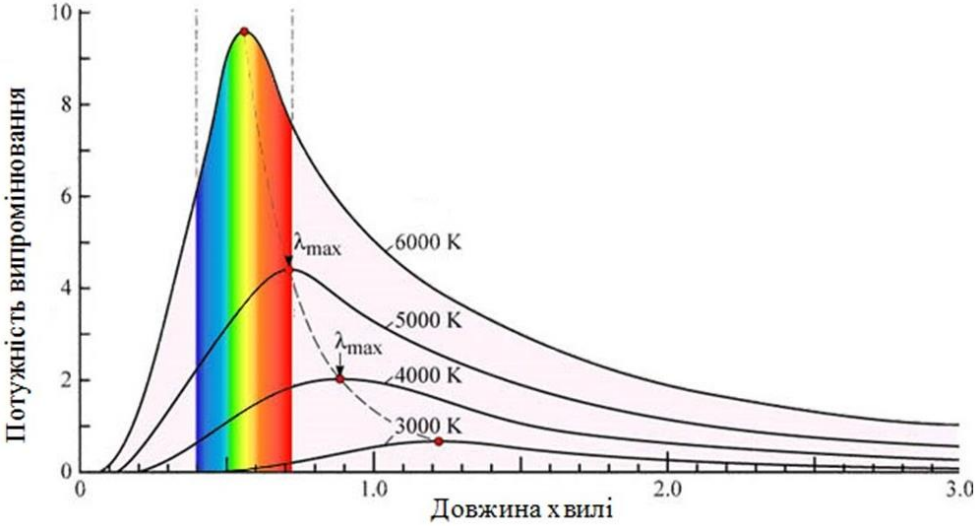
ТЕПЛОВЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ

к.ф.-м.н., ст. викл. Пилипенко О.В.

Тепловим випромінюванням



називається електромагнітне випромінювання, що випускається тілами за рахунок їх внутрішньої енергії. Світіння, що збуджується за рахунок інших видів енергії (крім внутрішньої), називають **люмінесценцією**. На відміну від люмінесценції теплове випромінювання здатне перебувати в *термодинамічній рівновазі з речовиною*. *Ця властивість є характерною ознакою теплового випромінювання.* Тому теплове випромінювання називають рівноважним випромінюванням.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Потік енергії – загальна кількість енергії, яка випромінюється тілом за одиницю часу (енергетична потужність):

$$\Phi = \frac{dW}{dt} \qquad [\Phi] = Вт$$

Потік енергії, що випускається одиницею поверхні випромінюючого тіла в усіх напрямках (у межах тілесного кута 2π), називають **енергетичною світністю тіла**:

$$\boxed{R = \frac{d\Phi}{dS}}$$

енергетична світність R є функцією абсолютної температури T

Випромінювання складається із хвиль різних частот ω (або довжин λ). Позначимо потік енергії, що випускається одиницею поверхні тіла (тобто світність) в інтервалі частот dω , через dR_ω .

$$\boxed{dR_\omega = r_\omega d\omega}$$

Величина r_ω у співвідношенні називається **випромінювальною здатністю тіла**.

енергетична світність залежить також і від температури, її інколи записують у такому вигляді: $r_{\omega T}$

Енергетична світність пов'язана з випромінювальною здатністю:

$$R = \int dR_\omega = \int_0^\infty r_\omega d\omega$$

Випромінювання можна характеризувати замість частоти довжиною хвилі λ . Ділянці спектра d буде відповідати інтервал довжин хвиль d λ . Величини d ω й d λ , які визначають одну і ту саму ділянку, пов'язані простим співвідношенням, що випливає з формули **λ = 2πc / ω** .

$$d\lambda = -\frac{2\pi c}{\omega^2} d\omega = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} d\omega$$

Частина енергетичної світності, що припадає на інтервал d λ:

$$\boxed{dR_\lambda = r_\lambda d\lambda}$$

Якщо інтервали dω й dλ повязані співвідношенням і входять у вирази для визначення енергетичної світності то величини dR_ω і dR_λ повинні збігатися.

$$r_\omega d\omega = r_\lambda d\lambda$$

$$r_\omega d\omega = r_\lambda \frac{2\pi c}{\omega^2} d\omega = r_\lambda \frac{\lambda^2}{2\pi c} d\omega$$

$$\boxed{r_\omega = r_\lambda \frac{2\pi c}{\omega^2} = r_\lambda \frac{\lambda^2}{2\pi c}}$$

Поглинальна здатність тіла

Нехай на елементарну площадку поверхні тіла падає потік енергії теплового випромінювання $d\Phi_\omega$, що обумовлений електромагнітними хвилями, частота яких знаходиться в інтервалі $d\omega$. Частина цього потоку dF'_ω буде поглинута тілом.

$$\boxed{a_{\omega T} = \frac{d\Phi'_\omega}{d\Phi_\omega}}$$

Для тіла, що повністю поглинає випромінювання всіх частот, яке падає на нього, поглинальна здатність дорівнює одиниці: $a_{\omega T}=1$. Таке тіло називається **абсолютно чорним**. Тіло, для якого $a_{\omega T}=a_T=$ const <1, називають **сірим**.

Закон Кірхгофа

чим більша випромінювальна здатність тіла $r_{\omega T}$, тим більша і його поглинальна здатність $a_{\omega T}$.

$$\left(\frac{r_{\omega T}}{a_{\omega T}}\right)_1 = \left(\frac{r_{\omega T}}{a_{\omega T}}\right)_2 = \left(\frac{r_{\omega T}}{a_{\omega T}}\right)_3 = \ldots$$

де індекси 1, 2, 3 і т.д. характеризують різні тіла

закон Кірхгофа: відношення випромінювальної та поглинальної здатностей не залежить від природи тіла, воно є для всіх тіл однією й тією самою універсальною функцією частоти (довжини хвилі) і температури:

$$\boxed{r_{\omega T} / a_{\omega T} = f(\omega, T)}$$

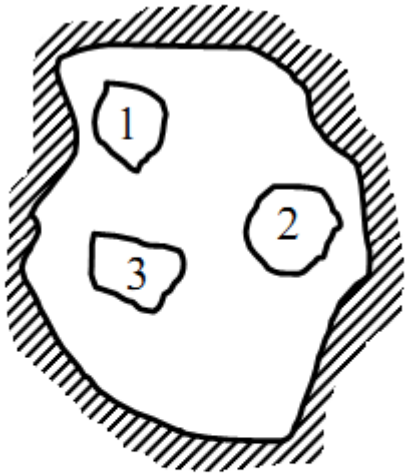


Рисунок 68.1 – Тіла, поміщені в евакуйовану порожнину, стінки якої підтримуються при незмінній температурі

Для абсолютно чорного тіла за визначенням $a_{\omega T} = 1$. Отже, з формули (68.2) випливає, що $r_{\omega T}$ для такого тіла дорівнює $f(\omega, T)$. Таким чином, ***універсальна функція Кірхгофа*** $f(\omega, T)$ *є випромінювальною здатністю абсолютно чорного тіла.*

Випромінювання, що проникло усередину через отвір, перш ніж вийти назад з отвору, багато разів відбивається від внутрішніх стінок. При кожному відбитті частина енергії поглинається, у результаті чого практично все випромінювання будь-якої частоти такою порожниною поглинається. Відповідно до закону Кірхгофа випромінювальна здатність такого пристрою дуже близька до *f(ω,T)* , причому T означає температуру стінок порожнини.

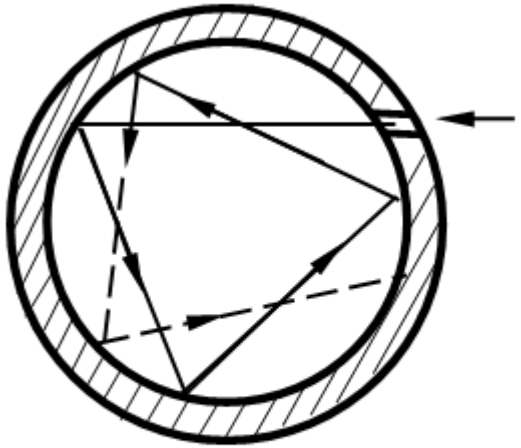
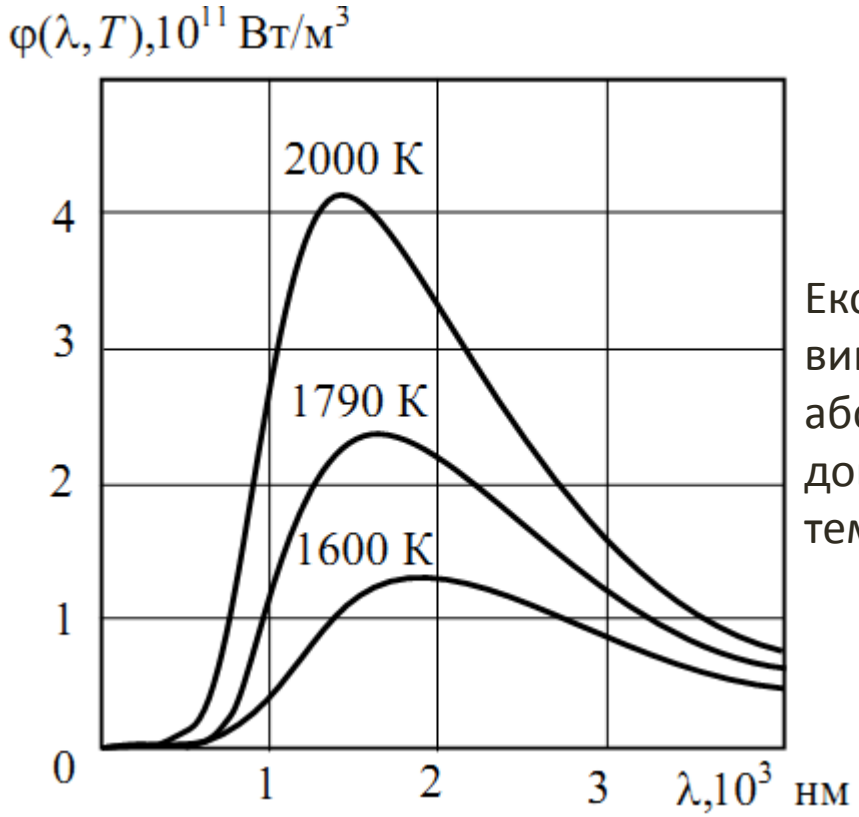


Рисунок 68.2 – Модель абсолютно чорного тіла

Таким чином, якщо стінки порожнини підтримувати при деякій температурі T , то з отвору виходить випромінювання, яке є досить близьким за спектральним складом до випромінювання абсолютно чорного тіла при тій самій температурі. Розкладаючи це випромінювання у спектр за допомогою дифракційної решітки й вимірюючи інтенсивність різних ділянок спектра, можна знайти експериментально вигляд функції *f(ω,T)* від φ(λ,T)



Експериментальні криві залежності випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла від довжини хвилі для трьох значень температури

Закон Стефана-Больцмана

- Теоретичне пояснення законів випромінювання абсолютно чорного тіла мало величезне значення в історії фізики
- Стефан, аналізуючи експериментальні дані, дійшов висновку, що енергетична світність будь-якого тіла пропорціональна четвертому ступеню термодинамічної температури. Однак наступні більш точні виміри показали помилковість його висновків.
- У 1884 р. Больцман, виходячи з термодинамічних міркувань, отримав теоретично для енергетичної світності абсолютно чорного тіла значення– воно привело до поняття квантів енергії.

$$\boxed{R^* = \int_0^\infty f(\omega, T)\,d\omega = \sigma T^4}$$

σ – стала величина; T – термодинамічна температура.

$$\sigma = 5{,}670 \cdot 10^{-8}\ \text{Вт}/\left(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4\right)$$

Закон зміщення Віна

2 У 1893 р. Він, скориставшись, крім термодинаміки, електромагнітною теорією, показав, що універсальна функція Кірхгофа повинна мати вигляд

$$\boxed{f(\omega,T)=\omega^3 F\left(\frac{\omega}{T}\right)}, \qquad (69.3)$$

де F – деяка функція відношення частоти до температури. *Співвідношення (69.3) отримало назву* ***формули Віна***.

Використовуючи зв'язок між $f(\omega,T)$ і $\varphi(\lambda,T)$

$$\varphi(\lambda,T)=\frac{2\pi c}{\lambda^2} f\left(\frac{2\pi c}{\lambda},T\right)$$

З розв'язку цих рівнянь можна отримати закон Віна:

$$\boxed{\lambda_m T = b}$$

Експериментальне значення константи *b* дорівнює:

$$b = 2{,}898\cdot 10^{-3}\ \text{м}\cdot\text{К}$$

Формула Релея-Джинса

Загальний метод теоретичного визначення функції $f(\omega,T)$ в рамках класичної фізики був запропонований Релеєм і пізніше розвинений Джинсом. З позицій класичної фізики доведення Релеєм та Джинсом універсальної функції Кірхгофа було бездоганним, однак з дослідом отриманий результат не узгоджувався. Ця розбіжність отримала назву ультрафіолетової катастрофи.

Функцію Кірхгофа $f(\omega,T)$, яка точно відповідає експериментальним даним, вдалося знайти М.Планку в 1900 р. При цьому йому довелося використати далеке від класичних уявлень припущення, що електромагнітне випромінювання випускається у вигляді окремих порцій енергії (квантів). Це було народженням **квантової фізики**.

Доведення універсальної функції Кірхгофа Релеєм-Джинсом та Планком відрізняються лише способом знаходження середньої енергії одного коливання.

Формули Релея-Джинса для теплового випромінювання

$$u_\omega = \frac{\omega^2 kT}{\pi^2 c^3}$$

$$f(\omega, T) = \frac{c}{4}\frac{\omega^2 kT}{\pi^2 c^3} = \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2} kT$$

Формули Релея-Джинса, для теплового випромінювання задовільно узгоджуються з експериментальними даними лише при великих довжинах хвиль і різко розходяться з дослідом для малих довжин хвиль (див. рис. на якому суцільною лінією зображена експериментальна крива, штриховою – крива, побудована за формулою Релея-Джинса).

Інтегрування виразу за ω у межах від 0 до ∞ дає для енергетичної світності абсолютно чорного тіла R нескінченно велике значення. Цей результат, який отримав назву **ультрафіолетової катастрофи**, також суперечить досліду.

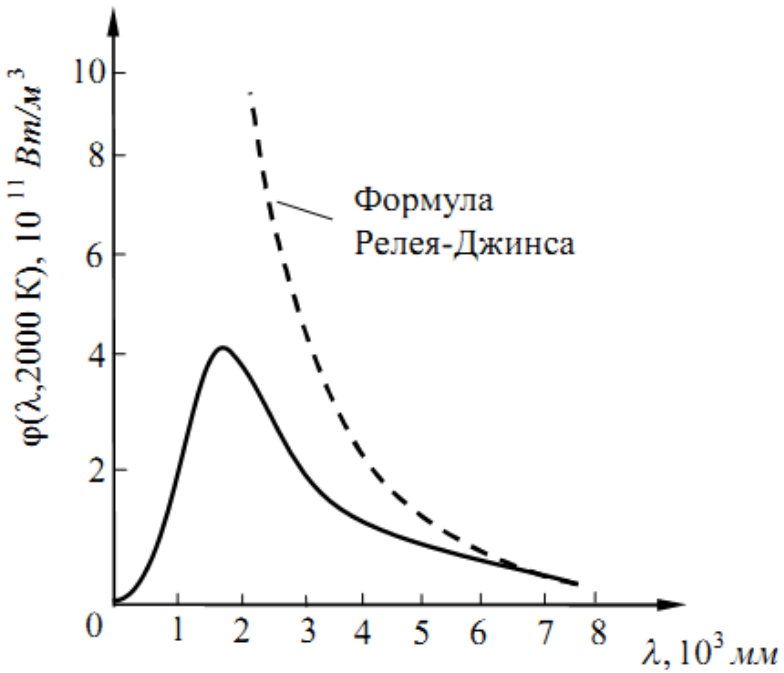


Рисунок 70.1 Криві залежності випромінювальної здатності $\varphi(\lambda)$ абсолютно чорного тіла від довжини хвилі. Суцільна крива отримана експериментально, штрихова крива побудована за формулою Релея-Джинса

Гіпотеза Планка

Щоб отримати функцію Кірхгофа $f(\omega,T)$, яка узгоджується з експериментальними даними, М.Планку довелося використати далеке від класичних уявлень припущення (гіпотеза Планка): електромагнітне випромінювання випускається у вигляді окремих порцій енергії (квантів), які пропорційні частоті випромінювання:

$$\boxed{\varepsilon = \hbar\omega = h\nu}$$

де $\omega=2\pi\nu$; ν – частота електромагнітної хвилі, коефіцієнти пропорційності $\hbar$ та h отримали з часом назву сталої Планка. Визначене з досліду значення цієї сталої дорівнює

$$\hbar = 1{,}0545915\cdot10^{-34}\ \text{Дж·с}, \quad h = 2\pi\hbar = 6{,}6261937\cdot10^{-34}\ \text{Дж·с}.$$

Гіпотеза Планка дала початок новому напрямку розвитку фізики, який отримав назву квантової фізики. Гіпотеза Планка дала початок зміні уявлень людства про мікроскопічний світ.