw baǵıtı menen baylanıslı: jıllılıq sıyımlıǵı tómén simmetriyalı fazadan joqarı simmetriyalı fazaǵa ótkende kishireydi. Kópshilik jaǵdaylarda joqarı simmetriyalı faza joqarı temperaturalı faza bolıp tabıladı hám bunday jaǵdayda jıllılıq sıyımlıǵınıń ózgerisi 14-súwrette kórsetilgendeı túrge iye boladı. Biraq fazalardıń bunday temperaturalıq izbeizliginiń orın alıwı shárt emes. Mısalı segnet duzı $[\text{NaK}(\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6) \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$ eki fazalıq ótiw noqatına iye (-18°S hám 23°S temperaturalarda). Usı noqatlar ishinde bul kristal monoklinik sistemaǵa kiredi, al usı noqatlardıń sırtında segnet duzı rombalıq kristal bolıp tabıladı. 23°S daǵı temperatura jokarılaǵandaǵı fazalıq ótiw simmetriyanıń joqarılawı menen, biraq tómengi noqat arqalı ótiw simmetriyanıń tap sonday tóménlewı menen baylanıslı.

Biz joqarıda ádettegi fazalıq ótiwlerdiń asa kızıdıw yamasa asa salkınlatıw menen júretuǵınlıǵın ayttıq. Bul bir faza ornıqlı sharayatlarda ekinshi fazanıń metastabil túrde jasawınıń dawam etiwine kórinedi. Bul qubılıslardıń tábiyatı jańa faza ósetuǵın oraylardıń zárúrliginde bolıp tabıladı. Ekinshi áwlad fazalıq ótiwlerinde bolsa bunday zárúrlilik joǵaladı, bunday ótiwde bir faza ekinshisine úzliksiz túrde tutası menen ótedi. Bul joqarıda keltirilgen misalda ayqın kórinedi: bunda ótiw jıllılıq keneyiwindegi atomlardıń jalısıwlarınıń xarakteriniń ózgeriwine alıp kelindi.

Ekinshi áwlad fazalıq ótiwleri tek ǵana kristallıq modifikaciýalar arasındaǵı ótiwler menen tawıslımaydı. Biraq bunday ótiw barlıq wakıtta da hal úzliksiz túrde ózgergende denede qanday da bir qásiyetlerdiń payda bolıwı menen baylanıslı. Bul simmetriyanıń qanday da baska bir qásiyeti bolıwı múmkin (zattıń magnitlik qásiyetleri menen baylanıslı bolǵan), sonın menen birge bul asa ótkizgishliktiń (elektrlik qarsılıqtıń joǵalıwı) payda bolıwı bolıp ta tabıladı.

Eń aqırında suyıq geliydegi 2,2 K degi ózine tán ekinshi áwlad fazalıq ótiwdi atap ótemiz. Bul ótiwde suyuqlıq suyuqlıq bolıp qaladı, biraq pútkilley baska qásiyetlerge iye boladı (124-paragraftı karańız). 10-súwrette keltirilgen geliydiń hal diagrammasındaǵı punktir sızıq geliy I hám geliy II dep atalatuǵın usı eki fazanıń jasaw oblastların bólip turadı.

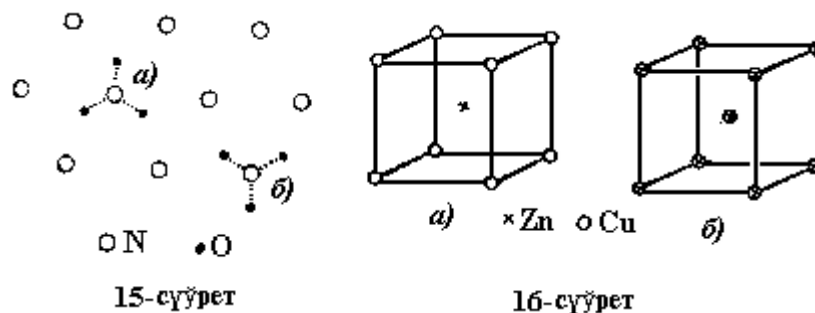
§ 75. Kristallardıń tártipleskenligi

47-paragrafta qaralǵan kristallıq strukturalarda hár bir atom belgili bir orınlarda jaylasqan bolıp, pánjereniń hár bir túyinde qanday da bir atom turadı. Hár bir túrge tiyisli atomlar ushın kristallıq pánjerede qansha orın ajratılǵan bolsa, kristalda sonshama atom boladı dep esaplawǵa boladı.

Biraq bunday qásiyetlerge iye bolmaytuǵın da strukturalar boladı. Mısalı natriy silitrası NaNO_3 tiń strukturası usınday. Onıń detalların tereń talqılamay, mınalardı atap ótemiz: bul kristalda NO_3 toparı qatlamlardı payda etedi, N atomları durıs úsh múyeshliklerdiń tóbelerinde jaylasadı, al O atomları bolsa *a* yamasa *b* awhalların iyelep (15-súwret) N atomlarınıń dógeriginde jaylasadı. NO_3 toparlarınıń usınday eki orientaciyasınıń bolıwı O atomları turıwı múmkin bolǵan orınlarınıń sanınıń bunday atomlardıń sanınan eki ese kóp ekenligin bildiredi.

Jetkilikli tómen temperaturalarda kislorod atomları anıq bir orınlardı iyeleydi. Bunday kristal *tártiplesken kristal* dep ataladı (hár bir qatlamda barlıq NO_3 toparları birdey orientaciyağa iye boladı, qala berse a orientaciyasına iye bolğan qatlamlar b tipindegi qatlarmlar menen gezeklesedi).

Biraq temperatura joqarılağanda tártip buzıladı: óziniń "durıs" orınların iyelegen NO_3 toparları átirapında "basqa" orınlardı iyelegen durıs emes orientaciyaдағы toparlar payda boladı.



"Tártiplesiw" dárejesiniń tómenlewi menen (yaǵnıy "durıs emes" baǵıtlanğan NO_3 toparlarınń kóbeyiw menen) 275°S da "ózińiń" hám "basqanıń" orientaciyası pútkilley aralasıp ketken moment júzege keledi: NO_3 toparlarınń hár biri birdey itimallıqta birinshi yamasa ekinshi awhalda turğan bolıp shıǵadı. Bunday haldağı kristaldı *"tártiplespen"* dep ataydı. NO_3 tiń barlıq katlamları kristallografiyalıq jaqtan bir birine ekvivalent bolıp simmetriyanıń ózgerisi (joqarılawı) orın aladı.

Kristallardıń tártiplesiw qubılısı quymalarda keńnen tarqalğan. Mısalı latun kristalları (CuZn quyması) tómengi temperaturalarda kublıq pánjeregi iye boladı (Cu atomları kublıq qutışanıń tóbelerinde, Zn atomları ortasında, 16- a súwret). Bunday struktura tolıq tártiplesken kristalğa sáykes keledi. Biraq Cu hám Zn atomları bir biri menen orınların almasıwı múmkin. Bunday mániste kristaldağı hár bir atom ushın arnalğan orınlar sanı atomları sanınan kóp dep aytıwğa boladı. Temperatura joqarılağan sayın "durıs emes" jaylasqan atomlardıń sanı artadı hám 450°S da tolıq tártipsizlik orın aladı: hár bir túyinde birdey itimallıqta Cu yamasa Zn atomın tabıwğa boladı (yaǵnıy barlıq túyinler ekvivalent boladı, 16- b súwret). Usı temperaturada kristaldıń simmetriyası ózgeredi: onıń Brave pánjeresi ápiwayı kublıq pánjereden kólemde oraylasqan pánjerege aylanadı.

Joqarıda qaralğan eki mısalda da tártipsiz halğa ótiw ekinshi áwlad fazalıq ótiw jolı menen ámelge asadı. Belgili bir temperaturada tolıq joǵalǵansha tartiplilik dárejesi úzliksiz kemeyedi. Sol temperatura fazalıq ótiw noqatı bolıp tabıladı.

Biraq tártipsiz halğa ótiwdiń usınday usılı birden bir qáde bolıp tabılmaıdı: bunday ótiw ádettegi fazalıq ótiwlerdegi sekirmeli túrde de ámelge asıwı múmkin. Bunday jaǵdaylarda kristaldağı atomlardıń tártiplesken ornalasıwları temperatura joqarılağanda dáslep kishi dárejede buzıladı, al belgili bir temperaturada kristal sekirmeli túrde atomları aralasıp ketken tolıq tártipsiz halğa ótedi. Mısalı, usınday ótiw Cu_3Au quymasında 390°S da baqlanadı. Onıń tártipsiz fazasında Cu menen Au atomları qaptalda oraylaskan pánjereniń barlıq túyinleri boyınsha aralasıp jaylasqan, al tártiplesken fazada Au atomları qutışanıń tóbelerindegi, al Cu atomları qaptallarınıń oraylarındağı orınlardı iyeleydi.

§ 75. Suyıq kristallar

Zatlar kristallıq hám izotrop suyıq hallardan basqa *suyıq kristallıq* dep atalatuǵın halda da bola aladı. Óziniń mexanikalıq qásiyetleri boyınsha zatlar bul halda suyıqlıqqa uqsas: olar aqqıshlıq qásiyetke iye, kala berse suyıq kristallar arasında jeńil qozǵalatuǵın (kishi jabısqaqlıqqa iye) hám awır qozǵalatuǵınları da (úlken jabısqaqlıqqa iye) bar. Sonıń menen bir waqıtta bul suyıqlıqlar ádettegi suyıqlıqlardan anizotropiyası menen ayrıladı. Anizotropiya optikalıq qásiyetlerde ayqın kórinedi.

Suyıq kristallıq hal uzın formaǵa iye úlken molekulaları bar quramalı organikalıq zatlarda baqlanadı. Olardıń ushırıawı onsha siyrek emes: hár bir eki júzinshi organikalıq zat suyıq kristaldı payda etedi.

Kórinip turǵanıday suyıq kristallıq xaldıń fizikalıq tábiyatı tómendegidey. Ádettegi suyıqlıqta molekulalardıń bir birine salıstırǵandaǵı ornalasawı hám orientaciyaları pútkilley xaotik. Basqa sóz benen aytqanda molekulalar ózleriniń jıllılıq qozǵalıwında xaotik ilgerilemeli qozǵalǵanıday xaotik aylanbalı da qozǵaladı. Al suyıq kristallarda bolsa molekulalar tutası menen keńislikte tártipsiz jaylasatuǵın bolsa da, olardıń óz-ara orientaciyası tártiplesken boladı. Basqa sóz benen aytqanda molekulalardıń tek jıllılıq ilgerilemeli qozǵalısları tártipsiz, al olardıń aylanıwları tártiplesken. Bunday strukturanı ápiwayı hám kórgizbeli túrde tayaqsha tárizli molekulalardan turadı dep qarawǵa boladı. Bunday molekulalar bir birine salıstırǵanda ıqtıyarlı, biraq bir birine parallel túrde jaylasadı. Bunday molekulalarda ilgerilemeli qozǵalıw múmkinshiligi bolǵanlıqtan zat suyıqlıqqa tán bolǵan aqqıshlıq qásiyetine iye boladı. Molekulalardıń tártiplesken orientaciyası bolsa zattıń anizotropiyasını támiyinleydi. Sonlıqtan zattıń qásiyetleri tayaqsha tárizli molekulalardıń orientaciyası baǵıtında basqa baǵıtlarǵa qaraǵanda basqasha bolatuǵınlıǵı óz-ózinen túsiniكلي.

Ádette zatlar suyıq kristallıq halda "monokristal" bolıp tabılmaydı, al bir birine salıstırǵanda hár qıylı bolıp orientaciyalanǵan tamshı tárizli suyıq kristallardan turatuǵın "polikristallıq" agregat bolıp tabıladı. Usınıń sebebinen suyıq kristallıq zat ádettegi jaǵdaylarda gúńgirt túrge iye boladı. Bul hár qıylı tamshılardıń shegaralarında jaqtılıqtıń tártipsiz shashırawınıń saldarınan júzege keledi. Bazı bir jaǵdaylarda kúshli elektr yamasa magnit madanlarınıń tásirinde barlıq tamshılardıń birdey orinetaciyaǵa keliwin boldırıw múmkin. Nátiyjede móldir suyıq "monokristal" alınadı.

Eger suyıq kristaldı bul kristal aralaspaytuǵın qanday da bir suyıqlıqqa quysaq, onda ayırım suyıq kristallıq tamshılar bazı bir jaǵdaylarda sferalıq, bazı bir jaǵdaylarda ayqın qórinip turatuǵın múyeshleri hám tárepleri bar reńli kóp múyeshliklerdiń formalarınday formalarǵa iye boladı.

Suyıq kristallıq halda jasay alatuǵın zatlar ádettegidey qattı kristallıq hám izotroplıq suyıq fazalarǵa da iye boladı. Bunday jaǵdaylardaǵı fazalardıń payda bolıwınıń izbe-izligi mınaday: tómengi temperaturalarda zat qattı kristallıq halda boladı, temperatura joqarılaǵanda zat suyıq kristallıq halǵa ótedi, al temperaturanıń bunnan keyingi joqarılawında ádettegi suyıqlıq payda boladı. Kóp zatlar bir neshe suyıq kristallıq modifikaciyalarda tura aladı. Basqa fazalıq ótiwlerdey suyıq kristallıq fazalardıń bir birine yamasa basqa fazalarǵa ótiwi anıq bir temperaturalarda jıllılıqtıń jutılıwı yamasa shıǵarılıwı menen júredi.

ERITPELER

§ 77. Eriwshilik

Eritpe dep aytqanda eki yamasa bir neshe zatlardıń usı zatlardıń molekulalar qáddindegi aralaspasın túsinedi. Bunday jaǵdaylarda hár qıylı zatlardıń aralaspadaǵı salıstırmalı muǵdarı keń sheklerde ózgeriwi múmkin. Eger aralaspadaǵı bazı bir zattıń muǵdarı basqa zatlardıń muǵdarınan kóp bolsa, onda sol zattı eritkish, al qalǵan zatlardı erigen zatlar dep ataymız.

Eritpeniń kuramı koncentraciya menen táriyiplenedi. Koncentraciya aralıspadaǵı zatlardıń muǵdarları arasındaǵı qatnasqa teń (aralaspanıń qurawshısı yamasa komponentası dep te ataydı) hám onıń har qıylı usıllar menen anıqlanıwı múmkin. Fizikalıq kóz-qarastan eń kórgizbeliregi molekulalar sanları arasındaǵı qatnas bolǵan mollik koncentraciya bolıp tabıladı (yamasa mollerde alıńǵan muǵdarlar arasındaǵı qatnas). Sonıń menen birge salmaqlıq, kólemlik hám basqa da katnaslardan da paydalanadı.

Eriw processı jıllılıqtıń shıǵarılwı yamasa jutılıwı menen júredi. Bul jıllılıqtıń muǵdarı erigen zattıń da, eritiwshiniń de muǵdarına baylanıslı.

Eriw jıllılıǵı dep zattıń bir gramm-molekulası úlken muǵdardaǵı eritkishte (eriwshi zattıń endigi gramm-molekulası erigende jıllılıq effektiniń ózgermewi kerek) erigendegi bólip shıǵarılǵan yamasa jutılǵan jıllılıqtıń muǵdarına aytamız. Masılı kúkirt kislotasınıń (H_2SO_4) suwdaǵı eriw jıllılıǵı $+75\,000\,dj$ (plyus belgisi jıllılıqtıń bólinip shıǵatuǵınlıǵın ańlatadı), nashatırdıń (NH_4Cl) eriw jıllılıǵı $-16\,500\,dj$ ǵa (minus belgisi jıllılıqtıń jutılatuǵınlıǵın ańlatadı) teń.

Eki zattıń bir birinde erigishligi ádette belgili bir sheklerge iye: eritiwshiniń berilgen muǵdarında tek belgili bir muǵdardan kóp bolmaǵan eriwshi zattıń eriwı múmkin. Eriwshi zattıń muǵdarı eń kóp bolǵan eritpe *toyınǵan eritpe* dep ataladı. Eger usınday eritpege zattıń bazı bir muǵdarın jáne qossaq, onda ol erimeydi. Sonlıqtan toyınǵan eritpeni taza eriwshi zat penen jıllılıq teń salmaqlıǵında turǵan eritpe dep atawǵa boladı.

Toyınǵan eritpeniń koncentracıyası berilgen zattıń berilgen eritkishtegi eriw qábilettiligin táriyipleydi, onı berilgen zattıń *erigishligi* dep te ataydı.

Ulıwma aytqanda erigishlik temperaturaǵa ǵárezli. Le SHatale principi bul ǵárezliliktiń baǵıtın eriw jıllılıǵınıń belgisi menen baylanıstırıwǵa múmkinshilik beredi.

Meyli eriw jıllılıqtıń jutılıwı menen júrsin (misalı suwdaǵı nashatırdıń eriwı). Ele erimegen nashatır menen teń salmaqlıqta turǵan nashatırdıń eritpesine iye bolayıq. Eger bul sistemanı kızıdırsaq, ol teń salmaqlıq halınan shıǵadı. Bunday jaǵdayda sistemada usı sistemanı teń salmaqlıq haldan shıǵarıwǵa baǵdarlangan processler baslanadı (qızdıruw). Bunday jaǵdayda nashatırdıń erigishligi jıllılıqtıń jutılıwı menen qosımsha erigishliktiń payda bolatuǵıniday bolıp úlkeyedi.

Solay etip, eger eriw jıllılıqtıń jutılıwı menen júretuǵın bolsa, onda erigishlik temperaturanıń ósiwi menen joqarılaydı. Kerisinshe, eger erigende jıllılıq jutılatuǵın bolsa, onda temperaturanıń joqarılawı erigishlikte kemeytedi.

Gazdıń suyıqlıqtaǵı eriwı ádette kólemniń kishireyiwi menen júredi: eripteniń kólemi eritkish penen eriwshi gazdıń dálepki kólemlerinen ádewir kishi boladı (misalı azot molekulalarınıń bir moli kóp muǵdardaǵı suwda ójire temperaturalarında hám atmosferalıq basımlarda erigende bul suyıqlıqtıń kóleminiń $40\,sm^3$ qa ǵana úlkeyiwine alıp keledi, al erigen gazdıń kólemi bolsa $22\,400\,sm^3$ ka teń). Le SHatale principi boyınsha

basımın ósiwi menen (berilgen temperaturada) suyıqlıqtıń betinde turǵan gazdıń suyıqlıqtaǵı erigishligi úlkeyedi.

Gazdıń erigishliginiń onıń basımına ǵárezziliginin xarakterin gazdıń azzi eritpeleri ushın ańsat tabıwǵa boladı [Azzi (yamasa suıylılǵan) eritpe dep eritilgen zattıń molekularınıń sanı eritkishtiń molekularınıń sanına salıstırǵanda kishi bolǵan jaǵdaylarda aytadı]. Bunday jaǵdaylardaǵı gaz benen onıń toyınǵan eritpesi arasındaqı jıllılıq teń salmaqlıǵı óziniń molekualıq tyabiyatı boyınsha *qozǵalmalı* xarakterge iye bolatuǵınlıǵınan paydalanamız. Bul teń salmaqlıq ornaǵannan keyin de gazdıń eritpege yamasa qarama-karsı baǵıttaǵı ótiwiniń saqlanıp qalatuǵınlıǵın bildiredi. Biraq gazden eritpege (1 sek waıt ishindegi) eritpege hám eritpeden gazge ótetuǵın molekulardıń muǵdarı birdey boladı. Suıqlıqqa kelip eriytuǵın gaz molekularınıń sanı (1 sek waıt ishindegi) gaz molekularınıń suıqlıq betine kelip urılıwınıń jiyiligine proporcional boladı. Óz gezeginde bul san (berilgen temperaturadaǵı) gazdıń tıǵızlıǵına hám sonlıqtan basımına proporcional. Tap sol sıyaqlı eritpeni taslap ketetuǵın gaz molekularınıń sanı onıń koncentraciyasına proporcional. Sonlıqtan eki sannıń tańliginen toyınǵan eritpeniń koncentraciyasınıń (yaǵnıy gazdıń erigishliginiń) eritpe ústindegi gazdıń basımına proporcional ekenligi kelip shıǵadı (*Genri nızamı*).

Bul nızamnıń tek azzi eritpler ushın ǵana durıs ekenligin umıtpaw kerek (qarama-qarsı jaǵdaylarda joqarıda ketirilgen tallawımız durıs emes bolıp shıǵadı: eritpadege molekulardıń bir biri menen tásirlesiwiniń saldarınan eritpeni taslap ketip atırǵan molekulardıń sanın koncentraciyaǵa proporcional dep aytıwǵa bolmaydı). Sonlıqtan (mısalı) Genri nızamı suwda jaman eriytuǵın kislorod penen azot ushın durıs, al suwda jaqsı eriytuǵın uglekislotı menen ammiak ushın dulıs bolmaydı.

Basım kópshilik jaǵdaylarda gazler erigende jıllılıq bólinip shıǵadı. Bul molekular azzi tásirlesetuǵın oblasttan (gazden) eritkish molekuları menen kúshli tásirlesiw orın alatuǵın ortalıqqa ótiwiniń tábiyiy nátiyesi bolıp tabıladı. Usıǵan baylanıslı gazlerdiń suıqlıqlardaǵı eriginshligi (berilgen basımda) temperaturanıń joqarılawı menen tómendeydi.

§ 78. Suıqlıqlardıń aralasıpaları

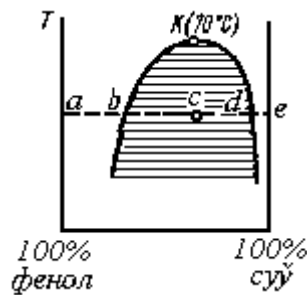
Molekuları arasındaqı tásirlesiwler júdá azzi bolatuǵınday dárejede siyreklesken zatlar bir biri menen erkin aralasadı. Bunday jaǵday orın alǵanlıqtan barlıq gazler bir biri menen qálegen muǵdarda aralasadı dep esaplawǵa boladı.

Suıqlaqlar aralasqanda bolsa hár qıylı jaǵdaylardıń ornı alıwı múmkin. Bir biri menen qálegen muǵdarda aralasıtuǵın suıqlıqlar bar (mısalı spirt penen suw). Basqa suıqlıqlardıń bir biri menen aralasıwı hár qıylı dárejelerde sheklengen. Mısalı suw menen kerosin bir biri menen pútkilley aralaspaydı, ójire temperaturalarında suwda efirdiń 8 % (salmaǵı boyınsha) muǵdarında ǵana eriydi hám basqalar.

Suıqlıqlardıń bir birinde eriw qásiyetlerin diagrammanıń járdeminde sáwlelendiren qolaylı. Bul jaǵdayda abscissa kósherine aralaspanıń koncentraciyası s (mısalı salmaqlıq procentlerde), al ordinata kósherine temperatura (eger bizdi berilgen temperaturadaǵı erigishliktiń basımǵa ǵárezziligi qızıqtıratuǵın bolsa) qoyladı.

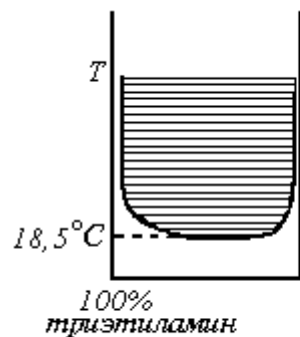
1-súwrette suw menen fenoldıń (S_6N_5ON) aralaspası ushın usınday diagramma keltirilgen. Vertikallıq kósherlerdiń biri suwdıń 0 procentine (yaǵnıy taza fenolǵa), ekinshisi taza suwǵa sáykes keledi.

Diagramanıń shtrixlanbaǵan oblastlarınıń barlıq noqatları eki komponentanıń bir tekli aralaspasına sáykes keledi, al shtrixlangan oblasttı sheklewshi iymeklik bolsa, olardıń aralasıw sheklerin anıqlaydı. Mısalı, ae gorizontallıq tuwrısına sáykes keliwshi temperaturada b noqatı suwdıń fenoldaǵı eriwiniń shegine, al d noqatı fenoldıń suwdaǵı eriwiniń shegine sáykes keledi. Eger shtrixlangan oblasttıń ishinde jatqan qanday da bir s noqatına sáykes keletuǵınday etip suw menen fenoldı aralastırsaq, onda suyıqlıqtıń eki qatlamǵa ayrılıwı orın aladı. Bul qatlamlardıń biri ekinshisiniń astında jatadı (tıǵızırıǵı tómeninde, tıǵızlıǵı tómeni joqarısında). Bir biri menen teń salmaqlıqta turǵan bul eki suyıq katlam hár qıylı eki faza bolıp tabıladı. Olırdıń birinshisi suwdıń fenoldaǵı toyınǵan eritpesi (b noqatı menen súwretlengen), al ekinshisi fenoldıń suwdaǵı toyınǵan eritpesi (d noqatı) bolıp tabıladı. Bunday jaǵdayda da eki fazanıń muǵdarınıń rıqag kaǵıydası menen anıqlanatuǵınlıǵın ańsat kórsetiwge boladı (tap sonday jaǵday 66-paragrafta suyıqlıq hám puw ushın kórsetilgen edi). Bul muǵdarlardıń shaması sb hám sd kesindileriniń uzınlıǵına kerı proporcional.

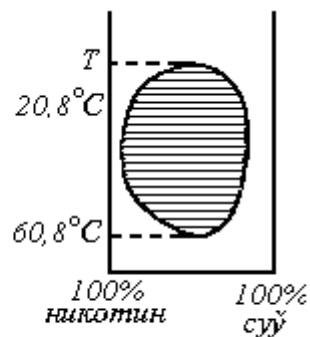


1-súwret

Eger temperaturanıń joqarılawı menen eki suyıqlıqtıń bir birinde eriwı joqarılaytuǵın bolsa, onda olardıń aralasıwınıń sheksiz úlken bolatuǵın momenti júzege keledi. Bunday jaǵday (mısalı) suw menen fenolda $70^\circ S$ dan joqarı temperaturada baslanadı. Bunday temperaturada bul eki suyıqlıq bir birinde ıqtıyarlı túrde aralasa aladı. Temperaturanıń bul shegin *aralasıwdıń kritikalıq temperaturası*, al fazalıq diagrammadaǵı sáykes K noqatın (1-súwret) *aralasıwdıń kritikalıq noqatı* dep ataladı. Bul noqat óziniń qásiyetleri menen suyıqlıq penen gazdıń teń salmaqlıǵı ushın kritikalıq noqatqa uqsas.



2-сүўрет



3-сүўрет

Kritikalıq noqat eki suyıqlıqtıń shekli aralasıw oblastınıń eń tómenǵı noqatı bolatuǵın jaǵdaylar da orın aladı. Usınday qásiyetke suw menen trietilamin $[N(C_2H_5)_3]$ iye. Bul eki suyıqlıq belgili bir kritikalıq noqattan tómenǵı temperaturalarda ǵana ıqtıyarlı muǵdarda

aralasadı (2-súwret). Al bazı bir jaǵdaylarda eki kritikalıq temperatura orın aladı – joqarıdaǵı hám tómengi. Bul eki noqat arasında eki suyıqlıqtıń bir birinde eriwi shekli. Usınday awhalǵa misal retinde suw menen nikotinniń aralaspasın kórsetiw múmkin (3-súwret).

§ 79. Qattı eritpeler

Bazı bir zatlar bir biri menen aralas kristallardı payda etiw qásiyetine iye. Bunday kristallarda birinshi zattıń da, ekinshi zattıń da atomları boladı. Bunday aralas kristallardı *qattı eritpeler* dep ataydı. Qattı eritpelerdi payda etiw qábiletlik ásirese metallar (quymalar) arasında jiyi ushırasadı.

Biz aralas kristallardı qattı eritpeler túrinde aytatuǵın bolsaq kristallardıń quramınıń úlken intervallarda ózgere alatuǵınlıǵın názerde tutamız. Usı ózgesheligi menen olar quramı anıq bolǵan "ximiyalıq birikpeler" bolıp tabılatuǵın kristallardan ayrıladı. Sonıń menen birge qattı eritpeniń kristallıq qurılısı onıń qurawshılarınıń biriniń qurılısı menen baylanıslı, al ximiyalıq birikpege ózine tán qurılıs boladı.

Qattı eritpelerdiń basım kópshiligi *almastırıw tipine* jatadı. Bunday eritpe kristallıq pánjeredegi bir zattıń atomların ekinshi zattıń atomları menen almasırıw jolı menen alınadı. Bunday almastırıwdıń kristalǵa kiritiletuǵın zattıń atomlarınıń ólshemleri kristaldaǵı atomlardıń ólshemleri menen shama menen birdey bolǵanda múmkin ekenligi tábiyiy. Almastırıw tipindegi eritpelerge metallıq quymalardıń kópshiligi kiredi. Hátte quymanıń qurawshıları arasındaǵı sheksiz erigishlik awhalı da orın aladı (misalı mıs penen altınıń quyması). Bunıń ushın eki qurawshı da birdey tiptegi kristallıq pánjerege iye bolıwı kerek.

Awmastırıw tipindegi qattı eritpeleri tek elementler tárepinen emes, al ximiyalıq birikpeler menen de payda etiliwi múmkin. Bunday jaǵdayda bul kubılıs *izomorfizm* dep ataladı. Bunday aralas kristallarda zatlardıń birewiniń atomları basqa birikpeneń quramına kiretuǵın atomlar tárepinen almastırılǵan.

Qattı eritpeniń payda bolıwı ushın eki birikpeniń de ximiyalıq jaqınlıǵınıń bolıwı shárt emes. Biraq eki zattıń da molekulalıq qurılısınıń birdey tipte bolıwı kerek. Sonlıqtan ximiyalıq jaqtan uqsas izomorf zatlar (misalı ZnSO_4 hám MgSO_4) menen bir qatar ximiyalıq jaqtan júdá uqsas bolmaǵan zatlardıń izomorfıq jupları ushırasadı: BaSO_4 hám KMnO_4 , PbS hám NaBr hám basqalar.

Izomorfizm ushın molekulalıq qurılıstıń bir tipliligi menen bir qatar kristallıq pánjerelerdiń bir tiplililigi menen olardıń ólshemleriniń jaqınlıǵı da zárúrli. Ólshemlerdiń tutkan ornı KCl , KBr , KI birikpeleriniń misalında aykın kórinedi. Olardıń barlıǵı da birdey tiptegi pánjerege iye (NaCl tipindegi), biraq qońısılas atomlar arasındaǵı qashıqlıqlar hár qıylı (sáykes 3,14; 3,29 hám 3,52 Å). KCl menen KBr daǵı salıstırmalı úlken emes ayırmanıń orın alıwınıń saldarınan bul birikpeler qálegen quramdaǵı eritpeni payda ete aladı. Al KCl menen KI arasındaǵı úlkenirek ayırma olardıń bir birinde eriwine shek qoyadı. Ólshemlerdegi onnan da úlken ayırma izomorfizmdi pútkilley boldırmaydı.

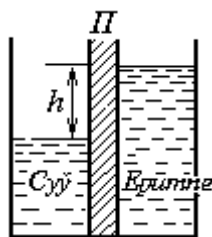
Qattı eritpelerdeń baska tipi *endiriw tipindegi* eritpeler bolıp tabıladı. Bunda ykristallarda erigen zattıń atomları eritiwshi zattıń atomları arasına kiredi hám olardı jılistıradı. Baska sóz benen aytqanda olar taza eritkishte iyelenbegen orınlardı iyeleydi.

Álbette bunday eritpeler eriwshi zattıń atomlarınıń ólshemleri eritkishtiń atomlarınan ádewir kishi bolǵanda ǵana payda boladı.

Endiriw tipindegi qattı eritpelerdi bazı bir metallarda vodorod, azot hám uglerod payda etedi. Mısalı uglerod joqarı temperaturalarda γ -temir dep atalıwshı kublıq tıǵız jaylasqan temirdiń modifikaciyasında eriy aladı. Alınǵan eritpede (bul eritpeni austenit dep ataydı) uglerod atomları temir atomları kublıq qutishalardıń tóbelerinde hám qaptal betleriniń orayında, al erigen uglerod atomları bolsa kristallıq qutishalardıń qabırǵalarınń ortasında jaylasadı. Usınday orınlardıń (qutishalardıń qabırǵalarınń ortalarınń) 10 procentine shekem uglerod atomları menen tolıwı múmkin.

§ 80. Osmoslıq basım

Eger koncentraciyası hár qıylı bolǵan eki eritpe tesiksheleri bar ótkel arqalı bir birinen ajratılǵan bolsa eritkish te, erigen zat ta usı ótkel arqalı pútkilley aralasıp ketkenshe ótedi. Biraq saylap alıwshılıq qásiyetke iye da ótkeller bar. Bunday ótkeller bir zattı ótkeredi, al ekinshi zattı ótkermeydi. Bunday ótkellerdi *yarım sińirgish* ótkeller dep ataydı. Bunday ótkellerge ósimliklerden yamasa haywanlardan alınatuǵın perde tárizli materiallar, tesikshelerinde mıstıń ferrocianidi $[\text{Cu}_2\text{Fe}(\text{CN})_6]$ plenkası bar ilay yamasa farfor hám basqalar kiredi. Olardıń barlıǵı da suwdı ótkeredi, al basqa zatlardı irkip qaladı. Usınday ótkel arqalı eritkishtiń ótiwin *osmos* dep ataydı.



4-súwret

Eger eki ıdıs (birewinde taza suw eiknshisinde qanttıń suwdaǵı eritpesi bolsın) yarım ótkizgish ótkel menen ajratılǵan bolsa (4-súwrettegi P) suw eritpe bar ıdısqı karay óte baslaydı. Bul jaǵday eritpeniń ózine eritkishti tartıp atırǵanına sáykes keledi. Bul qubılıs suw menen eritpenań qáddileri arasında belgili bir ayırma payda bolǵansha dawam etedi.

Endi eki ıdıstaǵı basımlar birdey bolmaydı. Endi eritpe bar ıdısta artıq basım payda boladı. Bul artıq basımdı *osmoslıq basım* dep ataydı.

Bul qubılıstıń payda bolıwın ańsat túsiniwge boladı. Yarım ótkizgish ótkel arqalı tek suw ótetuǵın bolǵanlıqtan eki ıdıstaǵı suyıqlıqtıń teń salmaqlıǵı ótkeldiń eki tárepindegi tolıq basımlardıń teńligin talap etpeydi. Turpayı túrde aytqanda taza suwı bar ıdıstaǵı basım eritpe bar ıdıstaǵı suw tárepinen ótkelge túsiriletuǵın basımǵa teń bolıwı kerek. Demek bir ıdıstaǵı basım menen ekinshi ıdıstaǵı basımlar ayırması tek ǵana qant molekulaları tárepinen payda etiletuǵın basımǵa teń boladı. Bul basım eritpeniń osmoslıq basımı dep ataladı.

Eger eritpe hálisiz bolsa erigen zattıń molekulaları bir birinen alısta jaylasadı hám sonlıqtan bir biri menen hálisiz tásir etisedi (biraq eritkishtiń molekulaları menen tásir etisetuǵınlıǵı anıq). Usıǵan baylanıslı hálisiz eritpelerdegi erigen zattıń molekulaları ideal gaz molekulalarına uqsas boladı. Bunnan ideal gaz benen hálisiz eritpeler arasındagı bir qansha uqsaslıqlar kórinedi.

İdeal gazdın basımının $r=NkT/V$ formulası menen anıqlanatuǵınlıǵın bilemiz. Hálsiz eritpeniń basımı r_{osm} da soǵan sáykes formula menen anıqlanadı:

$$p_{osm} = \frac{nkT}{V}.$$

Bul jerde V arkalı eritpeniń kólemi, n arqalı erigen zattıń molekuları sanı belgilengen (Vant Goff formulası).

Qálegen eritpeniń osmoslıq basımınıń (berilgen temperatura menen basımdaǵı) erigen bólekshelerdiń sanı menen anıqlanatuǵınlıǵın, al sol bólekshelerdiń tábiyatına pútkilley baylanıssız ekenligin atap ótemiz (ideal gazdın basımınıń da onıń tábiyatınan ǵárezsizligindey). Mısal retinde tómendegi maǵlıwmatlardı keltiremiz: koncentraciyası $0,1 \text{ mol/l}$ bolǵan eritpeniń osmoslıq basımı $2,24 \text{ atm}$ ǵa teń. Al teńiz suwınıń da osmoslıq basımı shama menen $2,7 \text{ atm}$ ǵa teń.

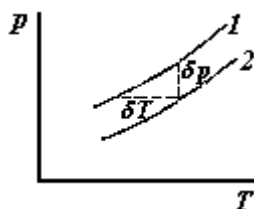
Eger bir eritkishtegi bir neshe zattıń eritpesine iye bolsaq, onda joqarıda ayılǵanlarǵa baylanıslı bunday eritpeniń osmoslıq basımı erigen zatlardıń molekularınıń ulıwmalıq sanı menen anıqlanadı. Basqa sóz benen aytqanda bul jaǵdaydaǵı osmoslıq basım erigen zatlardıń hár qaysısınıń "parciallıq" osmoslıq basımlarınıń qosındısına teń boladı (gazler ushın Dalton nızamına uqsas jaǵday orın aladı). Bul jaǵdaydıń erigende eriwshi zattıń molekuları bóleklerge ıdıraǵanda (dissociaciya orın alatuǵın bolǵanda) ǵana orın alatuǵınlıǵın atap ótemiz (bul qubılıs haqqında 89-90 paragraflarda ǵáp etiledi). Bunday eritpeniń osmoslıq basımı tek ǵana erigen zattıń muǵarına ǵana emes, al onıń molekularınıń qanday dárejede ıdıraǵanlıǵına da baylanıslı.

Hálsiz eritpe menen ideal gaz arasındadı uqsaslıq basqa da qubılıslardı kórinedi. Salmaq maydanındadı erigen zattıń molekularınıń bólistiriliwi (tarqalıwı) 54-paragraftadı barometrlık formulaǵa sáykes formula menen anıqlanadı. Bul qubılıstı ańsat baqlawǵa boladı. Bul jaǵdayda ádettegi eritpeniń ornına qanday da bir zattıń suyıqlıq ishinde júzip júretuǵın mayda bólekshelerinen turatuǵın emulsiyadan paydalanıw kerek. Bul jaǵdaydaǵı bólekshelerdiń massaları ayırım molekulardıń massalarınan ádewir úlken bolǵanlıqtan olardıń koncentraciyasınıń biyiklikke baylanıslı ózgeriwi barometrlık formulaǵa sáykes anıq kórinedi hám baqlaw ushın ańsat boladı [Álbette bunday jaǵdayda emulsiya bólekshesiniń massasınıń ornına Arximed nızamı boyınsha suyıqlıqtıń qısıp shıǵarıwınıń saldarınan kemeygen massanı qoyıw kerek].

§ 81. Raul nızamı

Suyıqlıq puwǵa aylanatuǵın berilgen basım ushın belgili bir temperaturanıń bar ekenligin biz bilemiz (qaynaw noqatı). Endi suyıqlıqta qanday da bir ushpaytuǵın zat eritilgen bolsın (yaǵnıy eritkish puwlanıp ketkende de ushpay kalatuǵın zat, misalı suwdaǵı qanttıń eritpesi). Eritpeniń qaynaw noqatı taza eritkishtiń qaynaya noqatınan ózgeshe boladı eken (tap sonday basımdadı).

Le SHatale principi boyınsha erigende qaynaw noqatı joqarılaydı dep juwmaq shıǵarıw ańsat. Puwı menen teń salmaqlıqta turǵan kanttıń suwdaǵı eritpesin qaraymız. Eritpege kanttıń belgili bir muǵdarın qosamız. Eritpeniń koncentraciyası ózgeredi hám sistema teń salmaqlıq haldan shıǵadı. Bul sistemada sırtqı tásirde hálsiretiwge qaratılǵan, yaǵnıy koncentraciyalı azaytıwǵa qaratılǵan processlerdiń baslanıwı kerek. Bunıń ushın puwdıń bir bóliminiń suwǵa koncentraciyalanıwı ushın qaynaw temperaturasınıń joqarılawı kerek.



5-súwret

Diagrammada (r, T -diagrammada) eritpeniń qaynaw noqatınıń joqarılawı bılay ańlatıladı: eritpeniń qaynaw iymekligi (5-súwrettegi 2-iymeklik) taza eritkishtiń puwlanıw iymekligi 1 den oń tárepke karay biraz awısqa boladı. Biraq súwrette 2-iymekliktiń 1-iymeklikten tómende jaylasatuǵınlıǵı kórinip tur. Bul eritpe úsindegi eritkishtiń toyınǵan puwınıń serpimliliginiń taza eritkishtiń puwınıń serpimliliginen tómekenligin bildiredi (sol temperaturadaǵı). Toyınǵan puwdıń basımınıń tómencelewı δr hám erigendegi qaynaw temperaturasınıń joqarılawı δT diagrammada eki iymeklik arasındadı kesindiler menen beriledi (sáykes vertikalıq hám gorizontallıq kesindiler).

Eger eritpe hálsiz bolsa bul ózgerislerdi esaplawǵa boladı (eritpeni hálsiz dep esaplaymız).

4-súwrette sáwlelendirilgen yarım ótkizgish diywal arqalı bólingen taza suw menen eritpe arasındadı teń salmaqlıqtı qaraymız. Priborımız tolıǵı menen suwdıń toyınǵan puwı tolǵan jabıq kenislikte jaylasqa dep esaplaymız. Salmaq maydanında biyiklikke baylanıslı kemeyetuǵın bolǵanlıqtan eritpe úsindegi puwdıń serpimligi ıdıdaǵı taza suw úsindegi toyınǵan puwdıń serpimliliginen kishi boladı. basımlar ayırması δr biyikligi h qa teń baǵananiń salmaǵına teń boladı:

$$\delta r = \rho_r g h,$$

(ρ_r arqalı puwdıń tıǵızlıǵı belgilengen). Ekinshi tárepten h biyikligi eritpeniń osmoslıq basımı r_{osm} penen anıqlanadı: naydaǵı suyıqlıqtıń salmaǵı r_{osm} basımın teńlestirip turadı. Osmoslıq basım ushın formuladan mına katnastı alamız:

$$\rho_s g h = p_{osm} = \frac{n k T}{V_c}.$$

Bul jerde n arqalı 1 g zattaǵı erigen zat molekularınıń sanı belgilengen. Bunday jaǵdayda V_s bolsa suyıqlıqtıń salıstırmalı kólemi bolıp tabıladı, yaǵnıy $V_s = 1/\rho_s$. Bunnan $gh = nkT$ ekenligin tabamız hám buni δr ushın ańlatpaǵa qoyıp mınanı alamız:

$$\delta p = \rho_p n k T = \frac{n k T}{V_p}.$$

Eń keyninde puwdı ideal gaz sıpatında qarap onıń salıstırmalı kólemi ushın $V_p = NkT/r$ ańlatpasın alamız, bul jerde N arqalı 1 g puwdaǵı yamasa 1 g suwdaǵı (ekewiniń de birdey ekenligine itibar beremiz) molekular sanı. Nátiyjede mınanı alamız:

$$\frac{\delta p}{p} = \frac{n}{N}.$$

Bul biz izlep atırǵan formula bolıp tabıladı: puwdıń serpimliginiń salıstırmalı kishireyiwi eritpeniń kolekulalıq koncentraciyasına teń (yaǵnıy erigen zattıń molekuları sanınıń eritkishtiń molekularınıń sanına qatnasına teń). Bul tastıyqlaw *Raul nızamı* dep ataladı. Biz eritpe úsindegi puwdıń serpimliginiń ózgerisiniń eritkish penen erigen zattıń qásiyetlerinen ǵárezsiz hám tek olardıń molekularınıń sanına baylanıslı ekenligin kóremiz.

Bunday qásiyet kaynaw temperaturasınıń joqarılawı δT ға tiyisli emes. Buni δr hám δT shamaları bir biri menen

$$\delta p = \frac{dp}{dT} \delta T$$

túrindegi formula menen baylanıslı ekenligin eske túsiriw arkalı ańsat tabıwǵa boladı.

$$\frac{dp}{dT} = \frac{qp}{RT^2}$$

Klapeyron-Klauzius formulasınan paydalanıp (q arqalı mollik puwlanıw jıllılıǵı belgilengen, 68-paragraftı qarańız)

$$\delta T = \frac{RT^2}{qp} \delta p$$

ańlatpasın alamız. Bul ańlatpaǵa $\delta r/r = n/N$ di qoyıp aqırǵı

$$\delta T = \frac{RT^2 n}{qN}$$

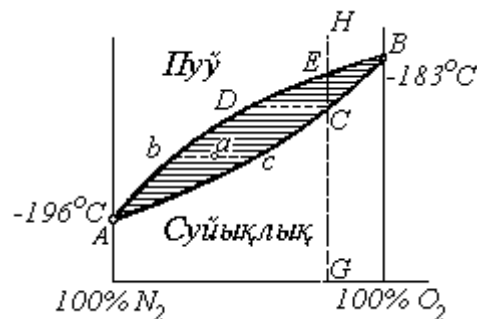
formulasına iye bolamız.

Eriw suyıqlıqtıń qatıw noqatına da tásir etedi. Júdá kóp jaǵdaylarda rigen zat qattı fazaǵa ótpeydi, yaǵnıy eritpeden taza eritkish qatadı. Puwlanganǵa Le SHatale principin qollanǵan jaǵdaydaǵıday jaǵday alınadı: eriw qatıw noqatın tómendetedi. Joqarıda alınǵan qaynaw noqatınıń ózgerisi δT ushın alınǵan formula qatıwǵa da durıs bolıp shıǵadı. Bunday jaǵdayda bul formuladaǵı q eritkishtiń eriwiniń mollik jıllılıǵı bolıp tabıladı.

Qatıw temperaturasınıń tómendewin molekulalıq salmaqı anıqlaw ushın paydalanadı (*krioskopiya usıl*). Izertleniwshi zattıń bazı bir muǵdarın eritip δT nı anıqlaydı. Bunnan keyin joqarıda keltirilgen formula boyınsha erigen molekulardıń sanı, al onnan keyin molekulalıq salmaq anıqlanadı. Tap usınday jollar menen qaynaw temperaturasınıń joqarılawın paydalanıp ta molekulalıq salmaqı anıqlaw múmkin.

§ 82. Suıqlıqlardıń aralaspasınıń qaynawı

Eki suıqlıqtıń aralaspası kaynaǵanda aralaspanıń eki kurawshısı da puw halına ótedi. Sonlıqtan bul jaǵdayda ekewi de aralaspadan turatuǵın suıq hám gaz tárizli fazalardıń teń salmaqlılıǵına iye bolamız. Usınday jaǵdaylarda payda bolatuǵın kubılıstı kórgizbelirek túrde hal diagrammasınıń járdeminde sáwlelendiriw múmkin.



6-сúwret

Bunday diagrammalardıń bir kósherine aralaspanıń koncentraciyası s , al ekinshi koordinataǵa temperatura T yamasa basım r qoyıladı. Anıqlıq ushın biz basımınıń belgili bir mánisine sáykes keliwshi s , T diagramması haqqında aytamız.

Suyıq aralasıpanıń kaynawı ushın fazalıq diagrammalardıń hár qıylı tipleri bar. Biz bul jerde suyıq halda ıqtıyarlı proporciyalarda aralasa alatuǵın zatlarǵa tiyisli bolǵan diagrammanı qaraymız.

Birinshi mısál retinde suyıq kislórod penen azóttıń aralasıpasın karaymız (6-súwret). Diagrammadaǵı vertikalıq tuwrılardıń biri taza kislórodqa, al ekinshisi taza azótká tiyisli. Olar arasında aralıqlıq koncentraciyalardıń barlıǵı da bar.

Joqarǵı iymekliktiń joqarısındaǵı oblast joqarı temperaturalı fazaǵa (yaǵnıy gaz tárizli aralasıpaǵa), al tómengi iymekliktiń tómendegegi oblast suyıq aralasıpanıń hallarına tiyisli. Eki iymeklik arasındaǵı shtrixlangan oblast suyıqlıqtıń puwı menen teń salmaqlıǵına sáykes keledi. Qala berse teń salmaqlıqta turǵan suyıqlıq penen puwdıń teń salmaqlıǵı berilgen noqat arqalı gorizont baǵıtında júrgizilgen tuwrınıń diagrammanıń eki iymeklikleri menen kesiliw noqatı menen anıqlanadı. Mısalı a noqatında quramı b noqatınıń abscissası menen anıqlanatuǵın gaz hám quramı s noqatı menen sáwlelenetuǵın suyıqlıq teń salmaqlıqta turadı. Bul noqattaǵı gaz benen suyıqlıqtıń salıstırmalı muǵdarları ab hám as kesindilerine kerı proporciolnal. Diagrammanıń joqarǵı iymekligi (ADV) *puw iymekligi*, al tómengi iymeklik (ASV) *suyıqlıq iymekligi* dep ataladı. Usınday tiptegi hal diagrammasın "sigara" jep jiýi ataydı.

A hám V noqatları taza azótká penen taza kislórodtıń qaynaw temperaturaları bolıp tabıladı. Meyli bizde 6-súwrettegi GN vertikalına sáykes keliwshi quramdaǵı aralasıpa bolsın. Qızdırıw barısında aralasıpanıń halı S noqatına jetkenimizshe GN vertikalı boyınsha ózgeredi. Usı temperaturada suyıqlıqtıń qaynawı baslanadı. Biraq qaynap ketiwshi puwdıń quramı suyıqlıqtıń quramınan ózgeshe boladı. Atap aytqanda usı temperaturada suyıqlıq penen teń salmaqlıqta turatuǵın puw qaynaydı (bul puwdıń koncentraciyası D noqatı menen anıqlanadı). Solay etip suyıqlıqtan azóttıń koncentraciyası joqarı bolǵan puw kaynap shıǵadı. Usıǵan sáykes suyıqlıqtıń quramı kislórodtıń koncentraciyası úlken bolǵan tárepke karay jıladı. Demek qızdırıw dawam etilgende suyıqlıqtıń halın sáwlelendiriwshi noqat joqarı karay SV iymekligi boyınsha jıladı. Qaynap shıǵıwshi puw bolsa joqarı qaray DV iymekligi boyınsha jılıyıtıǵın noqat járdeminde sáwlelendiriledi.

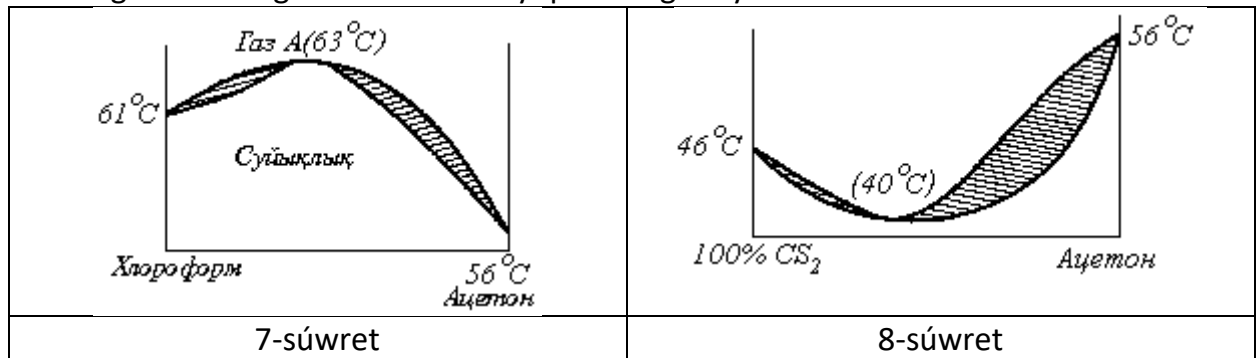
Biz aralasıpanıń turaqlı emes temperaturada qaynaytuǵınlıǵın kóremiz (taza suyıqlıq bolsa belgili bir temperaturada qaynaydı). Qaynawdıń tamam bolıw momenti qaynaw júretuǵın sharayatlarǵa baylanıslı. Eger qaynap shıqqan puw suyıqlıq penen tiyisip turatıǵın bolsa suyıqlıq penen puwdıń qosındı quramı turaqlı bolıp qaladı. Basqa sóz benen aytqanda suyıqlıq+puw sistemasiniń halı barlıq waqıtta GN tuwrısınıń boyındaǵı noqatlar menen beriledi. Bul jerde biz S noqatında baslangan qaynawdıń GN tuwrısınıń "sigaranıń" joqarǵı iymekliginiń E noqatındaǵı temperaturada tamam bolatuǵınlıǵın kóremiz.

Eger qaynaw ashıq idista júretuǵın hám puw sırtqa shıǵatuǵın bolsa, onda suyıqlıq penen tek sol úaqıtta qaynap shıǵatuǵın puw teń salmaqlıqta turadı. Eń sońǵı qaynap shıqqan puwdıń porciyası qaynap atırǵan suyıqlıqtıń quramındaý kuramǵa iye boladı. Bul qaynawdıń suyıqlıq penen puwdıń quramları birdey bolǵan noqatta (yaǵnıy V noqatında) tamam bolatuǵınlıǵın bildiredi.

Tap usınday qubılıslar puwdıń suyıqlıqqa kondensaciiyalanıwında da orın aladı.

Xlóroform menen acetónniń aralasıpası hal diagrammasınıń basqa tipine iye (7-súwret). Dáselpki keltirilgen hal diagrammasınıń tipinen ayırma sonnan ibarat, bul jaǵdayda eki iymeklik te A maksimum noqatına iye boladı. Bul jerde de iymeklikler

arasındağı oblast suyıqlıq penen puwdıń teń salmaqlıǵına, al iymekliklerdiń ústindegi hám astındağı oblastlar gaz tárizli hám suyıq fazalarǵa sáykes keledi.



Qaynaw menen kondensaciya joqarıda keltirilgen jaǵdayǵa saykes ótedi. Ashıq ıdistaǵı qaynawda suyıqlıq penen puwdıń halın táriyiplewshi noqatlar eki iymeklik boyınsha joqarıǵa karay jılıyadı. Biraq bul jaǵdayda noqatlar taza kurawshalırdıń biriniń kaynaw noqatında emes, al sol iymekliklerdiń bir biri menen tiyisiw noqatı bolǵan A noqatında toqtaydı. Bul noqatta suyıqlıq penen puwdıń kuramları birdey. Sonlıqtan A noqatına sáykes keliwshi quramdağı aralaspa (bunday aralaspanı *azeotropiyalıq aralaspa* dep ataydı) taza zat sıyaqlı turaqlı temperaturada tolıǵı menen qaynap ketedi.

8-súwrette iymeklikleri maksimumǵa emes, al minimumǵa iye hal diagrammasınıń tipi keltirilgen. Mısal retinde acetone menen kúirtli uglerodtıń aralaspası jaǵdayında alınatuǵın bunday diagramma 8-súwrette keltirilgen.

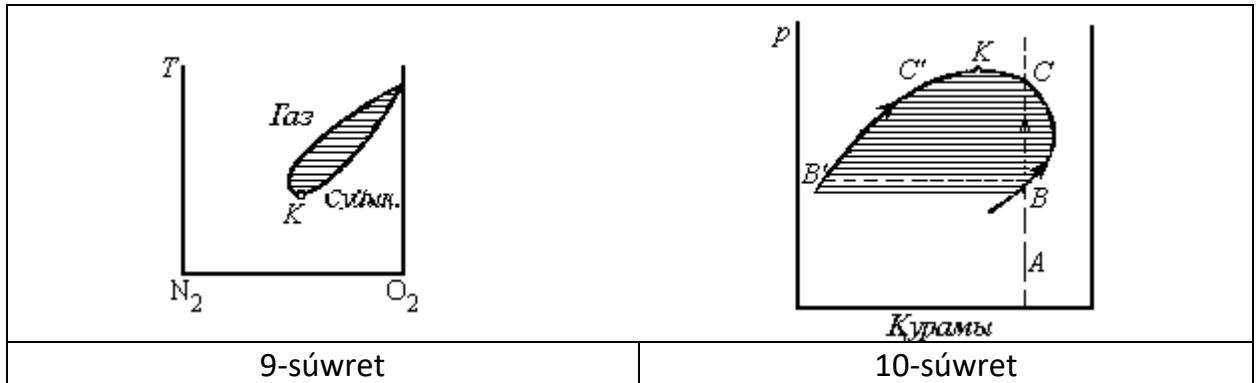
Joqarıda táriyiplengen kubılıslar amelde hár qıylı aralaspalardıń qurawshıların bir birinen ayırıw ushın keń túrde paydalanıladı. *Frakcionlastırılǵan aydaw* dep atalatuǵın usıldıń ideyası suyıqlıqtan kaynap shıqqan puwdıń aralaspasınıń birinshi porciyaların (frakciyaların) jıynawdan hám kondensaciyasınan ibarat. Mısalı spirt penen suwdıń aralaspası qaynaǵanda dáslep puwdıń quramında jeńil qaynaytuǵın spirt suyıqlıqtıń kuramına qaraǵanda kóp boladı. Bul puwdıń birinshi porciyaların qaytadan kondensaciyalap, alıńǵan suyıqlıqtı kaytadan kaynatadı. Usınday jollar menen spirtti suwdan ádewir ayırıw múmkin. 6-súwrette kórsetilgen hal diagramması jaǵdayında processti kóp ret qaytalap principinde aralaspanıń kurawshıların bir birinen pútkilley ayırıp alıw múmkin. Al 7- hám 8-súwretlerde kórsetilgen hal diagrammaları orın alatuǵın jaǵdaylarda tolıq ayırıwdıń orın alıwı múmkin emes. Bul jaǵdaylarda aralaspasınıń dáslepki quramına baylanıslı tek azeotropıq aralaspanı bólip alıw múmkin. Bul jaǵdayǵa joqarıda esletip ótilgen spirt penen suwdıń aralaspası jatadı. Bunday aralaspanıń qaynaw temperaturasınıń eń kishi mánisi spirttiń 95,6 salmaqlıq procentine sáykes keledi. Frakcionlastırılǵan aydaw arqalı spirtti bunnan bılay tazalaw múmkin emes.

§ 83. Keri kondensaciya

Taza zatlardağı suyıqlıq-gaz ótiwi ushın kritikalıq noqattıń bolıwı aralaspalarda da kritikalıq kubılıslardıń orın alıwına alıp keledi. Bul jaǵdaylardağı múmkin bolǵan barlıq variantlardı talqılamay, bul kubılıslardıń tek xarakterli ayırmashılıqların qarap ótemiz.

6-súwrette kórsetilgen kislorod penen azottıń aralaspası ushın hal diagramması 1 atm bolǵan basım ushın dúzilgen. Al aralaspanıń taza qurawshılarınıń biri ushın basım kritikalıq basımǵa jetkenge shekem (bul jaǵdayda dáslep 33,5 atm basımda azot ushın alınıadı, al

kislorod ushın $49,7 \text{ atm}$) diagramma óziniń xarakterin saqlaydı. Bunnan keyin taza azotta fazalarǵa bóliniw múmkin emes bolǵanlıqtan fazalıq diagrammadaǵı sigaranıń vertikalıq kósherden 9-súwrette kórsetilgendey bolıp "ayırılıwınıń" kerek ekenligi óz-ózinen túsiniikli. Bul jerde de kritikalıq noqattıń bar ekenligi suyıqlıq penen gaz ortasında úzliksiz ótiwdiń múmkinshiligin payda etip, bul fazalar arasındadı ayırma jáne de shártli xarakterge iye boladı.



Diagrammada kritikalıq noqattıń bolıwı gaz aralaspasınıń kondensaciyasında da bazı bir kubılıslardıń júzege keliwine alıp keledi. Biz bul qubılıslardı r , s (temperaturanıń berilgen mánisine sáykes keliwshi) koordinatalarındaǵı hal diagrammasında illyustraciyalaymız. Bul jaǵday sol kubılıslardı baklawdıń haqıyqıy sharayatlarına sáykes keledi.

10-súwrette usınday diagrammanıń kritikalıq noqat K ǵa jákin uıastkası sáwlelendirilgen (biz bunnan burın keltirilgen s , T diagrammalardaǵıdan ózgesheligi sonnan ibarat, bul jaǵdayda gaz tárizli fazaǵa shtrixlangan oblasttıń astındaǵı oblast sáykes keledi, bul oblast tómengi basımlarǵa sáykes keledi).

Quramı AS vertikalına sáykes keliwshi aralaspanı qaraymız. Aralaspanı izotermalıq kısıwdıń barısında V noqatına jetkende B' fazasınıń payda bolıwı menen kondensaciya baslanadı. Basım úlkeygende suyıqlıqtıń muǵdarı dáslep úlkeyedi, biraq keyin úlkeyiw kemeyiw menen almasadı. Suyıqlıq (usı momentte S' noqatı menen beriletuǵın suyıqlıq) S noqatına jetkende pútkilley joǵaladı. Bul qubılıs *keri kondensaciya* dep ataladı.

§ 84. Suıyıqlıqlardıń aralaspasınıń qatıwı

Suıyıqlıq penen gazdıń fazalıq diagrammalarında suıyıqlıq penen qattı deneniń de fazalıq diagrammasın súwretlew múmkin. Bul jaǵdayda da biz abscissa kósherine aralaspanıń koncentrasiyasınıń (atomlıq procentlerde), al ordinata kósherine temperaturanıń mánislerin qoyamız ham basımınıń belgili bir mánisi ushın diagrammanı dúzemiz.

Eger eki zat bir biri menen suıyq halda da, qattı halda da ıqtıyarlı túrdegi muǵdarlarda aralasa alatuǵın bolsa, onda alınatuǵın diagramma 82-paragrafta gáp etilgen suıyıqlıq penen gaz ushın dúzilgen hal diagrammaday boladı. Mısalı gúmis penen altınıń quyması 11-súwrette kórsetilgendey fazalıq diagrammaǵa iye boladı. Iymekliklerdiń joqarısındaǵı oblast eki metaldıń da suıyq fazasına, al iymekliklerdiń tómendegegi oblast qattı quymaǵa sáykes keledi. Quymanıń eriw processı 6-súwrette keltirilgen fazalıq diagrammaday diagrammaǵa iye suıyq aralaspanıń kaynaw processine uqsas boladı.

12-súwrette kórsetilgen vismut-kadmiy sisteması ushın kórsetilgen fazalıq diagramma fazalıq diagrammanıń pútkilley baska tipine jatadı. Bul sistemada eki kurawshı da aralas kristallardı payda etpeydi hám bul qásiyet usı sistemanıń xarakterli ózgeshelikleriniń biri bolıp tabıladı.

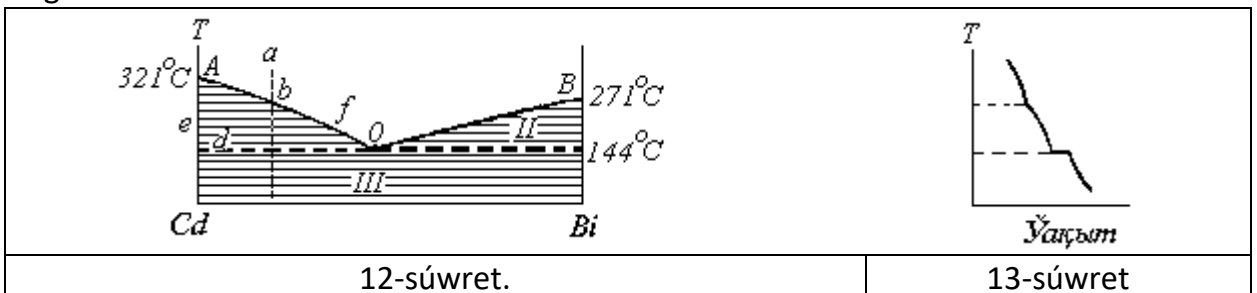


11-súwret.

SHtrixlanbağan oblast suyıq aralaspaǵa tiyisli. Basqa barlıq oblastlar hár qıylı fazalarǵa bóliniw oblastları bolıp tabıladı. I oblastta taza kadmiydiń qattı kristalları eki faza (shep táreptegi vertikalıq kósher menen sáwlelendiriliwshi) hám suyıq aralaspa bolıp tabıladı (AO iymeklighi menen sáwlelendirilgen). Usı oblasttaǵı qanday da bir d noqatında usı noqat arqalı ótiwshi ef tuwrısınıń koordinata kósheri menen (taza kadmiy) hám AO iymeklighi (suyıq aralaspa) menen kesiliw noqatıları menen sáwlenendiriletuǵın fazalar teń salmaqlıqta turadı. Bul fazalardıń muǵdarları de hám df kesindileriniń uzınlıqlarına keri proporcional. Tap sonday jaǵdaylarda II oblastta suyıq eritpe menen (onıń kuramı OV iymeklighi menen anıqlanadı) teń salmaqlıqta turatuǵın vismut qattı faza bolıp tabıladı. III oblastında kadmiy menen vismuttıń qattı kristallarınıń aralaspaı jaylasadı.

A hám V noqatları taza kadmiy menen vismuttıń eriw noqatları bolıp tabıladı. AOV iymeklighi bolsa eki qurawshınıń da suyıq aralaspaınıń qata baslawınıń bası bolıp tabıladı.

Misal ushın quramı ab vertikalı menen anıqlanıwshı suyıq aralaspanıń qatıw processin kóremiz. Qatıw usı vertikaldıń AO iymeklighi menen kesilisiw b noqatınıń temperaturasında baslanadı. Usınıń menen suyıqlıqtan kadmiy kristalları bólinip shıǵa baslaydı. Salqınlatıwdıń barasında suyıq aralaspa vismut penen bayıdı hám onı sáwlelendiriwshi noqat O noqatına jetemen degenshe bo iymeklighi boyınsha tómén qaray qozǵaladı. Bunnan keyin barlıq suyıqlıq qalıp bolmaǵansha temperatura ózgermey qaladı. O noqatınıń temperaturasında suyıqlıqtan qalǵan kadmiy hám vismuttıń barlıǵa da bólinip shıǵadı.



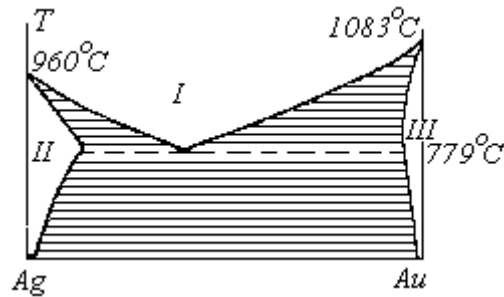
12-súwret.

13-súwret

O noqatı *evtektikalıq noqat* dep ataladı. Bul noqat úsh fazanıń: qattı kadmiydiń, qattı vismuttıń hám suyıq aralaspanıń teń salmaqlıqta turıw noqatı bolıp tabıladı. Evtektikalıq noqatta katatuǵın kristallıq aralaspa eki kurawshınıń mayda kristallarınan turadı (bunday aralaspanı *evtektikalıq aralaspa* dep ataydı). III oblasttaǵı O noqatınan oń tárepte aralaspa da dáslep vismuttıń irirek kristalları kórinedi. Al *shep* tárepte kadmiydiń kristalları kózge túsedı.

13-súwrette (bul súwret arnawlı túrde 12-súwret penen bir katarǵa qoyılǵan) belgili bir quramdaǵı (bul jaǵdayda ab vetrikalina sáykes keliwshi quramdaǵı) suyıqlıq ushın

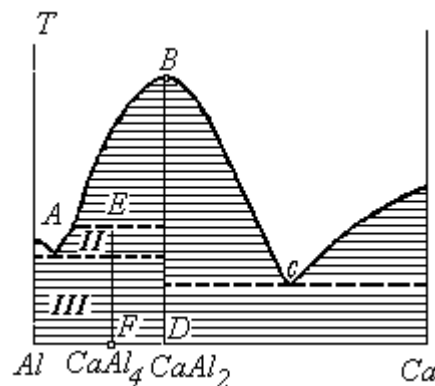
sistemanıń temperaturasın waqıttıń funkciyası sıpatında sáwlelendiriwshi "salqınlaw iymekligi" kórsetilgen. b noqatına jetkende iymeklikte sınıq payda boladı: jıllılıqtıń bólinip shıǵıwı menen júretuǵın qatıwdıń baslanıwı menen salkınlaw biraz ástelenedi. Evtektikalıq noqattıń temperaturasında "jıllılıq toqtawı" orın aladı (quymanıń qatıwınıń turaqlı temperaturada tamamlanıwına sáykes keliwshi iymekliktegi gorizontallıq maydانشa). Usınday salqınlaw iymekliklerin túsiriw *jıllılıq analizi* (termicheskiy analiz) jolı menen fazalıq diagrammalardı dúziw usılınıń tiykarında jatadı.



14-súwret.

14-súwrette gúmis-mıs sisteması ushın fazalıq diagramma keltirilgen. Bul diagrammanıń baska diagrammalardan ayırması sonnan ibarat, bul sistemadaǵı qurawshılardıń biri ekinshisinde tek belgili bir muǵdarda ǵana eriy aladı. Usıǵan baylanıslı diagrammada úsh bir fazalı oblast orın aladı: I suıq aralaspalar oblastı menen bir katarda II Ag degi Cu nıń qattı eritpesi hám III Ag daǵı Cu nıń qattı eritpesi oblastları bar boladı.

Eń aqırında 15-súwrette keltirilgen alyuminiy-kalciy sistemasınıń fazalıq diagrammasın qaraymız. Bul jaǵdayda eki qurashlı qattı eritpelerdi payda etpeytuǵın bolsa da belgili bir ximiyalıq birikpeler orın aladı. Baska sóz benen aytqanda tek anıq bir quram ushın aralas kristallar bar boladı. VD vertikalı CaAl_2 birikpesine sáykes keledi. V noqatı bul birikpeniń eriw noqatı bolıp tabıladı. Bul noqatta AVS iymekligi maksimumǵa iye. Quramı CaAl_4 bolǵan baska birikpe erimesten burın ıdıraydı. Sonlıqtan bul birikpege juwap beretuǵın EG tuwrısı suıq haldıń AV shegarasına shekem kelip jetpeydi. SHtrixlangan oblastlardıń barlıǵı da eki fazaǵa bóliniw oblastı bolıp tabıladı. Bul jerde bir biri menen teń salmaqlıqta turǵan eki faza barlıq waqıtta da gorizontallıq sızıqtıń diagrammanıń jaqın bolǵan sızıǵı menen kesilisiw noqatları arqalı anıqlanadı. Mısalı I oblastta suıqlıq penen CaAl_2 birikpesi kristalları teń salmaqlıqta turadı; II oblastta bolsa suıqlıq hám CaAl_4 birikpesiniń kristalları, III oblastta Al kristalları menen CaAl_4 kristalları teń salmaqlıqta turadı (h.t.b.).



15-súwret.

Jılılıq analizi usılı menen fazalıq diagrammalardı úyreniwdiń anıw yamasa mınaw zatlar arasındaǵı qattı ximiyalıq birikpelerdiń bar ekenligi haqqında maǵlıyamat beretuǵın derek ekenligin ańlawımız kerek. Birikpeniń bar ekenligi eriw iymekliginde maksimumnıń (15-súwrettegi V noqatında) yamasa sınırıń (A noqatındaǵıday) payda bolıwı menen belgili boladı.

Hár qıylı aralaspalardıń fazalıq diagrammaları hár qıylı boladı. Joqarıda táriyiplengen diagrammalar eń ápiwayı diagrammalar qatarına jatadı. Bul diagrammalarda quramalı diagrammalardan da biliw múmkin bolǵan xarakterli qásiyetler menen tiplerdi biliwge boladı.

§ 85. Fazalar qádesi

Ulıwmalastırıw maqsetinde sońǵı eki bapta táriyiplengen fazalıq teń salmaqlıqlardıń qásiyetlerin eske túsiremiz.

Bir zattan turatuǵın bir tekli deneniń jılılıq halı bir birinen ǵárezsiz eki shama bolǵan temperatura T menen basım r mánisleri menen anıqlanadı. Eger bul denege sol zattıń jáne bir fazasın qossaǵ (mısal retinde suwǵa muzdı qosayıq deyik), onda olardıń birge jasawı T menen r nıń qálegen mánislerinde emes, al sol shamalar arasında belgili bir qatnaslar orın alǵanda ǵana ámelge asadı (bul r, T diagrammadaǵı iymeklik penen sáwlelendiriledi). Muz benen teń salmaqlıqta turıw suwdıń hal teńlemesine belgili bir qosımsha shártler qoyadı dep aytıwǵa boladı. Usınıń nátiyjesinde ǵárezsiz shamalardıń sanı ekiden (r hám T) birge (r yamasa T) shekem kemeyedi.

Bir zattıń úsh qurawshısı – suw, muz hám puw r menen T nıń anıq bir mánislerinde, suwdıń muz benen hám suwdıń puw menen teń salmaqlıǵı iymekleriniń kesilisen noqatlarında ǵana tura aladı. Suwǵa jáne bir fazanıń qosılıwı jáne bir qosımsha shárt qoyadı dep aytıwǵa boladı. Usınıń saldarınan bir birinen ǵárezsiz shamalardıń sanı nolge shekem kemeyedi.

Bul ayılǵanlar biz zattıń tórt fazasınıń (mısalı suw, puw hám muzdıń eki fazası) bir biri menen teń salmaqlıqta tura almaytuǵınlıǵın bildiredi. Bunday teń salmaqlıq úsh qosımsha shártlerdiń orınlanıwın talap etken bolar edi. Bizniń iqtıyarımızdaǵı eki r hám T ózgeriwshileriniń járdeminde bunday shártlerdi qanaatlandıırıw múmkin emes.

Endi eki zattan turatuǵın deneni karayıq. Mısal retinde suyıq eritpeni alamız. Onıń halı bir birinen ǵárezsiz bolǵan úsh ózgeriwshi (temperatura T basım r hám koncentraciya s) menen anıqlanadı. Meyli bul eritpe óziniń puwı menen teń salmaqlıqta turǵan bolsın (demek bul puw da eki zattan turadı). Usı jaǵdayǵa baylanıslı qosımsha bazı bir shárt qoyıladı hám eritpeniń halın xarakterlewshi úsh shamalıń tek ekewi iqtıyarlı jáne bir birinen ǵárezsiz bolıp qaladı. Sonlıqtan (mısalı) basım menen temperaturanıń mánislerin iqtıyarlı túrde alǵanda suyıq eritpe menen puwdıń teń salmaqlılıǵınıń orın alıwı múmkin, biraq usınday jaǵdaylarda eritpeniń koncentraciyası (sonıń menen birge puwdıń da koncentraciyası) anıq bir mániske iye bolıwı kerek. Biz usı jaǵdaydı bul bapta fazalıq diagrammalardı qaraǵanımızda ayqın túrde kórdik.

Eger sol eki zattan turatuǵın jáne de bir fazanı qossaǵ taǵı bir qosımsha shárt qosıladı hám tek bir shama ǵana iqtıyarlı ózgeriwshi bolıp qaladı. Sonlıqtan berilgen basımda úsh fazanıń úshewi de tek bir noqatta ǵana – temperatura menen koncentraciyanıń belgili bir

mánislerinde birge jasay aladı. 84-paragafıta gáp etilgen fazalıq diagrammalardaǵı evtektikalıq noqat usınday noqat bolıp tabıladı.

Eń aqırında eki qurawshadıń turatıǵın tórt fazanıń barlıq shamalar bolǵan basımınıń, temperaturanıń hám koncentracıyanıń anıń bir mánislerinde teń salmaqlıqta tura alatuǵınlıǵına kóz jetkeremiz. Al bes yamasa onnan da kóp fazalardıń teń salmaqlıqta turıwı pútkilley múmkin emes.

Bul tastıyıqlawdı qalegen sandaǵı kurawshıǵa iye fazalardıń teń salmaqlıǵı ushın ulıwmalastırıwǵa boladı.

Meyli qurawshılar sanı n , al bir waqıtta jasaytuǵın fazalar sanı r bolsın. Bul fazalardıń birewin qaraymız. Onıń quramı koncentracıyanıń $n-1$ mánisi menen anıqlanadı (mısalı $n-1$ kurawshınıń hár biriniń muǵdarınıń n -qurawshınıń muǵdarına qatnası menen). Sonlıqtan fazanıń halı $n+1$ shama menen anıqlanadı. Olar r , T hám $n-1$ dana koncentracıya. Ekinshi tárepten bul faza $r-1$ faza menen teń salmaqlıqta turıwı kerek, al bal jaǵday hal teńlemesine qosımsha $r-1$ shárt qoyadı. Bul shártlerdiń sanı ózgeriwshilerdiń sanınan artıq bola almaydı, yaǵnıy $n+1$ diń mánisi $r-1$ den úlken yamasa $r-1$ ge teń bolıwı kerek. YAǵnıy $n+1 \geq r-1$. Bunnan

$$r \leq n+2.$$

Solay etip n zattan turatuǵın $n+2$ fazadan artıq fazanıń teń salmaqlıqta turıwı múmkin emes eken. Bul qádeni *fazalar qádesi* dep ataymız.

Eger múmkin bolǵan $n+2$ fazanıń barlıǵı da birge jasaytuǵın bolsa olardıń halların xarakterlewshi barlıq shamalar (r , T hám barlıq fazalardıń koncentracıyaları) anıq mánislerge iye bolıwı kerek. r faza teń salmaqlıqta tursa $(n+1) - (r-1) = n+2 - r$ shamanıń mánisin iqtıyarlı túrde beriw múmkin.

XI BAP

XIMIYALBıQ REAKCIYALAR

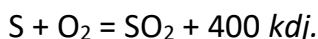
§ 86. Reakciya jıllılıǵı

Bul bap fizikalıq kóz-qarastan ximiyalıq reakciyalardı úyreniwge baǵıshlangan. Biz reakciyaǵa kirisiwshi zatlardıń ximiyalıq ózgesheliginen gárezsiz bolǵan hám barlıq ximiyalıq reakciyalardıń tán bolǵan qásiyetlerdi názerde tutamız.

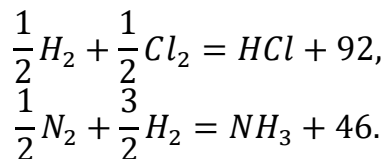
Barlıq ximiyalıq reakciyalar jıllılıqtıń jutılıyay yamasa shıǵarılıyay menen júredi. Birinshi jaǵdayda reakciyanı *endotermalıq*, al ekinshisinde *ekzotermalıq* dep ataydı. Qanday da bir reakciya ekzotermalıq bolsa, oǵan keri bolǵan reakciyanıń endotermalıq bolatuǵınlıǵı óz-ózinen túsiniqli.

Ulıwma alǵanda reakciyanıń jıllılıq effekti onıń qanday sharayatlarda ótip atırǵanlıǵına baylanıslı. Sonlıqtan reakciyanıń jıllılıq effekti haqqında gáp etilgende bul reakciyanıń turaqlı basımda yamasa turaqlı kólemde ótip atırǵanlıǵın ayırıw kerek. Al ámelde bul ayırma onsha úlken emes.

Reakciyanıń jıllılıǵın reakciya teńlemesinde bılayınsha kórsetedi: eger jıllılıq bólinip shıǵatuǵın bolsa, onda jıllılıq muǵdarın oń belgi menen (jıllılıq jutılatuǵın bolsa, onda jutılǵan jıllılıq muǵdarı teris belgisi menen) teńlemenıń jıllılıq bólinip shıǵatuǵın tárepine jazadı. Mısalı

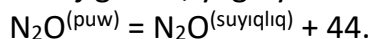


Teńlemesi bir garmm-atom uglerod (grafit) janganda 400 kilodjoullı jıllılıqtıń bólinip shıǵatuǵınlıǵın ańlatadı. Jáne de eki misal keltiremiz:

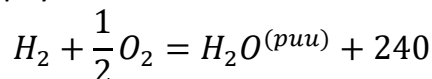


(usı jerde hám endigiden bılay keltiriletuǵın mısallarda reakciyaǵa kirisiwshi zatlardıń moli ushın jıllılıq kilodjoullerde beriledi).

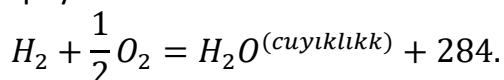
Joqarıda keltirilgen mısallarda barlıq zatlar (grafitten basqası) ójire temperaturasında hám atmosferalıq basımda gaz tárizli halda turadı dep esaplandı. Reakciyaǵa túsiwshi zatlardıń agregat hallarınıń kórsetiliwi kerek, sebebi reakciya jıllılıǵınıń muǵdarı haldan kúshli ǵárezli. Misal retinde gaz tárizli kislorod penen vodorodtan suyıq suw menen puwdıń payda bolıwı jıllılıqları arasındaǵı ayırmanı tabamız. 20°S da suwdıń gramm-molekulasınıń puwlanıw jıllılıǵı 44 kJ ǵa teń, yaǵnıy



Bul teńlikti suw puwınıń payda bolıwı



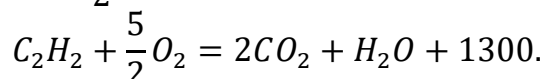
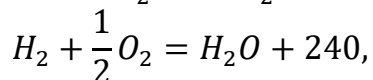
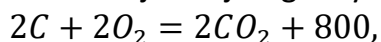
teńlemesinen suyıq suwdıń payda bolıw teńlemesin alamız:



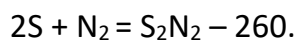
Reakciya jıllılıǵı usı reakciya júretuǵın temperaturaǵa da baylanıslı. Eger reakciyaǵa kirisiwshi zatlardıń jıllılıq sıyımlılıqları belgili bolsa, onda rakciya jıllılıǵın esaplawdı bir temperaturadan ekinshi temperaturaǵa ótkeriw bir agregat haldan ekinshi agregat halǵa ótkende islegen eeaplawlarımızday ańsatlıq penen ámelge asırıladı. Bunıń ushın reakciyaǵa kirisiwshi zatlardıń barlıǵın da bir temperaturadan ekinshi temperaturaǵa shekem qızdırıw ushın kerek bolatuǵın jıllılıqtı esaplaw kerek.

Eger birinen keyin biri bir neshe reakciya júretuǵın bolsa, onda energiyanıń saqlanıw nızamınan barlıq reaksiyalardıń jıllılıq effektiniń izbe-iz bolatuǵın hár bir reaksiyanıń jıllılıq effektleriniń qosındısınan turatuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Qala berse, eger bizde bazı bir zatlar bolıp, olar bir qatar aralıqlıq reaksiyalardıń nátiyjesinde basqa zat alınatuǵın bolsa, onda qosındı jıllılıq effekti reaksiyalardıń qanday aralıqlıq stadiyalardan ótkenligine ǵárezli emes bolıp shıǵadı.

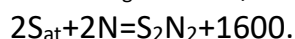
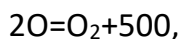
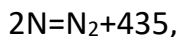
Usı qádeniń járdeminde (dara jaǵdayda) ótiwi múmkin bolmaǵan reaksiyalardıń da jıllılıǵın esaplaw múmkin. Misal retinde uglerod (grafit) hám vodorod atomlarınan tikkeley $2S+N_2=S_2N_2$ reaksiyasında acetilenniń alınıw jıllılıǵın esaplaymız. Bul reakciya usınday tuwrı jol menen júrmeydi hám praktikada acetilen basqa jol menen alınadı. Sonlıqtan onıń jıllılıq effektin ólshew múmkin emes. biraq bul jıllılıqtı tikkeley ólshenetuǵın uglerodtıń, vodorodtıń hám acetilenniń óziniń janıw jıllılıǵı boyınsha esaplawǵa boladı:



Birinshi eki teńlikti bir birine aǵzama-aǵza qosıp hám onnan úshinshini alıp taslasaq mınanı aldamız:



Elementlerden olardıń birikpeleriniń alınıw jıllılıǵı olardıń hallarınan ǵárezli boladı. Fizika ushın tábiyiy túrdegi elementlerden zatlardıń alınıwını jıllılıǵı emes, al tikkeley atomlardan alınıwınıń jıllılıǵı úlkenirek áhmiyetke iye. Bul birikpeniń ishki energiyasın esaplawǵa mumkinshilik beredi hám dáslepki zatlardıń hallarınan ǵárezli emes. Bir neshe mısallar keltiremiz:



Elementlerden birikpelerdiń alınıw reakciyalarınıń oń bolıwı da, teris bolıwı da mmkin. Al atomlardan birikpelerdiń alınıw jıllılıǵı barlıq wıqıtta da oń mániske iye. Qarama-qarsı jaǵdaylarda alınǵan birikpe turaqsız, al reakciyanıń júriwi júzege kelmegen bolar edi.

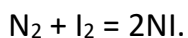
§ 86. Ximiyalıq teń salmaqlıq

Ximiyalıq reakciyanıń júriw barısında dáslepki zatlardıń muǵdarı kemeyedi hám reakciyanıń ónimi kóbeyedi. Aqır-ayaǵında reakciya barlıq zatlardıń muǵdarları ózgermeytuǵınday halǵa alıp keledi. Bul hal *ximiyalıq teń salmaqlıq* dep ataladı hám jıllılıq teń salmaqlıǵınıń kórinisleriniń biri bolıp tabıladı.

Ulıwmalastırıp aytqanda ximiyalıq teń salmaqlıqta reakciyanıń nátiyjesinde alınǵan zatlar menen birge dáslepki zatlardıń da belgili bir muǵdarı saqlanıp qaladı. Kópshilik jaǵdaylarda saqlanıp qalǵan zatlardıń muǵdarları oǵada kishi bolsa da, bul jaǵday máseleniń principiallıq tárepin ózgermeydi.

Dáslepki zatlar hám reakciyanıń nátiyjesinde payda bolǵan zatlar arasında ximiyalıq teń salmaqlıqtıń ornawı tómendegidey sebeptiń saldarınan boladı.

Mısal ushın gaz tárizli vodorod penen yod arasındagı yodlıq vodorod payda bolatuǵın reakciyanı qaraymız:



N_2 menen I_2 dan NI diń payda bolıwı menen keri bolǵan processte júredi (NI diń vodorod penen yodqa ıdırawı): tuwrı reakciya menen bir waqıtta keri reakciya da júredi. NI diń muǵdarınıń artıwı hám N_2 menen I_2 niń muǵdarlarınıń kemeyiwı menen tuwrı reakciya ástelenedi, al keri reakciya tezlenedi. Aqır-ayaǵında eki reakciyalardıń tezlikleri teńdey bolatuǵın moment júzege keledi: qanshama jana NI molekulası payda bolsa, sonshama NI molekulası ıdıraydı; bunnan keyin barlıq zatlardıń muǵdarları ózgermey qaladı.

Solay etip molekualıq kóz-qarastan (qala berse jıllılıq teń salmaqlıǵınıń basqa da túrleri) qozǵalmalı xarakterge iye – reakciyanıń júriwi toqtamaydı hám tuwrı jáne keri reakciyaları bir birin kompensaciyalawshı tezlikler menen júredi.

Álbette, biz joqarıda kórgen misalda reakciya vodorod penen yiodtıń aralaspasınan baslanǵan jaǵdayda payda bolatuǵın teń salmaqlıq haldaǵı sol úsh zattıń salıstırmalı muǵdarları NI ıdıraǵan jaǵdayda payda bolatuǵın teń salmaqlıq halda alınatuǵın sol úsh

zattiń salıstırmalı muǵdarlaı menen birdey boladı. Ximiyalıq teń salmaqlıqtıń tutqan ornı usı teń salmaqlıqqa qay tárepten jetkenge pútkilley baylanıssız.

Joqarıda aytılganlar menen birge ximiyalıq teń salmaqlıq reaksiyalardıń júriw sharayatlarına hám qanday arılıqlıq etaplar arqalı ótkenliginen pútkilley ǵárezsiz. Teń salmaqlıqtıń tutqan ornı usı teń salmaqlı halda zattiń kanday halda turǵanlıǵına (teń salmaqlıq aralaspanıń temperaturasına hám basımına) baylanıslı.

Temperaturanıń ózgeriwi menen ximiyalıq teń salmaqlıqtıń turǵan ornı da ózgeredi. Bul ózgeristiń baǵıtı reaksiyanıń jıllılıq effekti menen tıǵız baylanıslı. Bunıń durılıǵına Le SHatale principi tiykarında ańsat iseniwge boladı. Qanday da bir ekzotermalıq reaksiyanı, mısalı azot penen vodorodtan ammiaktıń payda bolıw reaksiyasın ($N_2 + 3H_2 = 2NH_3$) qaraymız. Reakciya teń salmaqlıq halǵa jetti dep boljayıq hám teń samaqlıqta turǵan aralaspanı qızdırayıq. Bunday jaǵdayda aralaspada onı salqınlatıwǵa baǵdarlangan processlerdiń júriwi kerek: ammiaktıń bazı bir muǵdarınıń ıdırawı hám usınıń saldarınan jıllılıqtıń jutılıwı kerek. Bul ximiyalıq teń salmaqlıqtıń ammiaktıń muǵdarınıń kemeyiw baǵıtında jılısatuǵınlıǵın bildiredi.

Solay etip ekzotermalıq reaksiyalardıń "ónimi" temperatura joqarılaǵanda kemeyedi, al endotermalıq reaksiyalardıń óniminiń muǵdarı temperatura joqarılaǵanda artadı.

Teń salmaqlıqtıń turǵan ortınıń basımnan ǵárezziligi de reakciya júretuǵın qolemniń ózgeriwi menen tap sonday baylanıslı. Basımniń artıwı reaksiyalanıwshı aralaspanıń kólemniń úlkeyiwi menen júretuǵın reaksiyalardıń ónimin kemeytedi hám kólemniń kishireyiwi menen júretuǵın reaksiyalardıń ónimin arttıradı. Keyingi jaǵday (mısalı) gaz tárizli ammiaktıń payda bolıwında orın aladı: payda bolatuǵın NH_3 molekularınıń sanı reakciyaǵa kirisiwshı N_2 hám H_2 molekularınıń sanınan kishi bolǵanlıqtan reakciyadaǵı gaz aralaspasınıń kólemi kemeyedi.

§ 87. Tásir etiwshi massalar nızamı

Endi ximiyalıq teń salmaqlıq púsinigine sanlıq formulirovka beremiz. Dáslep gaz aralaspasındaǵı ximiyalıq reaksiyanı qaraymız, bul jerde reakciyaǵa katnasıwshı barlıq zatlar gaz tárizli halda turadı.

Misal retinde jáne de NI tırnı payda bolıw reaksiyasın qaraymız. Vodorod penen yod arasındaǵı reakciya N_2 hám I_2 molekuları bir biri menen soqlıǵısqanda júredi. Sonlıqtan NI diń payda bolıw reaksiyasınıń tezligi (yaǵnıy 1 sek ta payda bolatuǵın NI molekuları sanı) usınday soqlıǵısıwlarıń sanına proporcional. Al bul óz gezeginde aralaspadaǵı vodorod penen yodtıń tıǵızlıqlarına, yaǵnıy 1 sm^3 kólemdegi molekular sanına proporcional. Gazdıń tıǵızlıǵı bolsa onıń basımına proporcional. Sonlıqtan NI diń payda bolıw reaksiyasınıń tezligi aralaspadaǵı bul gazlerdiń parciallıq basımlarına, yaǵnıy $k_1 p_{H_2} p_{I_2}$ kóbeymesine proporcional. Bul jerdegi k koefficienti tek temperaturadan ǵárezdi. Tap sol sıyaqlı NI molekularınıń ıdıraw reaksiyasınıń tezligi usı molekularardıń bir biri menen soqlıǵısıw sanına proporcional hám soǵan sáykes NI diń aralaspadaǵı parciallıq basımınıń kvadratı bolǵan $k_2 p_{HI}^2$ shamasına proporcional.

Teń salmaqlıqta tuwrı hám keri reaksiyalardıń tezlikleri birdey

$$k_1 p_{H_2} p_{I_2} = k_2 p_{HI}^2.$$

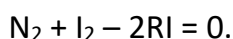
$k_2/k_1 = K(T)$ dep belgilep

$$\frac{p_{H_2} p_{I_2}}{p_{HI}^2} = K(T)$$

ekenligine iye bolamız. Bul teńlik teń salmaqlıq halındaǵı barlıq úsh gazdıń parciallıq basımların bir biri menen baylanıstıradı. $K(T)$ shaması berilgen reakciya ushın *teń salmaqlıq konstantası* dep ataladı. Bul koefficienttiń mánisi reakciyaǵa kirisiwshi zatlardıń muǵdarınan ǵárezli emes. Joqırda keltirilgen formala menen ańlatılǵan baylanıs *tásir etiwshi massalar nızamı* dep ataladı.

Bul nızam gazler arasındaǵı qálegen reakciya ushın joqarıda ketirilgendey etip jazıladı. Ulıwma túrde bul nızam tómendegidey táqlette jazılıwı múmkin.

Reakciyanıń ximiyalıq teńlemesinde barlıq aǵzalar dı shártli túrde teńlemenıń bir tárepinen ótkeriw múmkin. Mısalı



Ulıwma túrde barlıq rakciyalardı bilayınsha jazıw múmkin:

$$\nu_1 A_1 + \nu_2 A_2 + \dots = 0.$$

Bul ańlatpada A_1, A_2, \dots ler arqalı reakciyaǵa kirisiwshi zatlardıń simvolları berilgen, al n_1, n_2, \dots ler bolsa oń yamasa teris pútın sanlar (mısalı jazılǵan mısalda $\nu_{N_2} = \nu_{I_2} = 1$, $\nu_{HI} = -2$). Bunday jaǵdayda tásir etiwshi massalar nızamı bilayınsha jazıladı

$$p_1^{\nu_1} p_2^{\nu_2} \dots = K(T).$$

Bul jerde r_1, r_2, \dots ler arqalı hár qaylı gazlerdiń parciallıq basımları belgilengen.

Parciallıq basımlarǵa qaraǵanda aralaspadaǵı zatlardıń koncentraciyaların paydalanıǵan jiyi túrde qolaylıraq bolıp shıǵadı. Aralaspadaǵı i-zattıń koncentraciyasın $s_i = N_i/N$ formulasınıń járdeminde onıń molekularınıń sanı N_i diń aralaspadaǵı barlıq molekular sanı N ge qatnası túrinde jazamız (yamasa onıń molleriniń mollerdiń tolıq sanına qatnası, bári bir). Gaz aralaspasınıń tolıq basımı $r = NkT/V$ (V arqalı aralaspasınıń kólemi belgilengen), al parciallıq basım $r_i = N_i kT/N$ bolǵanlıqtan

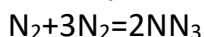
$$r_i = s_i r.$$

Bul ańlatpalardı tásir etiwshi massalar nızamınıń teńlemesine qoyıp mına formulanı alamız:

$$s_1^{\nu_1} s_2^{\nu_2} \dots = K(T) r^{-(\nu_1 + \nu_2 + \dots)}.$$

Bul teńleme barlıq zatlardıń teń salmaqlıq koncentraciyaların bir biri menen baylanıstıradı. Bul teńlemenıń oń tárepinde turǵan shama da teń salmaqlıq konstantası dep ataladı. Biraq endi ol tek temperaturaǵa ǵana emes, al basımǵa da ǵárezli bola aladı. Eger tek $\nu_1 + \nu_2 + \dots = 0$ bolǵanda ǵana basımǵa ǵárezlilik orın almaydı (yaǵnıy reakciya molekularlardıń tolıq sanın ózgerťpese, mısalı $N_2 + I_2 = 2HI$ reakciyasında).

Al, mısalı, ammiaktıń payda bolıw reakciyası



jaǵdayında bolsa mınaǵan iye bolamız:

$$\frac{c_{N_2} * c_{H_2}^3}{c_{NH_2}^2} = \frac{K(T)}{p^2}.$$

Basım úlkeygende bul teńlemenıń oń tárepi kishireydi, sonlıqtan teńlemenıń shep tárepiniń de kemeyiwi kerek. Basqa sóz benen aytqanda biziń joqarıda Le SHatale principi tiykarında tapqanımızday, dáslepki zatlardıń teń salmaqlıq koncentraciyası kishireydi hám ammiaktıń koncentraciyası úlkeyedi. Biz jáne bul reakciyanıń óniminiń temperatura joqarılaǵanda kemeyetuǵınlıǵın kórdik. Endi biz temperatura kóterilgen jaǵdayda teń salmaqlıq konstantası $K(T)$ da úlkeyedi dep ayta alamız.

Joqarıda bayanlangan tásir etiwshi massalar nızamın keltirip shıǵarıw boyınsha mınaday eskertiw kerek boladı. Biziń talqılawlarımızda reakciyanıń barısı ximiyalıq teńlemede sáwlelenedi dep boljandı. Nı diń payda bolıw reakciyasında tap usı jaǵday orın aladı, biraq kópshilik reakciyalar olardıń teńlemelerinen kútilgenindey pútkilley basqasha ótedi (mısalı ammiaktıń molekulasınıń payda bolıwı N_2 molekulasınıń úsh N_2 molekulası menen soqlıǵıswdıń nátiyjesinde payda bolmaydı). Reakciyanı bir teńleme menen sáwlelendiriw bir qatar aralıqlıq etaplardıń qosındsınan turatuǵın maǵlıwmat bolıp tabıladı hám sonlıqtan bul maǵlıwmatta tek zattıń baslanǵısh hám aqırǵı halları dıqqatqa alınadı (bul haqqında bul bapta jáne de gáp etiledi). Biraq ximiyalıq teń salmaqlıqtıń qásiyeti mene olardı táriyipleytuǵın tásir etiwshi massalar nızamı reakciyanıń haqıyqıy mexanizminen ǵárezli emes.

Tásir etiwshi massalar nızamınıń qollanılıwın illyustraciyalaw sıpatında vodorodtıń dissociaciya reakciyasın ($N_2 = 2N$) mısılın akırına shekem tallaymız hám teń salmaqlıqta jetiw múmkin bolǵan dissociaciya dárejesin anıqlaymız. Meyli (N túrindegi de, N_2 túrindegi de) vodorod atomlarınıń tolıq sanı A bolsın. Dissociaciya dárejesi x tı atom túrindegi vodorodtıń (onı N_N arqalı belgileyemiz) atomlardıń tolıq sanı A ǵa qatnası túrinde anıqlaymız. Onda

$$N_H = Ax, N_{H_2} = \frac{A(1-x)}{2}, N = N_H + N_{H_2} = \frac{A(1+x)}{2}.$$

Usı shamalar arqalı koncentraciyalar s_N penen c_{H_2} tı ańlatıp hám tásir etiwshi massaları nızamınıń teńlemesine qoyıp mınanı alamız

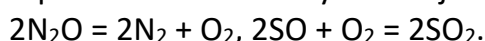
$$\frac{c_{H_2}}{c_H^2} = \frac{1-x^2}{4x^2} = pK.$$

Bunnan

$$x = \frac{1}{\sqrt{1+4pK}}.$$

Bul ańlatpa arqalı, mısalı, dissociaciya dárejesiniń basımnan ǵárezliligi nızamı anıqlanadı.

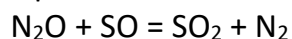
Eger gaz aralaspada hár qıylı bolǵan bir neshe reakciya júretuǵın bolsa, onda tásir etiwshi massalar nızamın hár bir reakciyaǵa bólek óz aldına qollanıw kerek. Mısalı N_2 , O_2 , SO , SO_2 , N_2O gazleriniń aralaspasında mına reakciyalardıń júriwi múmkin:



Olar ushın

$$\frac{p_{H_2O}^2}{p_{H_2}^2 p_{O_2}} = K_1, \quad \frac{p_{CO}^2}{p_{CO_2}^2} = K_2$$

ańlatpalarına iye bolamız hám ximiyalıq teń salmaqlıq halı usı teńlemelerdi birgelikte sheshiw arqalı anıqlanadı. Bul aralaspada



túrindegi basqa da reakciyalardıń ótiwiniń múmkin ekenligin ańǵaramız. Biraq bul reakciyanı itibarǵa almasaqta boladı. Sebebi bul reakciya joqarıda jazılǵan eki reakciyanıń qosındısına alıp klinedi hám tásir etiwshi massalar nızamı ol teńleme ushın sol eki teńlemenıń kóbeymesi bolǵan teńlemenı barga bolar edi.

Endi gazlerden basqa qattı dene de katnasatuǵın reakciyanı qaraymız. Qattı dene menen gaz arasındadıǵı reakciya gaz molekulaları qattı deneniń betine kelip urılǵanda júre aladı. Bettıń 1 sm^2 da júretuǵın reakciyanı qaraymız. Gaz molekulalarınıń usı bet penen soqlıǵısw sanı tek gazdıń tıǵızlıǵına ǵárezli bolıp, qattı deneniń muǵdarına baylanıslı emes.

Usıǵan sáykes deneniń 1 sm² bettindegi reakciyanıń tezligi tek gazdıń parciallıq basımlarınan ǵárezli boladı hám qattı deneniń muǵdarına baylanıslı emes. Usınnan tásir etiwshi massalar nızamınıń qattı deneler qatnasatuǵın reakciyalar ushın da durıs ekenligi durıslıǵı túsinikli boladı. Ayırma sonnan ibarat, bul jaǵdayda teńlemede tek gazlerden koncentraciyaların kórsetiw hám qattı deneniń muǵdarın esapqa almaw kerek. Al qattı deneniń qásiyetleri teń salmaqlıq konstantasınıń temperaturalıq ǵárezliligine tásir etedi.

Mısalı hák tastan uglekislotalı gazdıń bólinip shıǵıw



reakciyasında tek SO₂ gaz bolıp tabıladı, al kalciy okisi SaO qattı túrde qaladı. Sonlıqtan tásir etiwshi massalar nızamı ápiwayı túrde mınanı beredi:

$$p_{\text{CO}_2} = K(T).$$

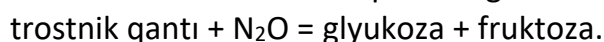
Bul teń salmaqlıq halda (berilgen temperaturada) hák tasınıń ústinde belgili bir parciallıq basımǵa iye uglekislotalı gazdıń bolatuǵınlıǵın bildiredi hám hák tastan uglekislotalı gazdıń bólinip shıǵıwınıń puwlanıwǵa uqsaslıǵı ózine dıqqatı awdaradı: puwlanıwda da deneniń betiniń ústinde gaz turadı, bul gazdıń basımı tek temperatura menen anıqlanadı hám puwdıń da, basqa deneniń de muǵdarına baylanıslı emes.

Eger eritpe ázzi bolsa tásir etiwshi massalar nızamın eritpe ishindegi zatlar arasındaǵa reakciyalar ushın da paydalanıw múmkin. Bul jerde de 80-paragrafta ǵáp etilgen gazlerdiń qásiyetleri menen ázzi eritpelerdiń qásiyetleri arasındaǵı uqsaslıq jáne de kórinedi. Gazlerdegi reakciyaolar ushın tásir etiwshi massalar nızamınıń keltirilip shıǵarılıwı molekalalar arasındaǵı soqlıǵısıwları esaplawǵa tiykarlanǵan. Tap usınday esaplawdı eritpedegi reakciya ushın da islewge boladı. Reakciyaǵa kirisiwshi molekulalardıń bos keńislikte emes, al bazı bir ortalıqta (eritkishte) turǵanlıǵı tek teń salmaqlıq konstantasınıń temperaturadan hám basımnan ǵárezliligine tásir etedi. Sonlıqtan

$$s_1^{v_1} s_2^{v_2} \dots = K(r, T)$$

tásir etiwshi massalar nızamında K nıń temperaturadan da, basımnan da ǵárezliligi belgisiz bolıp qaladı. Endi bul teńlemedegi s_1, s_2, \dots koncentraciyaları eritkishtiń belgili bir muǵdarına (yamasa kóleminiń birligine) sáykes keliwshi erigen zatlardıń muǵdarı sıpatında anıqlanadı.

Tap sol sıyaqlı forma tek ǵana erigen zatlar emes, al eritkishtiń ózi de qatnasatuǵın reakciyalar ushın da durıs boladı. Mısalı trostnik qantınıń gidrolizi reakciyası tap usınday:



Bunday reakciya qanntıń suwdaǵı eritpesinde orın aladı. Suw molekulalarınıń sanı qant molekulalarınıń sanınan ádewir kóp bolǵanlıqtan (eritpeni ázzi dep boljaymız) reakciyanıń barısında suwdıń konsentraciyası ámeliy jaqtań ózgermey qaladı. Sonlıqtan tásir etiwshi massalar nızamınıń ańlatpasına tek erigen zatlardıń koncentraciyaların jazıw kerek:

$$\frac{[\text{trostnik_kantı}]}{[\text{glyukoza}][\text{fruktoza}]} = K(T, p)$$

(kvadrat qawsırmalarda mollik koncentraciyalar – bir litr suwdaǵı berilgen zattıń molleriniń sanı berilgen).

§ 88. Kúshli elektrolitler

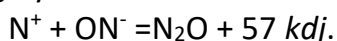
Zatlardıń bir qatarı erigende eritkish ishinde molekular túrinde emes, al molekularlardıń zaryadlangan bólimi – ionlar túrinde jasaydı (oń zaryadlangan ionlardı *kationlar*, al teris zaryadlangan ionlardı *anionlar* dep ataydı). Bunday zatlardı *kúshli elektrolitler* dep ataydı. Ionlar túrinde erigen zatlar haqqında gáp etkende olardı erigende *dissociaciyağa* ushıraydı, al qubılıstıń ózin *elektrolitlik dissociaciya* dep ataydı.

Derlik barlıq duzlar, bazı bir kislotalar (mısalı NSI, NVr, HI, HNO₃), bazı bir tiykarlar (NaOH, KOH) lar suwda erigende *kúshli elektrolitler* payda etedi. Duzlarda metall kation, al kisloqa qaldıǵı anion bolıp tabıladı (mısalı NaCl → Na⁺ + Cl⁻). Kislotalar kation N⁺ hám anion – kisloqa qaldıǵına dissociaciyalanadı (mısalı HNO₃ → N⁺ + NO₃⁻). Al silteler bolsa metallıq kation menen ON⁻ anionına dissociaciyalanadı (NaOH → Na⁺ + ON⁻, ON⁻ bolsa *gidroksil* dep ataladı).

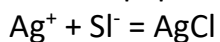
Elektrolitlik dissociaciya qubılısı basqa da eritkishlerde baqlanadı. Biraq ol suwdaǵı eritpelerde *kúshli túrde* kórinedi.

Eger suwda bir waqıtta qanday da eki *kúshli elektrolit* erigen bolsa (mısalı NaCl hám NVr), onda qaysı elektrolittiń eritpesi (NaCl tiki me yamasa NVr tiki me?) haqqında aytıw mániske iye bolmaydı. Haqıykatında eritpede ayırım K⁺, Na⁺, Cl⁻, Vr⁻ ionları boladı. Sonlıqtan bunday eritpeni hám NaCl dıń hám NVr dıń eritpesi dep aytıwǵa bolar edi. Biraq olardıń ekewi de mazmunǵa iye emes.

Haqıyqatında pútin molekular bolmaytuǵın bolǵanlıqtan eritpede *kúshli elektrolitler* arasındǵı reakciyalarda tek ayırım ionlar qatnasadı. Sonlıqtan *kúshli elektrolitler* arasındǵı reakciyanıń jıllılıǵı reakciyaǵa tikkeley qatnasatuǵın ionlarǵa gárezli bolıp, eritpede jáne qanday ionlardıń bar ekenligine baylanıslı emes (álbette eritpe ázzi bolsa). Mısal retinde *kúshli kislotalar*dı silti menen neytrallastırıw reakciyasın qarayıq. Jáne bir mısál retinde NaON tıń NSI menen neytralizaciyasın NaON + RSI = NaSI + N₂O dep jazıw dál emes ekenligin aytıp ótemiz. Haqıyqatında reakciyada tek N⁺ hám ON⁻ ionları qatnasadı hám olar suwdı (N⁺ + ON⁻ = N₂O) payda etedi. Metal menen kisloqa qaldıǵınan gárezsiz bul reakciyanıń barlıq *kúshli kislotalar* hám silteler ushın birdey ekenligi óz-ózinen túsinikli. Sonlıqtan bul reakciyanıń jıllılıǵı qálegen *kúshli kislotanı* qálegen *kúshli silti* menen neytrallastırıw ushın birdey bolıp tabıladı. Kislotanıń 1 moli menen siltiniń 1 moli ushın reakciya jıllılıǵı 57 *kdj* ǵa teń, yaǵnıy



Az eriytuǵın *kúshli elektrolittiń* toyıǵan eritpesin qaraymız (mısál retinde suwdaǵı AgCl dıń eritpesin alamız). Toyınıw túsiniginiń anıqlaması boyınsha bul eritpe qattı AgCl menen teń salmaqlıqta turadı. Bul teń salmaqlıqtı



Reakciyasınıń ximiyalıq teń salmaqlıǵı dep karawǵa boladı. Bul jerdegi Ag⁺ ham SI⁻ eritpede jaylasadı, al AgCl qattı halda boladı. Sonıń menen birge 1 *sek* dawamında AgCl dıń kansha molekulası eritpege ótse, tap sonshama molekula eritpedegi ionlardıń birigiwi nátiyjesinde tómengen shógedi. Ekinshi tárepten eritpe hálisiz bolǵanlıqtan (sebebi AgCl dıń erigishligi tómegen) tásir etiwshi massalar nızamın qollanıw múmkin. Bul nızamda tek erigen zatlardıń koncentraciyasın esapqa alıwdıń kerekligin eske túsirsek

$$[\text{Ag}^+][\text{Cl}^-] = K$$

ekenligine iye bolamız. Bul jerde kvadrat qawsırmalarda kollik koncentraciyalar berilgen (suwdıń 1 litrindegi moller sanı). K turaqlısı (bul turaqlı álbette temperaturanıń funkciyası

bolıp tabıladı) berilgen elektrolit ushın *erigishliktiń kóbeymesi* dep ataladı. AgCl ushın ójire temperaturasında $K=1 \cdot 10^{-10} \text{ (mol/l)}^2$, NaSO_3 ushın $K=1 \cdot 10^{-8} \text{ (mol/l)}^2$.

Solay etip az eriytuǵın kúshli elektrolittiń toyınǵan eritpesindegi anionlar menen kationlardıń koncentraciyalarınıń kóbeymesi turaqlı shama boladı eken. Eger suwda AgCl dan basqa Ag yamasa Cl dıń ionlarına iye hesh bir duz erimegen bolsa, onda $[\text{Ag}^+]$ hám $[\text{Cl}^-]$ dıń koncentraciyaları xlorlı gúmistıń erigishligi s_0 ge teń boladı. Bunnan

$$K = s_0^2$$

ekenligi kelip shıǵadı.

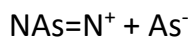
Meyli, endi AgCl dıń toyınǵan eritpesine (jaqsı eriytuǵın) duz kislotasınıń qanday da bir basqa duzınıń (mısalı NaCl) belgili bir muǵdarı qosılǵan bolsın. Bunday jaǵdayda AgCl nıń belgili bir muǵdarı eritpeden shóǵındı túrinde bólinip shıǵadı. Hakiyqatında da NaCl dı qosıw Cl^- ionlarınıń koncentraciyasınıń úlkeytedi, al Ag^+ ionlarınıń koncentraciyası bolsa ózgerissiz kaladı. Sonlıqtan $[\text{Ag}^+][\text{Cl}^-]$ kóbeymesiniń turaqlı bolıp qalıwı ushın belgili bir muǵdardaǵı AgCl dıń eritpeden bólinip shıǵıwı kerek.

§ 89. Hálsiz elektrolitler

Kúshli elektritler menen bir katarda erigende dissociaciyalanatuǵın, biraq az dissociaciyalanatuǵın zatlar da bar. Bunday zatlardıń eritpesinde ionlar menen bir katarda neytral molekullar da boladı. Bunday zatlardı *ázzi elektrolitler* dep ataymız.

Suwdaǵı hálsiz elektrolitler qatarına kislotalardıń kópshiligi hám bazı bir duzlar kiredi (mısalı HgCl_2).

Hálsiz elektrolitlerdiń hálsiz eritpelerine tásir etiwshi massalar nızamın qollanıw múmkin. Mısal ushın suwda



teńlemesine sáykes dissociaciyalanıwshı uksus kislotasınıń (H_3SO_4) eritpesin qaraymız. Bul teńlemedegi Ac belgisi kislota qaldıǵı H_3SO_4 nı ańlatadı. Dissociaciya teń salmaqlıq halı ornaǵansha júredi, al teń salmaqlıq halda ionlardıń koncentraciyası

$$\frac{[\text{Ac}^-][\text{H}^+]}{[\text{HAc}]} = K$$

teńlemesi menen ańlatıladı. Bul jerde K arqalı *dissociaciya konstantası* dep atalatuǵın konstanta belgilengen. Mısal ójire temperaturalarında uksus kislotası ushın $K=2 \cdot 10^{-5} \text{ mol/l}$.

Dissociaciya reakciyası endotermalıq bolıp tabıladı, yaǵnıy jıllılıqtıń jutılıwı menen baylanıslı. Basqa endotermalıq reakciyalardaǵı sıyaqlı temperatura joqarılaǵanda onıń "ónimi" artadı, yaǵnıy dissociaciya konstantası ósedi.

Dissociaciya konstantası erigen elektrolittiń muǵdarına ǵárezli emes (eritpe hálsiz bolǵan jaǵdaylarda) hám onıń tiykarǵı xarakteristikası bolıp tabıladı. Al *dissociaciya dárejesi* (yaǵnıy ıdıraǵan molekullar sanınıń elektrolittegi barlıq molekullar sanına qatnası) eritpeniń koncentraciyasınan ǵárezli.

Meyli 1 l suwda elektrolittiń s moli erigen bolsın. Dissociaciya dárejesin α arqalı belgileybiz. Bunday jaǵdayda dissociaciyalanǵan molekullardıń sanı $s\alpha$ ge teń. Eger elektrolittiń molekulası bir anion menen bir kationǵa ıdıraytuǵın bolsa (uksus kislotası mısalındaǵıday) onda olardıń hár biriniń koncentraciyası $s\alpha$ ge teń boladı.

Dissociaciyanıń baǵan molekulardıń koncentracıyası bolsa $s(1-\alpha)$ ge teń. Demek tásir etiwshi massalar nızamı mınanı beredi:

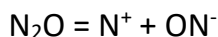
$$\frac{\alpha^2}{1-\alpha} s = K.$$

Bunnan eritpeniń koncentracıyası arqalı anıqlanǵan dissociaciya dárejesin tabamız:

$$\alpha = \frac{-K + \sqrt{K^2 + 4Ks}}{2s} = \frac{2K}{K + \sqrt{K^2 + 4Ks}}.$$

Bul formuladan koncentracıya kemeygende dissociaciya dárejesi s nıń úlkeyetuǵınlıǵı hám sheksiz suylıǵanda (yaǵnıy $s \rightarrow \infty$ de) birge umtılatuǵınlıǵı kórinip tur. Solay etip eritpe kóbirek eritpe qanshama suytılǵan bolsa elektrolit kúshlirek dissociaciylanǵan boladı. Bul bolsa molekularıń dissociacıyasınıń barlıq ornılarda da suw molekularınıń tásirinde júretuǵınlıǵınıń birden bir nátiyjesi bolıp tabıladı. Al keri rekombinacıyanıń bolıwı ushın hár qıylı bolǵan eki ionlardıń bir birine jaqın keliwi kerek. Bunday waqıya suytılǵan eritpelerde júdá siyreke júzege keledi.

Suwdıń ózi júdá ázzi elektrolit bolıp tabıladı. Onıń molekularınıń bazı bir (oǵada az) bólegi



teńlemesine sáykes dissociaciylanǵan. Usınıń menen birge N_2O nıń ózi N^+ hám ON^- ionlarına qatnası boyınsha eritkish bolıp tabılatuǵın bolǵanlıqtan tásir etiwshi massalar nızamınıń formulasında tek bul ionlardıń koncentracıyaların jazıwımızdıń kerek ekenligin biz bilemiz:

$$[\text{H}^+][\text{OH}^-] = K.$$

taza suw ushın 25°S da

$$K = 10^{-14} (\text{mol/l})^2.$$

Taza suwda N^+ hám ON^- ionlarınıń koncentracıyaları birdey bolǵanlıqtan biz olardıń hár qaysısınıń 10^{-7} ge teń ekenligin tabamız. Solay etip 1 litr suwda N^+ ionlarınıń moliniń 10^{-7} si bar (tap sonshama ON^- ionı). Basqa sóz benen aytqanda suwdıń 1 moli (18 g) tek 10 million litr suwda dissociaciyaǵa ushıraydı eken.

Teris belgi menen alınǵan N^+ ionlarınıń koncentracıyasınıń onlıq logarifmin rN dep belgileydi hám *vodorodlıq kórsetkish* dep ataydı:

$$rN = -\lg_{10}[\text{H}^+].$$

Taza suw ushın 25°S da $rN=7,0$ (0°S da $rN=7,5$; 60°S da $rN=6,5$).

Kislotalar eritilgende olardan N^+ ionları bólinip shıǵadı. Biraq koncentracıyalardıń kóbeymesi $[\text{H}^+][\text{OH}^-]$ niń shaması 10^{-14} ke teń bolıp ózgerissiz qalıwı kerek. Sonlıqtan ON^- ionlarınıń bir bólimi N^+ ionları menen birigip suwdıń neytrallıq molekularına aylanıwı kerek. Nátiyjede $[\text{H}^+]$ tıń koncentracıyası onıń suwdaǵı koncentracıyasınan (10^{-7}) úlken boladı. Basqa sóz benen aytqanda kislotalıq eritpedegi vodorodlıq kórsetkish rN tıń shaması 7 den kishi boladı. Tap sol sıyaqlı (ON^- ionın julıp alıwshı) siltilerdiń eritpesinde rN tıń mánisi 7 den úlken boladı. Demek eritpeniń vodorodlıq kórsetkishi onıń kislotalılıǵınıń yamasa siltililiginıń kórsetkishi bolıp tabıladı.

Qanday da bir ázzi kislotaǵa (mısalı uksus kislotası NAs ǵa) hám kúshli elektrolit bolıp tabılatuǵın onıń duzına (mısalı uksus kislotalı natriy NaAs) iye eritpeler qızıqlı qásiyetlerge iye boladı. Toliq dissociaciyaǵa ushıraǵan duz eritpede kóp muǵdardaǵı As^- ionların payda etedi. Kislotanıń dissociacıyasınıń teńlemesi

$$\frac{[H^+][Ac^-]}{[HAc]} = K$$

ge sáykes eritpedegi As^- ionlarının bar ekenligi N^+ ionları sanınıń kemeyiwın talap etedi (yaǵnıy kislotanıń dissociaciyasın toqtatıwǵa alıp keledi). Sonlıqtan kislotanıń dissociaciyalanbaǵan molekulalarınıń koncentraciyası $[HAc]$ onıń tolıq koncentraciyası menen birdey boladı (onı s_k arqalı belgileymiz). Tolıǵı menen duz tárepinen alıp kelinetuǵın As^- ionlarının koncentraciyası sol duzdıń koncentraciyası menen birdey boladı (onı s_s arqalı belgileymiz). Solay etip $[H^+] = Kc_k/c_c$ hám eritpeniń vodorodlıq kórsetkishi mınaǵan teń:

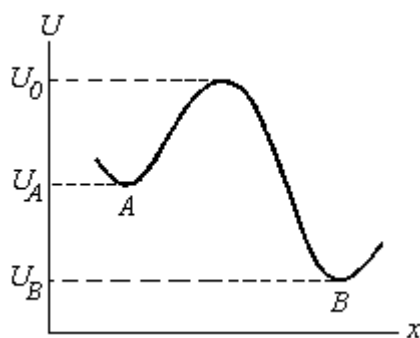
$$pH = -\lg[H^+] = -\lg K + \lg \frac{c_c}{c_k}.$$

Bul shama bolsa duz benen kislotanıń koncentraciyalarınıń qatnasınan ǵárezli bolıp shıǵadı. Solay etip eritpeni suyıltıw yamasa usı eritpege qanday da bir basqa kislotalardı yaqı siltilderdi qosıw eritpeniń rN in ámeliy jaqtan ózgertpeydi. Eritpeniń vodorodlıq kórsetkishin usınday etip saqlaw qásiyetin *buferlik tásir* dep ataymız.

§ 91. Aktivaciya energiyası

Usı waqıtlarǵa shekem biz tek ximiyalıq teń salmaqlıq halın karap, reakciyalardıń mexanizmleri menen júriw tezliklerin dıqqattan tısta qaldırdıq. 88-paragraftaǵı molekulalardıń soqlıǵısıw sanın esaplaw teń salmaqlıq shártlerin keltirip shıǵarıw ushın ǵana islendi hám kórsetilip ótilgenindey reakciyalardıń haqıyqıy mexanizmlerine juwap beriwi talap etilmeydi.

Endi biz reakciyalardıń júriw tezliklerin úyreniw menen shuǵıllanamız. Ayırım molekulalar bir biri menen soqlıǵısqan jaǵdaylarda reakciyaǵa kirise aladı. Biraq soqlıǵısıwlarıń barlıǵı da reakciyalardıń júriwine alıp kelmeydi. Haqıyqatında bolsa sol soqlıǵısıwlarıń júdá az bólegi ǵana molekulalar arasındaǵı reakciyalardıń júzege keliwine alıp keledi.



1-súwret

Bul tómendegidey túrde túsindiriledi.

Reakciyada soqlıǵısıwshı atomlardıń belgili bir qaytadan toparlasıwı orın aladı. Kórgizbelilik ushın reakciya barısında atomnıń bir molekuladan (A) ekinshi molekulaaǵa (V) ótiwi menen júredi dep esaplaymız. Bul atomnıń potencial energiyası eki molekulaaǵa salıstırǵandaǵı jaylasıwına baylanıslı. Bul energiyanıń ózgerisi atomnıń júrip ótetuǵın jolının ústindegi koordinata x tıń funkciyası sıpatında sxemalıq túrde 1-súwrette kórsetilgen. Bul iymekliktiq shártli túrde alınǵanlıǵı óz-ózinen túsiniqli. Haqıyqatında potencial energiya bir emes, al kop sanlı parametrlerden (koordinatalardan) ǵárezli.

Potencial energiyanıń ózgerisiniń dál barısı úlken áxmiyetke iye emes, al atomnıń eki molekulada turǵanına sáykes keliwshi eki minimumnıń bar ekenligi tiykarǵı orındı iyeleydi. Bul eki awhal bir birinen potencial barer menen bólingen.

Bir biri menen soqlıǵısqa molekulallardaǵı atom barer arqalı bir molekuladan ekinshi molekulaga óte alǵanday óte alǵanday energiyaǵa iye bolsa ǵana ximiyalıq reaksiya júredi. Biraq kópshilik molekulalarda atom mánisi sol minimumǵa sáykes keltuǵınday energiyaǵa jaqın energiyaǵa iye boladı. Sonlıqtan molekula $U_0 - U_A$ ǵa teńdey artıq energiyaǵa iye bolǵan jaǵdayda ǵana molekula reaksiyaǵa kirise aladı ($A \rightarrow V$ ótiyai menen, 1-súwret). Gazdegi usınday molekulalar sanınıń bunday energiyaǵa iye emes molekulalar sanına qatnası Bolcman kóbeytiwshileriniń katnasına teń:

$$e^{-U_0/kT} : e^{-U_A/kT} = e^{-(U_0 - U_A)/kT}.$$

Bul ańlatpadaǵı $U_0 - U_A$ energiyası berilgen reaksiyanıń *aktivaciya energiyası* dep ataladı. Ádette Avagadro sanına kóbeytip bul energiyanıń mánisiniń zattıń bir moline tiyislin aladı: $N_0(U_0 - U_A) = E$.

Solay etip reaksiyaǵa kirisiwshi molekulalardıń sanı hám sonıń menen birge reaksiyanıń tezligi *aktivaciya kóbeytiwshisi*

$$e^{-E/RT}$$

ǵa tuwrı proporcional. Bul kóbeytiwshi reaksiya tezliginiń temperaturaǵa ǵárezliligindegi tiykarǵı faktor bolıp tabıladı. Biz reaksiya tezliginiń temperaturaǵa baylanıslı tez ósetuǵınlıǵın kóremiz.

Eger reaksiya tezligin u arqalı belgilesek, onda joqarıda ayılǵanlardan mına formula kelip shıǵadı:

$$\ln u = \text{const} - E/RT,$$

yaǵnıy reaksiya tezliginiń logarifmi $1/T$ nıń funkciyası sıpatında tuwrı sıziq penen sáwlelenedi. Bul tuwrınıń qıyalıq múyeshi aktivaciya energiyası E ni anıqlaydı.

Hár qıylı molekulalıq processlerdiń aktivaciya energiyası pútkilley hár qıylı boladı. Baqlanatuǵın kópshilik reaksiyalar ushın onıń mánisleri 10-150 *kdj* intervalında jatadı.

Temperatura bazı bir T mánisinen oǵan jaqın bolǵan $T + \Delta T$ mánisine shekem ózgergende reaksiyanıń tezliginiń ózgerisi mına formula menen anıqlanadı:

$$\ln v_2 - \ln v_1 = \ln \frac{v_2}{v_1} = -\frac{E}{R(T + \Delta T)} + \frac{E}{RT} \approx \frac{E}{RT^2} \Delta T.$$

Eger $E = 80 \text{ kdj}$, $T = 300 \text{ K}$, $\Delta T = 10^0$ bolǵanda $v_2/v_1 \approx 3$. Tezliktiń usınday ózgeriwi xarakterli bolıp tabıladı. Gazler menen aralaspalardaǵı hár qıylı reaksiyalarda temperatura 10^0 qa kóterilgende (reakciya sezilerliktey tezlik penen júretuǵın oblastlarda) reaksiyanıń tezligi 2-4 ese úlkeyedi.

Reaksiyanıń tezliginiń temperaturaǵa ǵárezliliginiń kúshliliginiń qanday ekenlilin $2\text{NI} \rightarrow \text{N}_2 + \text{I}_2$ reaksiyası mısasında da anıq kórinedi (onıń ushın aktivaciya energiyası 185 *kdj*). 200°S da reaksiya pútkilley júrmeydi – NI diń sezilerliktey muǵdarı júzlegen jıllar ishinde ıdıraǵan bolar edi. 500°S temperaturada reaksiya sekundlar ishinde ótip boladı. Biraq joqarı temperaturalardıń ózinde de NI molekulalarınıń bir biri menen soqlıǵısıwlarınıń shama menen 10^{12} siniń birewi ǵana olardıń ıdırawın boldıradı.

Molekulalarga jetkilikli dárejedegi úlken energiyaǵa iye bolıw zárúrliǵı soqlıǵısıwlardıń reaksiyalıq effektivliginiń tiykarǵı sebebi bolıp tabıladı. Usınıń menen birge artıq energiya molekulalardaǵı anıq bir atomlarda yamasa atomlar toparında jıynalǵan bolıwı kerek. Bul jaǵday reaksiyanıń tezliginiń belgili bir mániske jetiwinde belgili bir ornıdı iyeleydi.

Quramalı molekular qatnasatúǵın reakciyalarda jáne geometriyalıq faktor da belgili bir orın iyeleydi. Bul jaǵdayda molekular soqlıǵısqa olardıń reakciyaǵa qábiletli bólimleriniń ushırasıwı kerek.

1-sxemalıq súwretke kaytıp kelemiz. $U_A - U_V$ ayırması A hám V molekularınıń ishki energiyalarınıń ayırmasına sáykes keledi (bul $A \rightarrow V$ ekzotremalıq reakciyasında bólinip shıǵatúǵın yamasa keri $V \rightarrow A$ endotermalıq reakciyasında jutılatúǵın jıllıqqa teń). Bul ayırmanıń potencial barerdiń biyikligine tikkeley qatnası joq, yaǵnıy reakciya jıllılıǵı menen aktivaciya energiyası arasında tikkeley baylanıs joq. Biraq tuwrı hám keri reakciyalardıń aktivaciya energiyaları arasındaǵı ayırma menen reakciya jıllılıǵı arasında belgili bir baylanıs bar. Súwrette kórsetilgendey $A \rightarrow V$ hám $V \rightarrow A$ reakciyalarınıń aktivaciya energiyaları arasındaǵı ayırma $U_0 - U_A$ hám $U_0 - U_V$ shamaları menen beriledi, al olar arasındaǵı ayırma reakciya jıllılıǵına sáykes keledi:

$$(U_0 - U_V) - (U_0 - U_A) = U_A - U_V.$$

88-paragrafta reakciyalardıń ádette qosındı ximiyalıq teńlemesine sáykes ótpeytúǵınlıǵı aytılıp ótilgen edi. Haqıykatında ximiyalıq reakciyalardıń kópshiligi quramalı mexanizmge iye boladı. Bul mexanizmler ayırım ápiwayı elementar bolǵan processlerden (bar ekenligin anıqlaw qıyın bolǵan reakciyalardıń aralıqlıq basqışları) ibarat boladı. Reakciya óziniń tezirek júriwi múmkin bolǵan joldı saylap alǵanday jol menen bolıp júredi. Reakciyalardıń aralıqlıq basqışlarınıń aktivaciya energiyasınıń kishi mánislerine iye bolatúǵınlıǵı tábiyiy, al bul bolsa reakciyanıń júriw jolın anıqlawshı tiykarǵı fizikalıq faktor bolıp tabıladı. Usınıń menen birge hár qıylı basqışlardıń ótiw tezlikleriniń hár qıylı bolıwı múmkin. Usınday jaǵdaylarda qosındı processtıń tezliginiń summasınıń ań ástelik penen júretúǵın baskıstırın tezligi menen anıqlanatuǵınlıǵı óz-ózinen túsinikli (konveyrlik óndiristiń tezliginiń eń ástelik penen júretúǵın operaciyanıń tezliginen joqarı bolmaytuǵınlıǵı sıyaqlı).

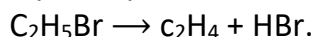
Reakciyanıń aralıqlıq etapları ushın aktivaciya energiyasınıń mánisin kishireytiw *kataliz* processleriniń tiykarında jatadı. Kataliz dep reakciyalanıwshı aralaspaǵa bazı bir ózge zattı – *katalizator*dı qosıw arqalı reakciyalardı tezletiwdi aytadı. Bul tezleniwdiń shaması ádewir úlken bolıwı múmkin. Kópshilik jaǵdaylarda ózinen-ózi júrmeytuǵın reakciyalar katalizatorlar qosılǵanda úlken tezlik penen júre baslaydı. Katalizatordıń tutqan ornı sonnan ibarat, ol aralıqlıq reakciyalarda qanday da bir formada qatnasıp, barlıq processtıń aqırında hesh qanday ózgeriske ushıramaǵanday bolıp qaytadan tiklenedi.

Katalizatordıń reakciyanıń ótiwinen pútkilley ǵárezsiz bolǵan ximiyalıq teń salmaqlıq halın jılıta almaytuǵınlıǵın atap ótiw zárúrli. Katalizatordıń qosılıwı teń salmaqlıqtıń ornaw tezliginde ǵana kórinedi.

§ 92. Reakciyalardıń molekualıǵı

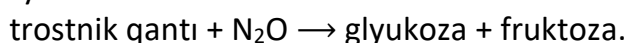
Reakciyanıń júriw ushın bir biri menen soqlıǵısıwı zárúrli bolǵan molekularlardıń sanına baylanıslı gazler yamasa ázzi eritpelerdegi barlıq ximiyalıq reakciyalardı bir neshe tiplerge bóliw múmkin. Házir ǵáptiń haqıyqıy túrde ótetúǵın molekualıq processler haqqında aytılıp atırǵanlıǵın atap ótemiz. Tómende keltiriletúǵın mısallardaǵı reakciyalar olardıń ximiyalıq teńlemesine sáykes ótedi. Al kópshilik jaǵdaylarda reakciyalardıń bul klassifikaciyası reakciyanıń quramalı mexanizminiń ayırım elementlerine tiyisli boladı.

Monomolekulalılık reakciya dep dáslepki zattıń molekulaları eki yamasa bir neshe bólimlerge bólinetuǵın reakciyanı aytadı. Mısalı bromlı etildiń ıdıraw reakciyası usınday reakciya bolıp tabıladı:



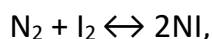
Bunday reakciyalardıń júriwi ushın molekulalardıń soqlıǵısıwınıń zárúrliligi joq. Sonlıqtan ıdırawshı zattıń muǵdarının kemeyiwi menen birge reakciyanıń tezligi koncentraciyanıń birinshi dárejesine proporcional kemeyedi.

Tap usınday mániste ázzi eritpelerdegi reakciyalar joqarıdaǵı jaǵdayǵa uqsas bolıp keledi. Bunday eritpelerdegi reakciyalarda erigen zattıń bir molekulasınan basqa eritkishtiń molekulaları da qatnasadı. Mısal retinde joqarıda esletilip ótilgen trostnik qantınıń gidrolizi reakciyasın kórsetiw múmkin:



Bul reakciyaǵa haqıyqatında eki molekula katnasadı, biraq qant molekulası átirapında reakciya barısında oǵada kóp sanlı suw molekulaları bolǵanlıqtan reakciyanıń tezliginiń ózgerisi tek erigen qanttıń koncentraciyasınıń ózgerisi menen baylanıslı.

Eki molekuladan eki yamasa onnan da kóp basqa molekulalar alınatuǵın reakciyalar *bimolekulalıq reakciyalar* dep ataladı. Mısal retinde mınaday reakciyalardı keltiriw múmkin:



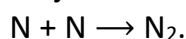
Bul reakciyalar eki baǵıtta da bimolekulalıq reakciyalar bolıp tabıladı. Bunday reakciyanıń júriwi ushın eki molekulanıń soqlıǵısıwı zárúr. Sonlıqtan olardıń tezligi reakciyaǵa kirisiwshı zatlardıń koncentraciýalarınıń kóbeymesine proporcional (eger bir biri menen eki birdey molekulalar reakciyaǵa kirisetuǵın bolsa, onda koncentraciyanıń kvadratına proporcional). Usı tipke elementar processlerdiń basım kópshiligi kiredi. Al sol elementar processlerdiń qosındısınan quramalı reakciyalardıń mexanizmi júzege keledi.

Eń aqırında *trimolekulalıq* dep atalıwshı reakciyalardı qaraymız. Bunday reakciyalarǵa úsh molekula kirisedi hám olar eki yamasa onnan da kóp sandaǵı molekulaǵa aylanadı. Trimolekulalı reakciyalar salıstırmalı túrde siyrek ushırasadı. Sebebi bunday reakciyanıń júriwi ushın bir waqıtta úsh molekulanıń bir biri menen soqlıǵısıwı kerek. Al úsh molekulanıń birden soqlıǵısıwı eki molekulanıń soqlıǵısıwınan ádewir siyrek júzege keledi.

Gazdegi molekulalardıń úshlik hám ekilik soqlıǵısıwlarınıń qatnasın ańsat anıqlawǵa boladı. Berilgen molekulanıń úshlik soqlıǵısıwı dep onıń qanday da bir úshinshi molekula menen qatar turıp soqlıǵısıwın aytıw múmkin. Gaz tárepinen iyelengen kólemdi V arqalı, al gaz molekulalarınıń kólemlerinin qosındısın b arqalı belgileymiz. Álbette molekula baska bir molekula menen bir qatarda turǵan kólem de b ǵa teń. Demek molekulanıń bisqa bir molekula menen qatar turıw itimallılıǵı b/V ǵa teń. Sonlıqtan úshlik soqlıǵısıwlar sanınıń ekilik soqlıǵısıwlar sanına qatnası da b/V shamasındaǵı san boladı. Ádette bul shama júdá kishi; mısalı hawa ushın normal sharayatlarda shama menen 10^{-3} ke teń.

Tórtlik soqlıǵısıwlar sanı úshlik soqlıǵısıwlar sanınan sonsha shamaǵa kishi boladı. Bunday soqlıǵısıwlardıń júdá siyrekliginen joqarı tártiptegi reakciyalar (tórtlik h.t.b. molekulalıq reakciyalar) tábiyatta júrmeydi.

Geypara bimolekulalıq bolıp kórinetuǵın reakciyalar haqıyqatında trimolekulalıq jollar menen júredi. Bul eki bóleksheniń bir bólekshenge birigiw reakciyası bolıp tabıladı:



Eger N_2 molekulası eki N atomlarının soqlığıswınıń nátiyjesinde payda bolǵanda moleukula dárhál ıdırap ketken bolar edi (bir biri menen soqlığıswshı eki atom barlıq waqıtta da tarqasıp kete aladı). Turaqlı N_2 molekulası teris mánisli ishki energiyaǵa iye bolıwı kerek. Sonlıqtan vodorodtıń eki atomı turaqlı molekulanı tek jáne bir bólekshe qatnasqanda ǵana payda ete aladı. Al molekula payda bolǵandaǵı bólinip shıǵatuǵın energiya usı bólekshe tárepinen alıp beriliwı kerek. Bul joqarıda keltirilignen reakciyanıń haqıyqatında da tek úsh bóleksheniń soqlığıswınıń saldarınan júretuǵınlıǵın bildiredi.

Anıq monomolekulalıq processlerdiń belgili bir sharayatlardı bimolekulalıq processlerdey bolıp júriwi júdá qızıq. Bıdırawı ushın molekula sol ıdırawdıń nátiyjesinde payda bolǵan bóleksheler potencial barer arqalı óte alatuǵınday energiyalarǵa iye bolıwı kerek. Usınday etip "aktivlestirilgen" molekula belgili bir "ómiriniń uzalıǵına" da iye bolıwı kerek (sonıń menen birge sol artıq energiya ıdıraya ushın kerekli bolǵan orında jıynalǵan bolıwı da kerek). Al jılılıq qozǵalıslarındaǵı molekulalardıń soqlığıswları aktivlesken molekulalardıń deregi bolıp tabıladı. Soqlığıswlar siyrek orın alatuǵın jetkilikli dárejede siyrekletilgen gazde aktivlestirilgen molekulalardıń ıdırawı jańa aktivlesken molekulalardıń payda bolıwına qaraǵanda tezirek júredi. Bunday sharayatlarda reakciya tezligi tiykarınan molekulalardıń soqlığıswların talap etiwshi (yaǵnıy bimolekulalıq) aktivaciya processiniń tezligi menen anıqlanadı.

§ 93. SHınjırlı reakciyalar

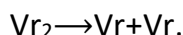
Kópshilik reakciyalardıń mexanizmi tómendegidey xarakterli ózgeshelikke iye boladı: bunday reakciyalarda ornıqlı halda jasay almaytuǵın aralıqlıq zatlar, molekulalardıń sınığı (oskalkaları - ayırım atomlar yamasa *erkin radikallar* dep atalıwshı atomlar toparları) payda boladı. Mısalı qızdırılǵan azot zakisi gaziniń ıdıraw reakciyasında (bunday reakciyanıń formal túrindegi teńlemesi $2N_2O=2N_2+O_2$) N_2O molekulaları $N_2O \rightarrow N_2+O$ teńlemesine muwapıq ıdıraydı. Nátiyjede kislorodtıń erkin atomları payda boladı, al bul atomlar keyin jáne bir N_2O molekulası menen reakciyaǵa túsedı: $O+N_2O \rightarrow N_2+O_2$.

Bul mısalda aralıqlıq bóleksheler (bul jaǵdayda O atomları) korsetilgen eki elementar aktlerdiń nátiyjesinde jáne de joǵaladı. Biraq basqa kóp sanlı reakciyalar bolıp, usınday reakciyalardıń barısında aralıqlıq produktler úzliksiz túrde regeneraciyalanadı (qaytadan payda boladı). Solay etip olar katalizatordıń tutqan ornınday orındı iyeleydi.

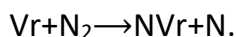
Reakciyalardıń mexanizminiń usınday áhmiyetli tipin vodorod penen bromnıń puwındaǵı NVr nıń payda bolıwı mısasında túsindiremiz ham bul reakciyanıń aralaspanı jaqtılandırǵanda júretuǵınlıǵın esletip ótemiz.

Bul reakciya haqıyqatında N_2 molekulaları menen Vr molekulaları soqlıǵıskanda júrmeydi. Egerde soqlığıswlardıń nátiyjelerinde reakciya júrgende $N_2+Vr_2=2NVr$ ximiyalıq teńlemesi ornılı bolǵan bolar edi. Al bul reakciyanıń haqıyqıy mexanizmi mınadan ibarat:

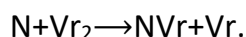
Jaqtılıqtıń tásirinde bazı bir Vr_2 molekulaları eki atomǵa ıdıraydı:



Bul *shınjırdıń payda bolıwı* dep ataladı, al payda bolǵan brom atomları *aktiv oraylardıń* ornın iyeleydi. Bunday atomlar N_2 molekulaları menen soqlıǵısıp, olar menen mınaday reakciyaǵa kirisedi:



Alınǵan N atomları óz gezeginde Vr_2 molekulaları menen reakciyaǵa kirisedi:



Usınday reakciyanıń nátiyjesinde Vr atomları jáne de payda boladı, al olar bolsa N_2 molekulaları menen reakciyaǵa kirisedi hám sonday process dawam etedi. Solay etip izbe-iz reakciyalardıń úzliksiz shıńjırı payda boladı. Bunday reakciyalardı Vr atomları katalizatordıń ornın iyeleydi (olar eki NVr molekulası payda bolǵannan keyin ózgeriske ushıramagan túrde qaytadan tiklenedi). Usınday reakciyalardı *shıńjırlı reakciyalar* dep ataymız. SHıńjırlı reakciyalardıń tiykarları N.N.Semenov hám K.Xinshelvdar tárepinen islep shıǵılǵan.

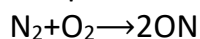
Biz eger qanday da bir usıl menen aktiv oraylar payda bolsa, onda reakciyanıń bunnan bılay ózinen-ózi dawam etetuǵınlıǵın kóremiz hám reakciya sırtqı tásirlessiz aqırına jetetuǵınday bolıp kórinedi. Al haqıyqatında *shıńjırdıń úziliwi* menen de esaplasıwǵa tuwra keledi. Joqarıdaǵı mısaldaǵı bir aktiv oray – Vr atomı júzlegen mırnı N_2 hám Vr_2 molekulalarınıń reakciyasın boldıra aladı. Biraq aqır-ayaǵında ol "óledi" hám shıńjırdıń bunnan bılayǵı júrisin toqtatadı.

Mısalı bunday qubılıs eki Vr atomı bir Vr_2 molekulasına rekombinaciyalansa orın aladı. 92-paragrafta bolsa usınday eki atomnıń ornıqlı bolǵan bir molekulaǵa birigiwiniń tek úshlik soqlıǵısıwda ǵana ámelge asatuǵınlıǵınıń múmkin ekenligi kórsetilgen edi. Sonlıqtan shıńjırdıń úzilisiniń usınday mexanizmi gazdıń kóleminde úshlik soqlıǵısıwlar jiyi túrde ámelge asatuǵın joqarı basımlarda ǵana áhmiyetke iye bolıwı múmkin.

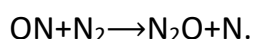
SHıńjırdıń úzilisiniń basqa mexanizmi reakciyalıq ıdistiń diywalına soqlıǵısqanda aktiv oraylardıń nabıt bolıwınan ibarat boladı. Bul faktor aktiv oraylar gazdıń kólemi boyınsha jeńil qozǵala alatuǵın kishi basımlarında tiykarǵı orındı iyeleydi.

Ekinshi tárepten *shıńjırlardıń tarqalıwı* dep atalıwshı jaǵday ornı alǵandaǵı reakciyalar bar boladı. Mısalı vodorod penen kislorodtıń jarılǵısh aralaspasındaǵı vodorodtıń (joqarı temperaturalardaǵı) janıwı ulıwma túrde tómendegishe júredi.

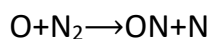
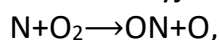
Sırtqı tsirden (mısalı elektr ushqının payda etkende)



sxeması boyınsha shıńjır payda boladı. Payda bolǵan aktiv oraylar – ON radikalları N_2 molekulaları menen tásir etisip suwdı beredi:



Usınıń nátiyjesinde payda bolǵan N atomları bunnan bılay



sxeması boyınsha reakciyaǵa kirisedi. Bul reakciyalardıń nátiyjesinde suwdıń payda bolıwı menen birge N, O, ON aktiv oraylarınıń sanları artadı (HBr nıń payda bolıw reakciyasında N hám Br erkin atomlarınıń sanları úlkeygen joq edi).

Eger shıńjırlardıń tarqalıwınıń nátiyjesinde payda bolatuǵın aktiv oraylardıń sanı oraylardıń úziliwleriniń sanınan artıq bolsa aktiv oraylar sanı oǵada úlken tezlikler menen artadı (geometriyalıq progressiya boyınsha) hám usınıń aqıbetinde reakciyanıń jedel túrde ózinen óziniń tezleniwi – partlanıw orın aladı.

Bul partlanıwdıń shıńjırlı mexanizminiń principinde turaqlı temperaturalarda da orın alıwı xarakterli. Usını menen bir qatarda partlanıwdıń *jıllılıq mexanizmi* de bar. Bul jaǵdayda reakciyanıń tezliginiń temperaturadan kúshli ǵárezziligi orın aladı. Jıllılıq úlken tezlikler menen bólinip shıǵatuǵın ekzotermalıq reakciyalarda bolsa bul tezliklerdiń shaması jıllılıqtıń sırtqı ortalıqqa tarqalıw tezligine salıstırǵanda ádewir úlken mániske iye

bolıwı múmkin. Usınday jaǵdayda reaksiya bolıp atırǵan aralaspanıń kızıwı orın alıp, bul óz gezeginde reaksiyanıń óz ózinen tezleniwın boldıradı.

XII BAP Betlik qubılıslar

§ 94. Bet kerimi

Usı waqıtlarǵa shekem biz jıllılıq qásiyetleri menen kólemlik xarakterge iye bolǵan qubılıslardı qaradıq: bul qubılıslarda deneniń barlıq massası qatnastı. Denelerde erkin betlerdiń bolıwı *betlik* yamasa *kapıllırlıq qubılısları* dep atalatuǵın qubılıslardıń ayrıqsha kategoriyasınıń júzege keliwine alıp keledi.

Qatań túrde aytkanda qálegen dene vakkumde emes, al qanday da bir ortalıqta, (mısalı atmosferada) jaylasqan. Sonlıqtan denelerdiń betleri haqqında emes, al eki ortalıqtı ayırıp turatuǵın betler haqqında aytıw kerek.

Betlik qubılıslarda denelerdiń tikkeley betinde jaylasqan molekulalar qatnasadı. Eger denelerdiń ólshemleri júdá kishi bolmasa, onda bunday molekulalardıń sanı tiykarǵı kólemde jaylasqan molekulalar sanınan ádewir az boladı. Sonlıqtan ádette betlik qubılıslar úlken orın iyelemeydi. Biraq kishi ólshemlerge iye denelerde bul qubılıslar áhmiyetli orınlardı iyeleydi.

Bettegi bazı bir juqa betlik qatlamda jaylasqan molekulalar deneniń ishinde sharayatlardan basqa sharayatlarda turadı. Deniniń ishindegi molekulalar barlıq táreplerde ózindey molekulalar menen qorshalǵan. Al betke jaqın jaylasqan molekulalar bolsa ózindey qońısılarǵa tek bir tárepte ǵana iye boladı. Bul betke jaqın jaylasqan molekulalardıń energiyalarınıń deneniń ishindegi molekulalardıń energiyalarınan basqa ekenligin bildiredi. Betke jaqın jaylasqan barlıq molekulalardıń energiyasınıń eger usı molekulalar deneniń ishinde jaylasqan bolǵandaǵı iye bolıwı kerek energiyası arasındaǵı ayırma *betlik energiya* dep ataladı.

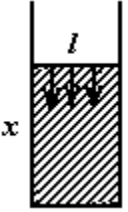
Betlik energiyanıń bólip turıwshı bettiń maydanı S ke proporcional ekenligi anıq:

$$U_{\text{bet}} = \alpha S.$$

Bul ańlatpadaǵı α koefficienti bir birine tiyisip turǵan ortalıqlardıń tábiyatınan hám olardıń hallarınan ǵárezli boladı. Bul koefficientti *bet kerimi koefficienti* dep ataydı.

Biz mexanikadan kúshlerdiń barlıq waqıtta da deneniń eń kishi bolǵan energiyaǵa iye bolatuǵın halǵa qaray baǵıtlanatuǵınlıǵın bilemiz. Usıǵan sáykes betlik energiya da múmkin bolǵan eń kishi mániske iye bolıwǵa umtıladı. Bunnan α koefficientiniń barlıq waqıtta da oń mániske iye bolatuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Qarama-qarsı jaǵdaylarda bir birine tiyisip turatuǵın ortalıqlar ayırım túrde jasay almaǵan bolar edi – olardı bólip turatuǵın bet sheksiz úlkeygen, yaǵnıy eki ortalıq bir biri menen aralasıwǵa umtılǵan bolar edi.

Bet kerimi kroefficientiniń oń mániske iye bolatuǵınlıǵınan eki ortalıqtı ayırıp turıwshı bettiń barlıq waqıtta da kemeyiwge umtılatuǵınlıǵı kelip shıǵadı. Suyıqtıń tamshılarınıń (yamasa gaz kóbiksheleriniń) sfera formasına iye bolıwı tap usı qubılıs penen baylanıslı. Sebebi berilgen kólemdegi shar basqa barlıq figuralar arasında eń kishi betke iye boladı. Tamshınıń sferalıq formaǵa iye bolıwına salmaq kúshi kesent jasaydı, biraq kishi tamshılar ushın but tásir júdá ázzi hám sonlıqtan olardıń formaları sferalıqqa jaqın.

 <p>1-súwret</p>	<p>Salmaqsızlıq jaǵdayında suyıqlıqtıń qálegen erkin massasınıń forması sferalıq boladı. (may menen) salıstırmalı salmaǵı birdey bolǵan spirt penen suwdıń aralaspasındaǵı ósimlik mayınıń shar tárizli tamshıǵa túrinde júzip júretuǵınlıǵın kórsetetuǵın kópshilikke belgili tájiriybede bunday sharayatlardı jasalma túrde payda etiwge boladı.</p>
---	--

Bet kerimi tómendegi ápiwayı mısalda ózin kúsh túrinde kórsetedi: Sım ramkaǵa kerilgen suyıqlıqtıń plenkasın kóz aldımızǵa keltiremiz. Ramkanıń tárepleriniń biri l ge teń bolsın hám ol qozǵala alatuǵın bolsın (1-súwret). Bettiń kishireyiwge umtılatuǵınlıǵınan sımǵa kúsh tásir etedi. Ramkanıń qozǵalıwshı bólimindegi bul kúshti tikkeley ólshew múmkin. Mexanikanıń ulıwmalıq qaǵıydaları boyınsha kúsh \vec{G} energiyadan (bul jaǵdayda betlik energiya) kúsh tásir etetuǵın baǵıt x boyınsha alıńǵan tuwındıǵa teń:

$$F = - \frac{dU_{bet}}{dx} = -\alpha \frac{dS}{dx}.$$

Plenkanıń betiniń maydanı $S=lx$ bolǵanlıqtan

$$F = -\alpha l.$$

Bul ramkanıń l kesindisine bet keriminiń nátiyjesinde plenkanıń bir beti tárepinen túsetuǵın kúsh bolıp tabıladı (plenka beti eki tárepke iye bolǵanlıqtan l kesindisine eki ese úlken kúsh tásir etedi). Minus belgisi bul kúshtiń plenka betiniń ishine qaray baǵıtlanǵanlıǵın bildiredi.

Solay etip deneniń betin sheklewshi sıziqqa (yamasa bul bettiń qanday da bir uıastkasına) bul sıziqqa perpendikulyar, betke urınba baǵıtta hám bettiń ishine qaray baǵıtlanǵan kúshler tásir etedi. Sızıqtıń uzınlıǵınıń bir birligine sáykes keliwshi kúsh bet kerimi koefficienti α ge teń.

Bet kerimi koefficienti α nıń ólshemleri onıń anıqlamasınan kelip shıǵadı hám hár qıylı túrde beriliwi múmkin: maydannıń bir birligine sáykes keliwshi energiya yamasa uzınlıqtıń bir birligine sáykes keliwshi kúsh:

$$[\alpha] = \frac{\text{erg}}{\text{sm}^2} = \frac{\text{din}}{\text{sm}}.$$

Joqarıda ayılǵanlardan bet keriminiń mánisi haqqında ayılǵanda atap aytqanda qanday eki ortalıqtıń bir birine tiyisip turǵanlıǵın kórsetiwdiń kerekligi kelip shıǵadı. Ádette suyıqlıqtıń bet krimi degende (ekinshi ortalıqtı kórsetpey) usı suyıqlıq penen onıń puwı arasındaǵı shegaradaǵı bet kerimin názerde tutadı. Bul shama temperaturanıń

joqarilayai menen barlıq waqıtta da kishireydi hám suyıqlıq hám puw arasındagı ayırma joǵalatuǵın kritikalıq noqatta nolge teń boladı.

Bir neshe suyıqlıqlar ushın olardıń hawa menen shegarasındagı bet kerim koefficientlerin keltiremiz (erg/sm^2 birliklerinde) :

Suw (20^0S)	73
Etil spirti (20^0S)	17
Benzol (20^0S)	29
Sınap (20^0S)	480
Altın (1130^0S)	1100

Suyıq geliydiń puwı menen shegarasındagı bet kerimi júdá kishi shama boladı. Absolyut nol janında onıń shaması $0,35 erg/sm^2$ ka teń.

Álbette qattı denelerdiń betlerinde de bet kerimi orın aladı. Biraq ol ádettegi sharayatlarda júdá az seziledi: salıstırmalı kishi bet kerimleri deneniń formaların ózgerge almaydı. Usıǵan baylanıslı qattı denelerdiń bet kerimin tikkeley ólshew oǵada qıyın bolıp tabıladı hám olardıń bet kerimleri haqqında isenimli maǵlıwmatlar joq.

Anizotrop dene bolǵan kristaldıń bet kerimi onıń hár qıylı qaptallarında hár ıylı bolıwı kerek. Sebebi kristaldıń hár qıylı qaptalında atomlar hár qıylı bolıp jaylasqan. Usı sebepke baylanıslı eger kristal óziniń formasın erkin ózgerge alǵan jaǵdayda ol shar tárizli formanı iyelemegen bolar edi (barlıq beti boyınsha birdey kerimge iye bolatuǵın izotrop deneler (suyıqlıq) shar tárizli formanı iyeleydi). Bunday sharayatlardaǵı kristaldıń teń salmaqlıq formasınıń ózine tán túrge iye bolatuǵınlıǵın kórsetiwge boladı: bul forma kóp emes sanlı tegis qaptallardan ibarat bolıp, bul qaptallar belgili bir múyesh penen emes, al iymeygen uıastkalar payda etip kesilisedi.

Bul qubılıstı baqlay múmkin. Onıń ushın, mısalı, tas duzı monokristalınan jonıp alınǵan shariklerdi shama menen 750^0S temperaturada uzaq waqt kızırdırǵanda atomlar bettiń bir uıastkalarınan ekishi bir uıastkalarına jılısıp ótedi hám joqarıda aytılıp ótilgendey figura formasına iye boladı.

§ 95. Adsobciya

Suyıq hám qattı denelerdiń betlerine baska bir (ózge) zatlardıń (usıǵan baylanıslı bul zatlardı *adsorbentler* dep ataydı) jıynalıwınan ibarat bolǵan *adsorbciya* qubılısı menen kóp sanlı betlik qubılıslar baylanıslı. Adsobciya gazlerden, suyıqlıqlardan bolıwı, sonıń menen birge eritpedegi erigen zatlarda adsobciyalanıwı múmkin. Mısalı kópshilik gazler kómirdiń, silikageldiń, metallardıń kópshiliginiń betinde adsobciyalanadı, komir eritpelerden hár qıylı organikalıq birikpelerdi adsorciyalaydı. Adsorbciya dárejesi *betlik koncentraciya* menen xarakterlenedi, al betlik koncentraciya dep adsorbenttiń betiniń $1 sm^2$ da jıynalǵan basqa zattıń muǵdarına aytamız.

Adsorbciya qubılıs tábiyatta keńnen tarqalǵan hám texnikada paydalanıwda úlken orın iyeleydi. Kóp muǵdardaǵı zattı adsorbciyalaw ushın beti múmkin bolǵanınsha úlken bolǵan (berilgen massadaǵı), mısalı gewek yamasa puqta túrde maydalanǵan zattan paydalanǵan maqul. Adsorbentlerdiń bul qásiyetttiń xarakteristikası retinde olardıń *salıstırmalı beti* túsiniginen paydalanadı (salıstırmalı beti dep $1 g$ zatqa sáykes keliwshi betti aytadı). Jaqsı adsorbentlerde (mısalı arnawlı geweklerge iye kómirde) bul bettiń maydanı júzlegen kvadrat metrge shekem jetedi. Eger deneniń ishinde gewekler payda

etkende yamasa olardı puqta túrde maydalaǵanda salıstırmalı bettiń bunday úlken mánislerge shekem úlkeyiwi tań qalarlıq emes. Mısalı radiusı r bolǵan sharıqlerge maydalanǵan 1 sm^3 zat shaması $\frac{4\pi r^2}{4\pi r^3/3} = \frac{3}{r}$ ge teń betke iye boladı; eger $r \sim 10^{-6} \text{ sm}$ bolsa bettiń shaması júzlegen kvadrat metrge teń.

Adsorbciyalanǵan gazdıń koncentracıyası (berilgen temperaturada) adsorbenttiń ústindegi gazdıń basımına baylanıslı. Bul ǵárezlilik 2-súwrette kórsetilgendey tiptegi iymeklik penen sáwlelenedi. Dáslep basımınń ósiwi menen betlik koncentracıya tez ósedi. Basımınń bunnan bılay óskeninde koncentracıyanıń ósiwi ástelenedi hám aqır-ayaǵında bazı bir shekke yamasa basqa sóz benen aytqanda toyınıwǵa umtıladı. Tájiriyebe adsorbciyanıń toyınıwınıń adsorbenttiń betiniń adsorbciyalanǵan molekulalardıń birdey bolǵan (monomolekulyarlıq dep atalatuǵın) beti menen tolıq jabılıwına baylanıslı ekenligin kórsetedi.

Bir biri menen tiyisip turǵan ortalıqlardıń shegarasındaǵı bet keriminiń ózgerisi adsorbciyanıń oǵada áhmiyetli qásiyeti bolıp tabıladı (ádette bul jaǵdayda suyıqlıqtıń beti haqqında ǵáp ketedi). Adsorbciya barlıq waqıtta da bet kerimi koefficienttiń mánisin kemeytedi. Eger bunday bolmaǵanda adsorbciya pútkilley orın almaǵan bolar edi. Bul jerde de betlik energiyanıń kemeyiwge umtılwı kórinedi: bettiń maydanınıń kishireyiwi menen bul kemeyiw bettiń fizikalıq qásiyetleriniń ózgeriwi menen de baylanıslı bolıwı múmkin. Solardıń bet kerimine tásirine baylanıslı (berilgen suyıqlıqtıń betinde) adsorbciyalanıw qásiyetlerine iye bolǵan zatlar *betlik-aktiv* zatlar dep ataladı. Mısal retinde hár qıylı sabınlardıń suw ushın usınday zatlar bolıp tabılatuǵınlıǵın atap ótemiz.



Suyıqlıqtıń betinde adsorbciyalana alatuǵın zatlardıń ulıwmalıq muǵdarı júdá kishi. Sonlıqtan betlik-aktiv zatlardıń aralaspasınıń oǵada az muǵdarı da suyıqlıqtıń betinde jıynalıp onıń bet kerimin ádewir shamalarǵa ózgerte aladı. Suyıqlıqtıń bet kerimi tazalıqqa da kúshli ǵárezli. Mısalı suwǵa az muǵdardaǵı sabın qosılǵanda onıń bet kerimi 3 ese den de artıq shamaǵa kishireyedi.

Suyıqlıq betindegi adsorbciyalanǵan monomolekulalıq plenkalar ózine tán qásiyetlerge iye bolǵan obıekt bolıp tabıladı: bunday plenkalar zattıń eki ólshemli halları bolıp tabıladı, bul jerde molekulalar úsh ólshemli kólemde emes, al eki ólshemli bette tarqalǵan. Bunday halda úsh ólshemli fazalarǵa sáykes hár qıylı "gaz tárizli", "suyıq" hám "qattı" fazalardıń bolıwı múmkin.

"Gaz tárizli" plenkada adsorbciyalanǵan molekulalar suyıqlıqtıń betinde salıstırmalı siyrek jaylasqan bolıp, olar usı suyıqlıqtıń beti boyınsha erkin qozǵala aladı. "Kondensaciyalanǵan" plenkalarda bolsa molekulalar bir birine tiyisip turadı, sonıń menen birge molekulalarǵa bir birine salıstırǵanda qozǵalıwǵa bazı bir erkinlik beriledi (suyıq plenkaǵa aǵıwǵa múmkinshilik beriledi) yamasa molekulalar bir biri menen bekkem baylanısqan bolıp, plenka qattı dene sıyaqlı qásiyetke iye boladı. Kondensaciyalanǵan plenkalar anizotrop bolıwı múmkin. Bul jaǵdayda plenka suyıq yamasa qattı kristallardıń analogı bolıp tabıladı. Birinshi jaǵdayda adsorbenttiń beti boyınsha molekulalar durıs

orientaciyalanadı, al ekinshi jaǵdayda molekulalardıń bir birine salıstırǵanda durıs jaylasıwları orın alatuǵın eki ólshemli kristallıq pánjerege uqsas jaǵdaydıń payda bolıwına iye bolamız.

Suw betinde suwda erimeytuǵın, molekulaları ushlarınıń birinde SOON, ON toparlarına iye uzın uglevodorod shınjırın payda etiwshi organikalıq kislotalar, spirtler h.t.b.tárepinen payda etilgen monomolekulalıq plenkalar bul qubılıslardı úyreniw ushın qolaylı obǵektler bolıp tabıladı.