

Жылулық сәуле шығару проблемасы. Энергия кванты

1. *Жылулық (температуралық) сәуле және оның сипаттамалары*
2. *Қара дене.Кирхгоф заңы*
3. *Қара дененің сәуле шығару заңдары*
4. *Рэлей-Джинс формуласы.Вин формуласы*
5. *Планктың кванттық гипотезасы. Планк формуласы*

1. Электромагниттік сәуле шығарудың табиғатта ең көп тараған түрі жылулық сәуле шығару болып табылады. Жылулық сәуле заттың ішкі энергиясы,яғни оның атомдары мен молекулаларының жылулық қозғалысы салдарынан шығарылады. Сондықтан да ол температурасы 0 К-нен жоғары барлық денелерге тән құбылыс.Жылулық сәуленің спектрі – тұтас,ал оның максимумының орны температураға тәуелді болады.Жоғары температуралар жағдайында қысқа толқынды (көрінетін,ультракүлгін), төмен температураларда-ұзын толқынды(инфрақызыл)электромагниттік сәулелер шығарылады.Сәуле шығарудың басқа түрлерінен (бұларды люминесценция деп жалпы ортақ атпен біріктіреді) жылулық шығарылған сәуленің өзгешелігі - ол сәуле шығаратын денелермен тепе-теңдікте бола алады. Егер қыздырылған (сәуле шығарып тұрған) денелер қабырғалары идеал шағылдырушы қуысқа орналастырылса, онда біршама уақыттан кейін (денелер мен қуысты толтырып тұрған сәуле арасындағы үздіксіз энергия алмасуы нәтижесінде) термодинамикалық тепе-теңдік орнайды, яғни әрбір дене бірлік уақытта қандай энергия мөлшерін жұтатын болса, дәл сондай энергияны шығаратын болады. Осы жағдайда қуыстағы денелердің бәрінің температурасы бірдей болады,ал денелер мен сәуле арасындағы энергияның үлестірілуі әрбір толқын ұзындығы үшін уақытқа байланысты өзгермейтін болады.Сонда қарастырылып отырған жүйе-сәуле шығарып тұрған денелер мен қуысты толтырып тұрған жылулық сәуле-өзара термодинамикалық тепе-теңдікте тұр деп айтылады.Жүйенің осындай тепе-теңдік күйі орнықты болады,яғни оның кезкелген бұзылуынан кейін тепе-теңдік күй қайтадан өзінен-өзі қалпына келіп отырады. Осы жағдайда тепе-теңдіктегі жылулық сәулеге

мұнымен тепе-теңдікте тұрған денелердің температурасына тең температура табылады.

Дене бетінің бірлік ауданынан бірлік уақытта жиіліктердің бірлік аралығында шығарылатын энергия **энергетикалық жарқыраудың спектрлік тығыздығы** (немесе **дененің сәуле шығарғыштық қабілеті**) деп аталады:

$$r(\nu, T) = \frac{dR}{d\nu}, \quad r(\omega, T) = \frac{dR}{d\omega} \quad (1)$$

мұндағы dR - дене бетінің бірлік ауданынан бірлік уақытта жиіліктердің ω -ден $\omega+d\omega$ -ге дейінгі аралығында шығарылатын электромагниттік сәуле энергиясы.

Энергетикалық жарқыраудың спектрлік тығыздығы белгілі болса, онда T температураға дейін қоздырылған дененің **энергетикалық жарқырауын** былай табуға болады:

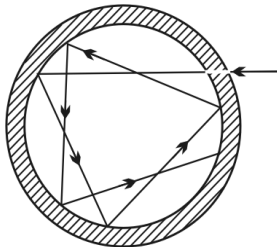
$$R(T) = \int_0^{\infty} r(\nu, T) d\nu = \int r(\omega, T) d\omega \quad (2)$$

мұнда қосындылау барлық жиіліктер бойынша жүргізіледі.

Денелердің бұларға түсетін электромагниттік сәулені жұту қабілеті спектрлік жұту қабілетімен сипатталады. Дене бетінің бірлік ауданына жиіліктері $d\omega$ аралығында жататын электромагниттік толқындардың $d\Phi_{\omega}$ сәулелік ағыны түсетін болсын. Осы ағынның $d\Phi_{\omega}$ бөлігі денеде жұтылады. Өлшемділіксіз мына шама

$$a(\nu, T) = \frac{d\Phi'_{\nu}}{d\Phi_{\nu}} \quad a(\omega, T) = \frac{d\Phi'_{\omega}}{d\Phi_{\omega}} \quad (3)$$

дененің спектрлік жұту қабілеті деп аталады. Дененің сәуле жұтқыштық қабілеті жиілік пен температураның функциясы.



1-сурет

2. Анықтама бойынша $a(\omega, T)$ бірден үлкен бола алмайды. Кезкелген температура жағдайында денеге түсетін кез-келген жиіліктегі сәулені талғамай толық жұтатын дене үшін $a(\nu, T) = 1$. Осындай дене **қара дене** деп аталады.

Қара дене табиғатта болмайды. Дегенмен өзінің қасиеттері бойынша

қара денеге өте-мөте жақын болатын құрылғыны қолдан жасауға болады. Осындай құрылғы - қара дене моделі-ішкі беті қараға боялған кішкене тесігі бар тұйық қуыс түрінде істеледі (1-сурет). Осындай қуыстың ішіне енген жарық сәулесі қабырғалардан көп қайтара шағылады, осының нәтижесінде сыртқа шығатын сәуле интенсивтігі іс жүзінде нөлге тең болады. Тесік мөлшері қуыс диаметрінің 0,1 бөлігінен кіші болса, онда барлық жиіліктегі түсетін сәуле "толық жұтылады". Демек, тесіктің бетін қара дене деп, ал одан шығатын сәулені тепе-теңдіктегі жылулық сәуле деп қарастыруға болады. Сондықтан да қуыстың кішкене тесігіне қара дененің қасиеті танылады.

Жылулық сәуле шығару **Кирхгоф заңына** бағынады: энергетикалық жарқыраудың спектрлік тығыздығының (сәуле шығарғыштық қабілетінің) спектрлік жұтқыштың қабілетіне (сәуле жұтқыштық қабілетіне) қатынасы дене табиғатына тәуелді емес, ол барлық денелер үшін бірдей жиілік пен температурасының әмбебап функциясы болып табылады:

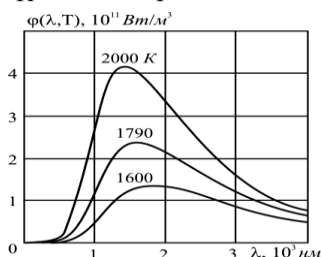
$$r(\nu, T) / a(\nu, T) = f(\nu, T) \quad (4)$$

мұндағы $f(\nu, T)$ - Кирхгофтың әмбебап функциясы, қара дене үшін $a(\nu, T) = 1$. Сонда $f(\nu, T) = r_0(\nu, T)$, демек $f(\nu, T)$ - функциясы, физикалық мағынасы бойынша, қара дененің энергетикалық жарқырауының спектрлік тығыздығы, (сәуле шығарғыштық қабілеті) болады.

3. Қара дененің шығаратын қосынды (интегралдық) сәулесінің энергиясы – дененің барлық толқын ұзындықтарында шығаратын жалпы сәулесінің энергиясының (R_s , энергетикалық жарқыраудың) температураға тәуелділігі **Стефан-Больцман заңымен** анықталады:

$$R_s = \sigma T^4, \quad (5)$$

яғни қара дененің энергетикалық жарқырауы оның термодинамикалық температурасына төрт дәрежеленген пропорционал; $\sigma = 5,6705 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ - Стефан-Больцман тұрақтысы. Бұл заңды И. Стефан (1879ж) эксперименттік деректерді талдау арқылы тағайындаған, кейіннен Л. Больцман (1884ж) термодинамиканың негізгі заңдарына сүйеніп қорытып шығарған.



2-сурет

Тәжірибеде кара дене сәулесі ретінде 1-суретте келтірілген құрылғының кішкене тесігінен шығатын сәуле алынады. Осы сәуленің спектрі бойынша энергияның үлестірілуін эксперименттік зерттеулерде (Э. Прингсгейм, О. Люммер және басқалар) кара дененің сәуле шығарғыштық қабілеті $r_0(v, T)$ немесе $\varphi(\lambda, T)$

анықталады. 2-суретте осындай өлшеулер нәтижесі график түрінде келтірілген. Бұлардан кара дене спектріндегі энергияның үлестірілуі бірқалыпты емес екендігі көрінеді: тәуелділіктің әрбір қисығында айқын білінетін максимум бар және кара дене жиіліктердің өте кіші және өте үлкен аймақтарында энергия шығармайды деуге болады.

Кара дененің энергетикалық жарқырауы температура өскенде қатты өседі. Температура жоғарылағанда сәуле шығару қабілетінің максимумы толқын ұзындықтардың қысқарак (жиіліктердің үлкенірек) жағына қарай ығысады.

Виннің ығысу заңына сәйкес кара дененің энергетикалық жарқырауының спектрлік тығыздығы максимумына сәйкес келетін λ_{max} толқын ұзындығы дененің термодинамикалық температурасына кері пропорционал болады:

$$\lambda_{max} = c/T, \quad (6)$$

мұндағы $c = 2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ - Вин тұрақтысы.

4. Термодинамикалық тепе-теңдіктегі сәуле жағдайында $f(v, T) = r_0(v, T)$ функциясымен сәуле энергиясының $U(v, T)$ көлемдік спектрлік тығыздығы мына қатынаспен байланысқан

$$f(v, T) = c / 4U(v, T) \quad (7)$$

Жылулық сәуле теориясының негізгі проблемасы $f(v, T)$ тәуелділігін табуға тіреледі. Бірақта $f(v, T) = r_0(v, T)$ тәуелділігін классикалық физика заңдары негізінде қорытып шығаруға 19ғ. Аяғында істелген барлық әрекеттер [В. Вин (1864-1928), Рэлей (1842-1919), Дж. Джинс (1877-1946)] сәтсіз болды.

Классикалық көріністер негізінде ағылшын ғалымдар Д. Рэлей, Д. Джинс кара дененің энергетикалық жарқырауының спектрлік тығыздығы үшін мына формуланы тапты (Рэлей-Джинс формуласы):

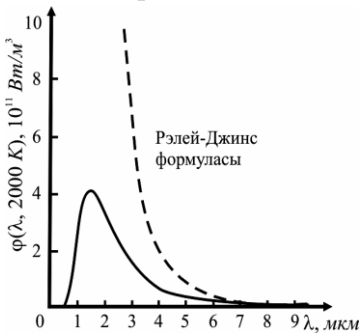
$$r_0(\omega, T) = f(\omega, T) = \frac{\omega^2}{2\pi c^2} \langle \varepsilon \rangle = \left(\frac{\omega^2}{2\pi c^2} \right) kT, \quad r_0(\nu, T) = \left(\frac{2\pi\nu^2}{c^2} \right) kT \quad (8)$$

мұндағы $\langle \varepsilon \rangle = kT$ – меншікті жиілігі, $\omega = 2\pi\nu$

осциллятордың орташа энергиясы.

Рэлей-Джинс формуласы қара дененің энергетикалық жарқырауының спектрлік тығыздығын тек кіші жиіліктер ($h\nu \ll kT$, үлкен толқын ұзындықтар) аймағында дұрыс бейнеледі, ал үлкен жиіліктер аймағында Рэлей-Джинс формуласы эксперимент нәтижесінен, және де Виннің ығысу заңынан қатты ауытқиды (3-сурет). Бұдан басқа, осы формуладан Стефан-Больцман заңын алу әрекеті ақылға қонбайтын әбес нәтиже береді: кезкелген температурада қара дененің энергетикалық жарқырауы шексіз үлкен болады деген қорытындыға әкеледі ("ультрақұлгіндік апат"). $R = \int_0^{\infty} r(\nu, T) d\nu = \frac{2\pi kT}{c^2} \int_0^{\infty} \nu^2 d\nu \rightarrow \infty$

Үлкен жиіліктер аймағында тәжірибемен жақсы үйлесетін формуланы Вин термодинамика және электро-магниттік теорияны пайдаланып ұсынған:



3-сурет

$$f(\nu, T) = \nu^3 F(\nu/T), \quad (9)$$

мұндағы $F(\omega/T)$ - жиіліктің температураға қатынасының қайсыбір функциясы.

Рэлей-Джинс және Вин формулалары - дербес заңдар. Бұлардың біріншісі кіші жиіліктерде ($h\nu \ll kT$), екіншісі үлкен жиіліктерде ($h\nu \gg kT$) дұрыс спектрлік үлестірілуді береді. Бұл формулалар жиіліктердің барлық аймақтары бойынша энергия үлестірілуінің

жалпы көрінісін бермейді.

5. Қара дененің $r_0(\nu, T)$ энергетикалық жарқырауының спектрлік тығыздығы үшін тәжірибе деректерімен үйлесетін дұрыс өрнекті М.Планк тапты (1900ж). Бұл үшін оған кезкелген жүйенің энергиясы үздіксіз өзгере алады деген классикалық физиканың

қағидасынан бас тартуына тура келді. Планктың кванттық гипотезасына сәйкес атомдық осцилляторлар энергияны үздіксіз емес, жеке үлестермен-кванттармен шығарады. Кванттық энергиясы сәуле жиілігіне пропорционал

$$\varepsilon = \hbar\omega = hv \quad (10)$$

мұндағы $\hbar = h/2\pi$; $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ Дж*с – Планк тұрақтысы.

Планктың гипотезасына сәйкес осциллятор энергиясы тек дискретті мәндер қабылдай алады, яғни энергияның қарапайым үлестерінің бүтін сандарына еселі мәндер қабылдай алады:

$$\varepsilon = n\hbar\omega \quad (n=0,1,2,\dots). \quad (11)$$

Осы жағдайда осциллятордың $\langle \varepsilon \rangle$ орташа энергиясы kT -ға тең деп Рэлей-Джинс формуласындағы сияқты қабылдауға болмайды. Осциллятордың энергиясы ε_n күйде болу ықтималдығы $\exp(-\varepsilon_n/kT)$ -ға пропорционал, бірақ орташа мәндерді есептегенде (энергияның дискретті мәндері жағдайында) интегралдар қосындылармен алмастырылады. Сонда осциллятордың шығаратын жиілігі ω сәулесінің орташа энергиясы

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{hv}{\exp(hv/kT) - 1},$$

ал қара дененің энергетикалық жарқырауының спектрлік тығыздығы

$$r_0(\nu, T) = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1}, \quad (12)$$

өрнегімен анықталады. (12) өрнегі **Планк формуласы** деп аталады. Осы формула жиіліктердің 0-ден шексіздікке дейінгі эксперимент деректерімен дәл үйлеседі. (12) функциясы (8) Вин критеріін қанағаттандырады. $h\nu/kT \ll 1$ шарты орындалғанда (кіші жиіліктер немесе үлкен толқын ұзындықтар). $\exp(h\nu/kT)$ көрсінткісі жуық түрде $(1 + h\nu/kT)$ -ға тең деп алуға болады; осының нәтижесінде Планк формуласы (8) Рэлей-Джинс формуласына ауысады.

Планк формуласынан жылулық сәуле шығаруды бейнелейтін дербес (5) және (6) заңдарды қорытып шығаруға болады.

Сұрақтар

1. Жылулық сәуленің басқа сәуле түрлерінен негізгі айырмашылығы неде?
2. Кирхгофтың әмбебап функциясының физикалық мағынасы қандай?
3. Қара денені тәжірибе жүзінде қалай іске асыруға болады?
4. Қара дененің сәуле шығару ерекшелігін түсіндіру үшін Планктың ұсынған ғылыми идеясының мәнісі неде?
5. Егер қара дененің температурасы екі есе өссе, онда оның энергетикалық жарқырауы қалай және қанша есе өзгереді?
6. Қара дененің температурасы екі есе кеміген. Сонда оның энергетикалық жарқырауының спектрлік тығыздығының максимумына сәйкес келетін толқын ұзындығы қалай өзгереді?
7. $r(\omega, T)$ -ны $r(\lambda, T)$ арқылы өрнектеңіз.
8. Планк формуласынан Стефан-Больцман, Вин заңдарын алыңыз.