

Дәріс № 11 Біратомды және көпатомды идеал газ

Дәріс жоспары: 1) Біратомды идеал газ (кванттық канондық таралу әдісі).

2) Көп атомды газдың жылусыйымдылығы.

Біратомды идеал газ (кванттық канондық таралу әдісі)

Газ L жағынан кубтық формаға ие түтікшеде деп санаймыз. Газ идеал болғандықтан (атомдардың әрекеттесуін елемейміз), жүйенің энергиясы жекелеген атомдардың энергиясының қосындысына тең. Кванттық механикаға сәйкес көлемі $V=L^3$ түтікшедегі массасы m бөлшектің энергия деңгейлері

$$E_n = E_{n_1, n_2, n_3} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} (n_1^2 + n_2^2 + n_3^2); \quad (n = (n_1, n_2, n_3), n_1, n_2, n_3 = 1, 2, \dots),$$

Z статистикалық қосынды тең

$$Z = z_0^N, \quad z_0 = \frac{e}{N} \left[\sum_{n_1=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{T_{tr}}{T} n_1^2\right) \right]^3 = \frac{e}{N} \left[\sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{n^2}{\tau}\right) \right]^3,$$

мұндағы, $T_{tr} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2 k}$ **ілгерілемелі** және $\tau = \frac{T}{T_{tr}}$ **өлшемсіз** температуралар. $L=1\text{м}$ болғанда

жай газ үшін $T_{tr} \sim <10^{-15}$ К. Сондықтан барлық практикалық жетуге болатын температуралар жоғарғы ($T \gg T_{tr}$, $\tau \gg 1$) болып табылады. Бұл жағдайда

$$\sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{n^2}{\tau}\right) \approx \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{n^2}{\tau}\right) dn = \frac{1}{2} (\pi\tau)^{1/2}$$

және де статистикалық қосынды үшін жуық мөлшермен алатынымыз

$$Z \approx \left[\frac{(2\pi mkT)^{3/2}}{h^3} \frac{eV}{N} \right]^N$$

бұл нәтиже, классикалық қарастырулардың нәтижесімен сәйкес келеді. Олай болса идеал біратомды газды барлық температурада классикалық статистикалық физика әдістерімен қарастыруға болады.

Көп атомды газдың жылусыйымдылығы

Біз бұрынғыдай газ молекулалары өзара әсерлеспейді деп есептейміз (дұрысында, олардың арасындағы әсерлесуді ескермеуге болады). Сонда көп атомды газ үшін Гамильтон функциясы келесі түрде жазылады:

$$H = \sum_{i=1}^N H_i$$

Мұндағы H_i — i — молекуланың Гамильтон функциясы. Газ идеал болғандықтан статинтеграл $Z = Z_0^N$, мұндағы Z_0 — бір молекуланың фазалық кеңістігі бойынша статистикалық интегралы ($3n$ еселі, n — бір молекуладағы атомдар саны). n атомнан тұратын молекуланың еркіндік дәрежесі $3n$. Оның координаты ретінде тандап аламыз:

1. Ауырлық центрінің (ілгерілемелі қозғалыс) үш координаты: $q_1 = X$, $q_2 = Y$, $q_3 = Z$.

2. Үш айналыс координаты: $q_4 = \varphi$, $q_5 = \theta$, $q_6 = \psi$ (қалыпты, яғни сызықты емес молекула үшін); Сызықты молекуланың тек екі айналыстық координаты (q_4 , q_5) болады, себебі мұндай молекуланың байланыс осі бойымен айналысы жайлы айтудың мағынасы

жоқ. Бұл ось бойында нүктелік деп есептелген атомдар орналасатын түзумен сәйкес келеді.

3. Қалған $3n - 6$ (сызықты молекула үшін $3n - 5$) координаталар тербеліс координаталары болып табылады.

Сыртқы өріс жоқ кезде потенциалдық энергия ілгерілемелі және айналыстық координаталарға тәуелді болмайды, ал тербелмелі координаталарды

$$U(q) = \sum_{j=7(6)}^{3n} c_j q_j^2$$

болатындай етіп таңдап алуға болады. Тербелістің айналыспен байланысы бар екені белгілі. Сондықтан потенциалдық энергияда айналыстық және тербелістік координаталардан бір мезгілде тәуелді болатын мүшелері болады. Өте аз тербелістерде бұл мүшелер өте аз мәнге ие және жылу сыйымдылықтың жуықтама теориясында оларды ескермеуге болады. Осы жуықтауда потенциалдық энергия тек тербелістік координаталарға тәуелді, ал молекуланың Гамильтон функциясы әр түрлі қозғалыс түрлеріне (ілгерілемелі, айналыстық және тербелістік) сәйкес мүшелердің қосындысы ретінде қарастырылады. Мұнда ілгерілемелі және айналыстық қозғалыс тек кинетикалық энергиямен сипатталады. Молекуланың қозғалысын бүтіндей шектейтін ыдыстың қабырғаларын модельдеу үшін (22) потенциалдық энергияны молекуланың ілгерілемелі координаталарының функциясы ретінде қолдануға болады:

$$W(r_i) = \begin{cases} \infty, & \text{егер } r_i \notin V \\ 0, & \text{егер } r_i \in V \end{cases}$$

Осылайша, **көпатомды идеал газды** өткен мысалдарда қарастырылған бірнеше идеал газдың суперпозициясы ретінде қарастыруға болады (2.11, 2.12, 2.13 бөлімдердегі мысалдарды қара): идеал бір атомды (ілгерілемелі еркіндік дәрежелері), ротатордың идеал газы (айналыстық еркіндік дәрежелері), осциллятордың идеал газы (тербелістік еркіндік дәрежелері).

Сонымен, классикалық теорияға сәйкес көпатомды идеал газдың ішкі энергиясына келесі компоненттер үлес қосады:

1. Әрбір ілгерілемелі еркіндік дәрежесі $-\frac{1}{2}kT$ ($\frac{1}{2}k$ жылу сыйымдылыққа);
2. Әрбір айналым еркіндік дәрежесі $-\frac{1}{2}kT$ ($\frac{1}{2}k$ жылу сыйымдылыққа);
3. Әрбір тербелістік еркіндік дәрежесі $-kT$ (k жылу сыйымдылыққа), мұнда кинетикалық және потенциалдық энергия бірдей үлес береді $\frac{1}{2}kT$.

Алынған нәтиже **энергияның еркіндік дәрежелер бойынша таралу теориясы** деп аталады. Егер берілген еркіндік дәрежесінде молекуланың тек кинетикалық энергиясы болса, онда осы еркіндік дәрежесінің энергияға қосатын үлесі $\frac{1}{2}kT$ ($\frac{1}{2}k$ жылу сыйымдылыққа). Ал егер қарастырылып отырған еркіндік дәрежесіне кинетикалық энергиямен қатар потенциалдық энергия (координатаның квадрат функциясы) сәйкес келсе, онда осы еркіндік дәрежесінің энергияға қосатын үлесі kT (k жылу сыйымдылыққа) болады.

Алынған үлестерді суммалай отырып келесі нәтиже аламыз: n атомды идеал газдың бір молекуласына сәйкес келетін орташа энергия қалыпты молекула үшін $(3n - 3)kT$ (жылу сыйымдылық - $(3n - 3)k$), ал сызықты молекула үшін $(3n - \frac{5}{2})kT$ (жылу сыйымдылық - $(3n - \frac{5}{2})k$). Бір атомды газ үшін $C = \frac{3}{2}k$, ал екі атомды газ үшін $C = \frac{7}{2}$

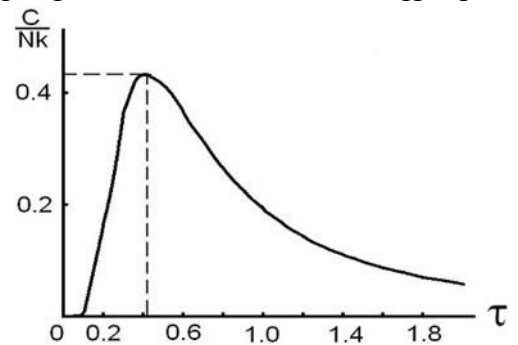
к. Тәжірибе бөлме температурасында бір атомды газдың жылусыйымдылығы $\frac{3}{2} k$ -ға

жақын болатынын көрсетті, ал екі атомды газ үшін ($\frac{7}{2} k$ орнына) $\frac{5}{2} k$ –ке жуық нәтиже берді. Көп атомды газ үшін теория мен тәжірибе арасындағы алшақтық одан да көбірек.

Бұл алшақтықтың себебі - молекуладағы атомдардың қозғалысын классикалық көзқараспен талдауға болмайды. Дұрыс нәтижелер алу үшін кванттық статистиканы қолдану керек.

Дәлірек айтсақ, бір атомды газ үшін де тәжірибемен сәйкестік жоқ. Теориялық есептеуде атомдардағы электрондарды да ескеру қажет еді, себебі классикалық көзқарастан электрондар энергияның еркіндік дәрежелер бойынша таралу заңы бойынша энергия мен жылусыйымдылыққа өз үлесін қосуы тиіс. Осы барлық қиындықты газдардың жылусыйымдылығының кванттық теориясы шешеді.

Егер әртүрлі қозғалыс түрлері арасындағы байланысты ескермейтін болсақ, онда кванттық механикада идеал көп атомды газдың микрокүйі жекелеген қозғалыс түрлерінің микрокүйлерімен анықталады және толық жүйенің микрокүйінің энергиясы жекелеген қозғалыс түрлерінің микрокүйлерінің энергияларының қосындысына тең. Бір молекула үшін статистикалық сумма жекелеген қозғалыс түрлерінің статсуммаларының көбейтіндісіне тең, ал ішкі энергия - жекелеген қозғалыс түрлерінің үлестерінің қосындысы. Енді бұл үлестерді кванттық статистиканы қолдана отырып бағалау қажет болады. Егер бөлме температурасын алсақ, онда кванттық статистикамен есептелген



6-сурет. $\frac{C}{N}$ жылусыйымдылықтың

ілгерілемелі және айналыстық қозғалыстың үлестері іс-жүзінде классикалық статистикамен алынған нәтижелермен сәйкес келеді (3.6 және 3.5

$\tau = \frac{T}{T_{el}}$ өлшемсіз температурадан тәуелділік графигі.

бөлімдердегі мысалдарды қара). $T < T_0$ тербелістер үшін (1-кестені қара) және олардың ішкі энергия мен жылусыйымдылыққа қосатын үлесін кванттық статистика бойынша есептеу қажет, яғни (51) және (52) формулаларымен, бұл үлестер бөлме температурасында өте аз болады.

Электрондар көп атомды идеал газдың жылусыйымдылығына өте аз үлес қосады. Молекуланың біратомды энергия деңгейлері $E_i^{(el)}$ бір-бірінен өте алыс орналасады. Әдетте

$$\Delta E^{(el)} = E_1^{(el)} - E_0^{(el)} \gg kT, \text{ яғни } T \ll T_{el} \quad (T_{el} \equiv \frac{\Delta E^{(el)}}{k} - \text{электрондық температура}).$$

Дегенмен бірінші қозған деңгей $E_1^{(el)}$ негізгі электрондық деңгейге $E_0^{(el)}$ салыстырмалы түрде жақын орналасатын жағдайлар болады ($T_{el} \sim 200K$). Сонда бұл жағдайды жылусыйымдылықтың температураға тәуелділігінен байқауға болады.

Егер $\Delta E_1^{(el)} \ll \Delta E_2^{(el)} = E_2^{(el)} - E_1^{(el)}$ электрондық күйлер бойынша статсуммада тек екі мүшені қалдыруға болады:

$$Z_0^{(el)} = g_0 e^{-\frac{E_0^{(el)}}{kT}} + g_1 e^{-\frac{E_1^{(el)}}{kT}} = g_0 e^{-\frac{E_0^{(el)}}{kT}} \left(1 + \frac{g_1}{g_0} e^{-\frac{T_{el}}{T}} \right), \quad (56)$$

және жылусыйымдылыққа үлесі

$$\frac{C}{N} = \frac{1}{N} \frac{\partial E}{\partial T} = k \frac{g_1}{g_0} \left(\frac{T}{T_{el}} \right)^2 \frac{e^{-\frac{T}{T_{el}}}}{\left(1 + \frac{g_1}{g_0} e^{-\frac{T}{T_{el}}} \right)} = \frac{g_1}{g_0} \left(\frac{T}{T_{el}} \right)^2 \frac{e^{-\frac{T}{T_{el}}}}{\left(\frac{g_1}{g_0} e^{-\frac{T}{T_{el}}} + 1 \right)} \quad (58)$$

Бұл тәуелділік 8-суретте көрсетілген. Молекулада төменірек орналасқан қозған электрондық деңгейдің болуын жылусыйымдылықтың температураға байланысты өзгерісінен анықтауға болады. 8-суреттегі жылусыйымдылыққа қосатын электрондық үлестің шыңы көп атомды газдың жылусыйымдылығының жалпы жүрісінде де байқалады.

Идеал газ моделі статистикалық физика мен термодинамикада нақты газдардың қасиеттерін түсіндіру үшін кеңінен қолданылады. Идеал газды қарастырғанда молекулалардың өлшемдерін олардың арасындағы орташа қашықтықпен салыстырғанда елемеуге болады және молекулалар арасында өзара әсерлесу жоқ деп есептеледі. Мұндай жуықтау газдың қысымы төмен, ал температурасы жеткілікті жоғары болған жағдайда жақсы орындалады.

Статистикалық физиканың негізгі міндеттерінің бірі — көптеген бөлшектерден тұратын жүйенің макроскопиялық қасиеттерін оның микроскопиялық күйлері арқылы түсіндіру. Осы мақсатта канондық таралу әдісі маңызды рөл атқарады. Бұл әдіс температурасы тұрақты жылулық ортамен байланыстағы жүйенің әртүрлі энергия күйлерінің ықтималдығын анықтауға мүмкіндік береді.

Біратомды газда молекула бір атомнан тұратындықтан, оның ішкі энергиясы негізінен атомдардың ілгерілемелі қозғалысымен анықталады. Ал көпатомды газ молекулаларында ілгерілемелі қозғалыстан басқа айналмалы және тербелмелі қозғалыстар да болады. Осыған байланысты көпатомды газдың жылусыйымдылығы молекуланың еркіндік дәрежелерінің санына және температураға тәуелді.

Біратомды идеал газ. Біратомды идеал газға гелий, неон, аргон сияқты бір атомды молекулалардан тұратын газдар жатады. Мұндай газдың молекуласының ішкі құрылымын ескерудің қажеті жоқ. Сондықтан оның энергиясын атомның кеңістіктегі ілгерілемелі қозғалысының кинетикалық энергиясы арқылы сипаттауға болады.

Бір бөлшектің кинетикалық энергиясы

$$E = p^2/(2m)$$

түрінде жазылады. Мұнда E — бөлшектің кинетикалық энергиясы, p — оның импульсі, ал m — бөлшектің массасы.

Үш өлшемді кеңістікте импульстің үш құраушысы бар: p_x , p_y және p_z . Сондықтан энергияны

$$E = (p_x^2 + p_y^2 + p_z^2)/(2m)$$

түрінде көрсетуге болады. Бұл өрнек біратомды идеал газ бөлшегінің энергиясы үш тәуелсіз ілгерілемелі қозғалысқа байланысты екенін көрсетеді.

Кванттық канондық таралу. Канондық ансамбль температурасы тұрақты жылулық ортамен тепе-теңдікте тұрған жүйені сипаттайды. Мұндай жүйеде бөлшектер әртүрлі энергетикалық күйлерде бола алады, бірақ олардың әр күйде орналасу ықтималдығы бірдей болмайды. Кванттық канондық таралу бойынша энергиясы E_i болатын i күйдің ықтималдығы

$$P_i = \exp(-E_i/(k_B T)) / Z$$

өрнегімен анықталады. Мұнда P_i — жүйенің i күйінде болу ықтималдығы, E_i — осы күйдің энергиясы, k_B — Больцман тұрақтысы, T — абсолют температура, ал Z — жүйенің статистикалық қосындысы.

Статистикалық қосынды жүйенің барлық мүмкін кванттық күйлері бойынша есептеледі:

$$Z = \sum_i \exp(-E_i/(k_B T))$$

Бұл жерде $\sum_i$ барлық мүмкін күйлер бойынша қосындыны білдіреді. Статистикалық қосындының маңызы өте зор, себебі ол жүйенің термодинамикалық қасиеттерін анықтауға мүмкіндік береді. Канондық таралудың негізгі қасиеті — энергиясы төмен күйлердің ықтималдығы жоғары болады. Шынында да, Больцман көбейткіші

$$\exp(-E/(k_B T))$$

энергия өскен сайын азаяды. Ал температура жоғарылаған кезде жоғары энергиялы күйлердің де жүзеге асу ықтималдығы артады.

Біратомды газ үшін статистикалық қосынды. Біратомды идеал газдың бір бөлшегінің энергиясы

$$E = (p_x^2 + p_y^2 + p_z^2)/(2m)$$

болғандықтан, оның статистикалық қосындысын импульстік кеңістіктегі күйлерді ескеру арқылы анықтауға болады.

Классикалық шекте бір бөлшек үшін статистикалық қосынды фазалық кеңістік бойынша интеграл түрінде жазылады:

$$Z_1 = (1/h^3) \int \exp[-(p_x^2 + p_y^2 + p_z^2)/(2m k_B T)] d^3r d^3p$$

Мұнда h — Планк тұрақтысы, d^3r — координаталық кеңістіктің элементі, ал d^3p — импульс кеңістігінің элементі.

Көлемі V болатын біртекті газ үшін координаталық интеграл қарапайым түрде:

$$\int d^3r = V$$

болады. Сондықтан статистикалық қосынды

$$Z_1 = (V/h^3) \int \exp[-(p_x^2 + p_y^2 + p_z^2)/(2m k_B T)] dp_x dp_y dp_z$$

түріне келеді.

Импульстің үш құраушысы бір-бірінен тәуелсіз болғандықтан, бұл үш еселі интегралды үш жеке Гаусс интегралына бөлуге болады:

$$Z_1 = (V/h^3) [\int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-p_x^2/(2m k_B T)) dp_x]^3$$

Гаусс интегралының

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-a x^2) dx = \sqrt{(\pi/a)}$$

формуласын пайдалансақ, мұндағы $a = 1/(2m k_B T)$ болғандықтан:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-p_x^2/(2m k_B T)) dp_x = \sqrt{(2\pi m k_B T)}$$

нәтижесі алынады.

Осыны бастапқы өрнекке қойғанда:

$$Z_1 = (V/h^3) (2\pi m k_B T)^{3/2}$$

формуласы шығады.

Бұл өрнек біратомды идеал газдың бір бөлшегінің классикалық шектегі статистикалық қосындысын сипаттайды.

Егер газда N бірдей және бір-бірімен әсерлеспейтін бөлшек болса, жүйенің статистикалық қосындысы бөлшектердің статистикалық қосындылары арқылы анықталады. Бірдей бөлшектерді есептегенде олардың орын алмастыруынан туындайтын қайталануды болдырмау үшін $N!$ көбейткіші енгізіледі:

$$Z = Z_1^N/N!$$

Бұл жерде Z — газдың толық статистикалық қосындысы, ал $N!$ — бірдей бөлшектердің статистикалық қайталануын ескеретін фактор.

Біратомды идеал газдың ішкі энергиясы. Статистикалық физикада жүйенің ішкі энергиясын статистикалық қосынды арқылы анықтауға болады. Канондық ансамбль үшін

$$U = -\partial \ln Z / \partial \beta$$

қатынасы қолданылады. Мұнда $\beta = 1/(k_B T)$ — кері температура деп аталатын шама.

Біратомды идеал газ үшін статистикалық есептеуден

$$U = 3Nk_B T/2$$

нәтижесі алынады.

Бұл формула біратомды газдың ішкі энергиясы температураға тура пропорционал екенін көрсетеді. Газдағы бөлшектер саны артқан сайын ішкі энергия да артады.

Бір моль газ үшін $N = \nu N_A$ екенін ескерсек,

$$U = 3\nu RT/2$$

болады. Мұнда ν — газдың зат мөлшері, N_A — Авогадро тұрақтысы, ал R — универсал газ тұрақтысы.

Біратомды идеал газдың молярлық жылусыйымдылығын ішкі энергиядан анықтауға болады:

$$C_V = (\partial U / \partial T) V$$

Осыдан

$$C_V = 3R/2$$

нәтижесі шығады.

Тұрақты қысымдағы молярлық жылуsыйымдылық пен тұрақты көлемдегі жылуsыйымдылықтың айырмашылығы газдың сыртқы ортаға жұмыс атқаруына байланысты:

$$C_p = C_V + R$$

Сондықтан біратомды идеал газ үшін

$$C_p = 5R/2$$

болады.

Көпатомды идеал газ. Көпатомды газдың молекуласы екі немесе одан да көп атомнан тұрады. Мұндай молекуланың қозғалысы біратомды газға қарағанда күрделірек. Молекула кеңістікте орын ауыстырып қана қоймай, өз осьтері бойынша айнала алады және атомдар бір-біріне қатысты тербелмелі қозғалыс жасай алады. Сондықтан молекуланың энергиясы бірнеше бөліктен тұрады:

$$E = E_{\text{ілг}} + E_{\text{айн}} + E_{\text{терб}}$$

Мұнда $E_{\text{ілг}}$ — ілгерілемелі қозғалыс энергиясы, $E_{\text{айн}}$ — айналмалы қозғалыс энергиясы, ал $E_{\text{терб}}$ — тербелмелі қозғалыс энергиясы.

Көпатомды газдың ішкі энергиясы да осы қозғалыстардың қосындысымен анықталады:

$$U = U_{\text{ілг}} + U_{\text{айн}} + U_{\text{терб}}$$

Кейбір температуралық аралықтарда тербелмелі қозғалыстың энергиясы толық қозбайды. Сондықтан белгілі бір температурада молекуланың тек кейбір еркіндік дәрежелері ғана жылулық қозғалысқа белсенді қатысады.

Еркіндік дәрежелері және жылуsыйымдылық. Классикалық статистикалық физикадағы энергияның еркіндік дәрежелері бойынша тең бөліну теоремасына сәйкес, энергияға квадраттық түрде кіретін әрбір еркіндік дәрежесіне орташа $k_B T/2$ энергия сәйкес келеді.

Егер молекуланың жылулық қозғалысқа қатысатын квадраттық еркіндік дәрежелерінің саны f болса, онда бір молекуланың орташа энергиясы

$$\langle E \rangle = f k_B T/2$$

болады. Сәйкесінше, N молекуладан тұратын газдың ішкі энергиясы

$$U = f N k_B T/2$$

түрінде жазылады.

Осыдан тұрақты көлемдегі жылуsыйымдылық:

$$C_V = f N k_B/2$$

болады. Бір моль газ үшін бұл өрнек

$$C_V = f R/2$$

түріне келеді. Демек, газдың жылуsыйымдылығы оның молекулаларының қанша еркіндік дәрежесі жылулық қозғалысқа қатысатынына тікелей байланысты.

Біратомды газдың жылуsыйымдылығы. Біратомды молекуланың үш ілгерілемелі еркіндік дәрежесі бар:

$$f = 3$$

Сондықтан оның тұрақты көлемдегі молярлық жылуsыйымдылығы

$$C_V = 3R/2$$

болады. Ал тұрақты қысым кезінде газ кеңею барысында сыртқы ортаға жұмыс атқаратындықтан, оған қосымша жылу берілуі қажет. Сондықтан

$$C_p = C_V + R \text{ және}$$

$$C_p = 5R/2 \quad \text{нәтижелері алынады.}$$

Олардың қатынасы адиабаталық процестерді сипаттауда маңызды:

$$\gamma = C_p/C_V$$

Біратомды идеал газ үшін:

$$\gamma = 5/3$$

болады. Мұнда γ — газдың адиабата көрсеткіші.

Екіатомды және көпатомды газдардың жылуsыйымдылығы. Екіатомды молекула үшін қалыпты температура жағдайында үш ілгерілемелі және екі айналмалы еркіндік дәрежесі белсенді болады. Сондықтан:

$$f = 5$$

деп алуға болады. Бұл жағдайда:

$$C_V = 5R/2 \text{ және}$$

$$C_p = 7R/2 \text{ болады.}$$

Алайда температура жоғарылаған кезде молекуланың тербелмелі қозғалыстары да қозуы

мүмкін. Тербелмелі қозғалыстың әрбір қалыпты модасы классикалық жағдайда екі квадраттық үлес береді: біреуі кинетикалық және біреуі потенциалдық энергияға байланысты.

Сондықтан тербелмелі еркіндік дәрежелері іске қосылған кезде газдың ішкі энергиясы мен жылу сыйымдылығы артады. Күрделі көпатомды молекулаларда еркіндік дәрежелерінің саны одан да көп болуы мүмкін. Мысалы, сызықтық молекулалар үшін жалпы қозғалыстың негізгі түрлері ілгерілемелі, айналмалы және тербелмелі қозғалыстарға бөлінеді. Сызықтық емес молекулаларда айналмалы қозғалыстың еркіндік дәрежелері көбірек болады.

Сондықтан көпатомды газдың жылу сыйымдылығын анықтағанда молекуланың геометриялық құрылымын және температураны міндетті түрде ескеру қажет

Бақылау сұрақтары:

- 1) Әрбір ілгерілемелі еркіндік дәрежесіне қандай энергия сәйкес?
- 2) Әрбір айналмалы еркіндік дәрежесіне қандай энергия сәйкес?
- 3) Әрбір тербелістік еркіндік дәрежесіне қандай энергия сәйкес?
- 4) Біратомды идеал газ үшін кванттық канондық таралу қалай жазылады және оның физикалық мағынасы қандай?
- 5) Біратомды идеал газдың ішкі энергиясы қалай анықталады және ол температураға қалай тәуелді?

Пайдаланған әдебиеттер: негізгі әдебиет – [1-7], қосымша әдебиет [1-3].