

# 6-ДӘРІС



---

Асқарұлы Қыдыр  
PhD., қауымдастырылған профессор

*Жылулық сәуле шығару*  
*Абсолют қара дененің (АҚД) сәуле шығару мәселелері.*  
*Кванттық гипотеза және Планк өрнегі*

Едәуір жоғары температураға дейінгі қыздырылған денелердің жарық шығара бастайтындығы практикада әрбір адамға белгілі. Мысалы, металдарды қыздырған кезде олар алғашқыда қоңыр қызыл түсті, артынан әрі қыздырудың барысында ашық қызыл түске ие болады, одан әрі қыздырғанда ақ шоқ деп аталатын түске келеді. Басқаша айтқанда қатты және сұйық денелер жоғары температураға дейін қыздыру кезінде спектрдің көрінетін аймағында сәуле шығаруға ие болады. Бұл кезде температураны өсіруге байланысты сәулеленудің интенсивтігі және спектрлік құрамы өзгереді. Сәулеленуші дененің ішкі энергиясы есебінен пайда болатын және тек дененің температурасы мен химиялық қасиеттеріне байланысты электромагниттік сәуле шығару жылулық сәуле шығару деп аталады. Температуралық тепе-теңдікте тұрған денелердің жылулық сәуле шығаруы денеге түсетін сәуленің энергия мөлшерін жұтуымен теңестіріледі.

Дененің жылулық сәуле шығаруының спектрлік сипаттамасы үшін дененің сәуле шығару қабілеті деген түсінік енгізіледі, оны сонымен қатар, шығарғыштық қабілеттігі немесе энергетикалық жарқыраудың  $E(\nu, T)$  спектрлік тығыздығы деп атайды.

Денелердің сәуле шығару қабілеті деп уақыт бірлігі ішінде дене бетінің аудан бірлігіне келетін жиіліктері  $\nu$  -ден  $\nu + d\nu$  аралығында шығарылатын электромагниттік сәуле шығарудың  $dW_{\text{сәу}}$  энергиясын айтады. Сонымен,

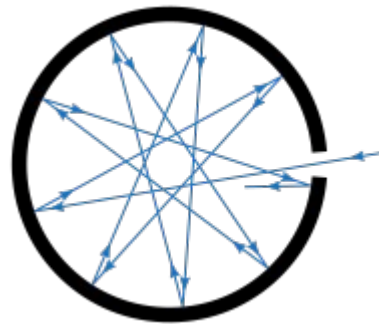
$$E(\nu, T) = dW_{\text{сәу}} / d\nu \quad (8.1)$$

ХБЖ жүйесінде сәуле шығарғыштық қабілетінің өлшем бірлігі ретінде  $[\text{Дж}/\text{м}^2]$  алынған.

Электромагниттік толқындар жұтылуының спектрлік сипаттамасы үшін денелердің жұту қабілеті  $A(\nu, T)$  деген ұғым енгізіледі. Жұту қабілеті, уақыт бірлігі ішінде дене бетінің аудан бірлігіне жиіліктері  $\nu$ -ден  $\nu + d\nu$  аралығында түсетін  $dW$  энергиясының қандай бөлігін дене жұта алатындығын көрсетеді, яғни

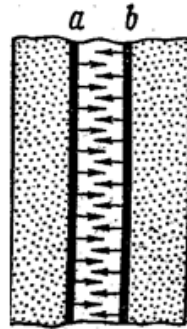
$$A(\nu, T) = dW_{\text{жұт}} / dW. \quad (8.2)$$

Денелердің сәуле шығару және сәуле жұту қабілеті, дененің температурасына, жиілігіне, дененің химиялық құрамына және дене бетінің күйіне байланысты болады. Егер кез-келген температурада және барлық жиіліктер үшін  $A(\nu, T) = 1$  болса, онда дене *абсолют қара дене (АҚД) деп аталады*. Абсолют қара дененің сәуле шығару қабілетін  $\epsilon(\nu, T)$  деп белгілейміз. Ол дененің сәуле шығару жиілігіне және абсолют температурасына тәуелді. Абсолют қара дене әдетте физикалық үлгі ретінде алынады, бірақ табиғатта көптеген денелер өзінің қасиеттері бойынша абсолют қара денелерге жақын келеді. Мысалы қара құрым, қара елтірі, қара бархыт. Абсолют қара дененің идеалды үлгісі ретінде мөлдір емес қуыс бетіндегі кішкене тесікті алуға болады (8.1-сурет)



8.1-сурет. Абсолют қара дененің идеалды үлгусь.

Кішкене тесік арқылы қуыс ішіне түсетін жарық сәулесі қуыс қабырғаларына көп ретті шағылуға кездеседі. Әрбір шағылу кезінде жарық толқыны энергиясының кейбір бөлігі жұтылатын болады. Сондықтан, тесіктен шығатын сәуленің интенсивтігі, оған келіп түскен сәуле энергиясына қарағанда көп шамаға азаяды. Қуыс бетінің ауданының тесік бетінің ауданына қатынасы үлкен болған сайын, тесік беті өзінің қасиеті бойынша абсолют қара денеге соншама жақын келеді. Реал денелердің сипаттамасы үшін көп жағдайда сұр дененің үлгісі пайдаланылады. Егер дененің жұту қабілеті барлық жиіліктер үшін бірдей болып, және ол тек температура мен дене бетінің күйіне тәуелді болса, яғни  $A_{\text{сұр}}(\nu, T) = A(T)$ , онда дене *сұр* (сұр дене) деп аталады. Денелердің сәуле шығару және жұту қабілеттері бір-бірімен байланысты. Бұл байланыстарды тағайындау үшін, екі шексіз ұзын  $a$  және  $b$  пластинкалардан құралған (8.2-сурет) жылу өткізбейтін (адиабаттық) жүйені қарастырамыз, тек пластинкалар ғана бір-бірімен жылу алмаса алады.



8.2-сурет. Екі пластинканың жылу алмасуы.

Пластинканың  $a$  беті абсолют қара. Термодинамикалық тепе-теңдік күйінде екі пластинканың температурасы да бірдей және сәуле шығару тепе-теңдік күйде болады. Дененің сәуле шығару және жұту анықтамасы бойынша екі пластинка үшін былай жазуға болады:

$$\begin{aligned}dW_{\text{шығ}} &= E(\nu, T) d\nu, \\dW_{\text{жұт}} &= A(\nu, T) dW.\end{aligned}\quad (8.3)$$

Термодинамикалық тепе-теңдік күйінде

$$dW = dW_{\text{шығ}}.$$

Абсолют қара  $a$  пластинкасы үшін

$$dW_{\text{шығ}} = \varepsilon(\nu, T) d\nu, \quad (8.4)$$

$a$  пластинкасы энергияны шағылдырмай толық жұтатындықтан, бұл пластинканың сәуле шығару энергиясы пластинкаға келіп түскен энергияға тең болады:  $dW_{\text{шығ}} = dW$ . Сондықтан (8.3) өрнегінен алатынымыз:

$$dW_{\text{жұт}} = A(\nu, T) \varepsilon(\nu, T) d\nu.$$

Термодинамикалық тепе-теңдік күйінде  $dW_{\text{шығ}} = dW_{\text{жұт}}$ , олай болса

$$E(\nu, T) d\nu = A(\nu, T) \varepsilon(\nu, T) d\nu$$

немесе

$$E(\nu, T) / A(\nu, T) = \varepsilon(\nu, T). \quad (8.5)$$

Сонымен, дененің сәуле шығару қабілетінің оның жұту қабілетіне қатынасы дененің химиялық құрамына тәуелді болмайды және ол абсолют қара дененің сәуле шығару қабілеті болып, ол температура мен жиіліктің  $f(\nu, T)$  функциясы болып табылады. Бұл заңды бірінші рет Кирхгоф тағайындады, сондықтан бұл заң *Кирхгоф заңы* деп аталып, ал  $\epsilon(\nu, T)$  функциясы *Кирхгоф функциясы* деген атқа ие болды. Кирхгоф заңынан  $A(\nu, T)=1$  болса, онда  $E(\nu, T)=\epsilon(\nu, T)$ , ал егер  $A(\nu, T)=0$  болса, онда  $\epsilon(\nu, T)=\infty$  болады. Сондықтан, егер дене берілген температурада берілген жиіліктер аралығында жұтпайтын болса, онда ол бұл температура да және бұл жиіліктер аралығында да сәуле шығармайды, яғни сәулеленбейді.

0-ден  $\infty$  -ке дейінгі жиіліктегі барлық спектр бойынша толық сәуле шығару қуаты дененің энергетикалық жарқырауы немесе интегралды сәуле шығару қабілеті  $E(T)$  деп аталады. Анықтама бойынша, ол мынаған тең:

$$E(T) = \int_0^{\infty} \varepsilon(\nu, T) d\nu$$

немесе Кирхгоф заңын есепке алсақ, онда

$$E(T) = \int_0^{\infty} A(\nu, T) \varepsilon(\nu, T) d\nu. \quad (8.6)$$

Абсолют қара дене үшін  $A(\nu, T) = 1$ , сондықтан

$$E(T) = \int_0^{\infty} \varepsilon(\nu, T) d\nu. \quad (8.7)$$



Бұдан әрі жылулық сәуле шығару теориясының негізгі мәселесі Кирхгоф функциясының ашық түрін іздеу болып табылады. 1879 жылы Д.Стефан тәжірибелік мәліметтерді талдау негізінде төмендегідей қорытындыға келді: *кез-келген дененің энергетикалық жарқырауы абсолют температураның төрт дәрежесіне пропорционал болады.* Бірақ Л.Больцман 1884 жылы термодинамикалық әдіспен теориялық түрде бұл пікірдің тек абсолют қара дене үшін дұрыс болатындығын көрсетті. Сондықтан, бұл тәуелділік физика тарихында *Стефан-Больцман заңы* деп аталады:

$$\varepsilon(T) = \sigma \cdot T^4 \quad (8.8)$$

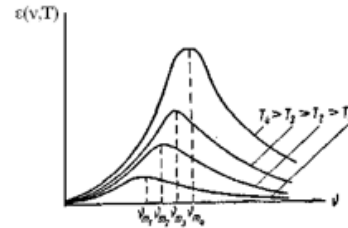
*яғни, абсолют қара дененің энергетикалық жарқырауы абсолют температураның төртінші дәрежесіне тура пропорционал.*

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} (\text{Вт}/\text{м}^2\text{К}^4)$  – пропорционалдық коэффициенті *Стефан-Больцман тұрақтысы* деп аталады. Бірақ, олар Кирхгоф функциясының ашық түрін шешкен жоқ. Кирхгоф функциясының ашық түрін ашудағы алғашқы қадамды 1893 жылы В. Вин жасады. Ол, жылжып айналатын поршені бар және айналы қабырғалары бар цилиндрлік ыдыста абсолют қара дененің адиабатты сығу сәулеленуі туралы есепті қарастырды. Осының нәтижесінде ол Кирхгоф функциясы үшін келесі өрнекті алды:

$$\varepsilon(\nu, T) = f(\nu, T) = V^3 f(\nu, T), \quad (8.9)$$

мұндағы  $f(\nu, T)$  – кейбір белгісіз ашық түрдегі функция. В.Вин  $f(\nu/T)$  функциясының ашық түрін тағайындамаса да, осы В.Виннің өрнегінен (8.9) Стефан-Больцман заңы шығады.

Абсолют қара дененің сәуле шығару қабілетінің әртүрлі температурадағы жиілікке тәуелділігі 8.3-суретте көрсетілген түрде болатындығы тәжірибелерден белгілі.



8.3- сурет. Сәуле шығару қабілетінің  $\varepsilon(v, T)$  жиілікке  $\nu$  тәуелділігі.

Суреттен, температураның артуына байланысты абсолют қара дененің сәуле шығару қабілетінің артатындығын көреміз. Сонымен бірге қара дененің сәуле шығару қабілетінің максимум мәні, температураның өсуіне байланысты жоғары жиілік аймағына қарай орын ауыстырады. В.Вин өрнегі бұл құбылыстарды Вин заңы түрінде анықтауға мүмкіндік береді. Абсолют қара дененің сәуле шығару қабілетінің максимум мәніне келетін берілген температура кезіндегі  $\nu_{\max}$  сәуле шығару жиілігі Кирхгоф функциясынан алынған дербес туындыны нөлге теңестіру шарты арқылы оңай түрде анықталады:

$$\frac{\partial \varepsilon(\nu, T)}{\partial \nu} = 3\nu_m^2 \cdot f\left(\frac{\nu}{T}\right) + \frac{\nu_m^2}{T} f'\left(\frac{\nu_m}{T}\right) = 0. \quad (8.10)$$

Соңғы теңдіктен мынау алынады

$$3f\left(\frac{\nu_{\max}}{T}\right) = -\left(\frac{\nu_{\max}}{T}\right) \cdot f'\left(\frac{\nu_{\max}}{T}\right).$$

Қорытындысында Виннің ығысу заңын аламыз:

$$\left(\frac{\nu_{\max}}{T}\right) = b. \quad (8.11)$$

Заңның тұжырымы:

абсолют қара дененің сәуле шығару қабілетінің максимум мәніне келетін жиілік оның абсолют температурасына тура пропорционал болады.  $b$  – Виннің  $f(\nu/T)$  функциясының ашық түрінен тәуелді болатын тұрақты шама. Әдетте Виннің ығысу заңын сәуле шығарудың толқын ұзындығы арқылы жазады:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \quad (8.12)$$

мұндағы  $\lambda_{\max}$  – абсолют қара дененің сәуле шығару қабілетінің максимум мәніне келетін толқын ұзындығы, ол температураның өсуіне байланысты қысқа толқын ұзындығына қарай ығысады.  $b$  – Вин тұрақтысы ( $b = 2,898 \cdot 10^{-3}$  мК) деп аталады, ол тәжірибелік жолмен анықталады.

Назарларыңызға рахмет!