

## Лекція №4. Закони теплового випромінювання

### 78. Теплове випромінювання. Абсолютно чорне тіло.

#### **Закон Кірхгофа. Закон Стефана-Больцмана**

Тіла, нагріті до досить високої температури, набувають здатності світитися. Наприклад, розпечені тверді і рідкі тіла випромінюють біле світло, яке має суцільний спектр частот. Із зниженням температури тіла не лише зменшується інтенсивність його випромінювання, а й змінюється спектр випромінювання. У ньому дедалі більше переважають довгі хвилі (червоні та інфрачервоні). При подальшому охолодженні тіло взагалі припиняє випромінювати видиме світло – воно випромінює невидимі оком інфрачервоні промені.

***Свічення тіл, зумовлене нагріванням, називається тепловим (температурним) випромінюванням.***

Теплове випромінювання є найпоширенішим у природі і здійснюється за рахунок енергії теплового руху атомів і молекул речовини, тобто за рахунок внутрішньої енергії і тому залежить від температури речовини.

Введемо поняття, які характеризують теплове випромінювання і поглинання тіл.

***Кількість  $R_T$  енергії, що випромінюється з  $1 \text{ м}^2$  поверхні тіла за  $1 \text{ с}$  по всіх довжинах хвиль, називається інтегральною випромінювальною здатністю, або енергетичною світністю тіла.***

Дослідження показують, що енергія випромінювання розподіляється між всіма частотами хвиль, які випромінюються нагрітим тілом.

***Кількісною характеристикою теплового випромінювання є випромінювальна здатність тіла, яка числова дорівнює потужності випромінювання в одиниці площі поверхні цього тіла в одиничному інтервалі частот:***

$$r_{\nu,T} = \frac{dW_{\nu,\nu+d\nu}^e}{d\nu},$$

де  $dW_{\nu,\nu+d\nu}^e$  – енергія електромагнітного випромінювання, що випромінюється за одиницю часу з одиниці площі поверхні тіла в інтервалі частот від  $\nu$  до  $\nu+d\nu$ .

Випромінювальна здатність може бути зображена і як функція довжини хвилі, причому

$$r_{\lambda,T} = \frac{c}{\lambda^2} r_{\nu,T}.$$

Інтегральна випромінювальна здатність  $R_T$  тіла зв'язана з випромінювальною здатністю  $r_{\nu,T}$  співвідношенням:

$$R_T = \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu.$$

Усі тіла тією чи іншою мірою поглинають енергію електромагнітних хвиль, які падають на них.

**Поглинальна здатність тіла  $A_T$  дорівнює відношенню енергії, то поглинається тілом за одиницю часу одиницею площі, до енергії, що падає на тіло при даній температурі.**

**Спектральна поглинальна здатність тіла  $a_{\nu,T}$  показує, яка частина енергії  $dW_{\nu,\nu+d\nu}$  доставляється за одиницю часу на одиницю поверхні тіла електромагнітними хвилями з частотами від  $\nu$  до  $\nu+d\nu$ , які падають на неї, поглинаються тілом:**

$$a_{\nu,T} = \frac{dW_{\nu,\nu+d\nu}^n}{dW_{\nu,\nu+d\nu}}.$$

Поглинажна здатність  $a_{\nu,T}$  – величина безрозмірна.

Досліди показують, що випромінювальна здатність  $r_{\nu,T}$  і поглинальна  $a_{\nu,T}$  тіла залежать від частоти  $\nu$  хвиль, які відповідно випромінюються або поглинаються, температури тіла, його хімічного складу і стану поверхні.

**Тіло, яке здатне поглинати повністю при будь-якій температурі всю енергію електромагнітних хвиль, які падають на нього, незалежно від їх частоти, називається абсолютно чорним.**

Отже, поглинальна здатність абсолютно чорного тіла дорівнює одиниці:  $a_{\nu,T} = 1$  для всіх частот і температур.

Випромінювальну здатність абсолютно чорного тіла позначимо  $r_{\nu,T}^*$ . Вона залежить тільки від частоти  $\nu$  і абсолютної температури тіла  $T$ .

Найдосконалішою моделлю абсолютно чорного тіла може бути невеликий отвір  $O$  в непрозорій стінці замкненої порожнини, внутрішня поверхня якої зачорнена. Світло, яке потрапляє всередину порожнини через отвір  $O$ , багаторазово відбивається від стінок порожнини, перш ніж вийти з порожнини назад. При кожному відбиванні енергія світла частково поглинається стінками. Тому незалежно від матеріалу стінок інтенсивність світла, яке виходить з порожнини через отвір  $O$ , у багато разів менша за інтенсивність первинного світла, яке падає ззовні.

Поряд з поняттям абсолютно чорного тіла використовують поняття *сірого тіла*.

**Сіре тіло – тіло, поглинальна здатність якого менша від одиниці, але однакова для всіх частот і залежить лише від температури, матеріалу і стану поверхні тіла:**

$$a_{\nu,T}^c = \text{const} < 1.$$

Кірхгоф, спираючись на закони термодинаміки й аналізуючи умови рівноважного випромінювання в ізольованій системі тіл, встановив кількісний зв'язок між випромінювальною здатністю тіла і його поглинальною здатністю.

## Закон Кірхгофа:

*відношення випромінювальної здатності тіла до його поглинальної здатності не залежить від матеріалу тіла; воно є для всіх тіл універсальною функцією частоти  $\nu$  і температури  $T$ :*

$$\frac{r_{\nu,T}}{a_{\nu,T}} = r_{\nu,T}^*.$$

Для абсолютно чорного тіла  $a_{\nu,T}^c = 1$ , тому  $r_{\nu,T}^* = r_{\nu,T}$ , тобто універсальна функція Кірхгофа  $r_{\nu,T}^*$ , є не що інше, як випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла.

Для довільного тіла  $a_{\nu,T} < 1$  і тому в довільній області спектра  $r_{\nu,T}^* < r_{\nu,T}$ .

Якщо тіло не поглинає електромагнітні хвилі якоїсь частоти, то воно їх і не випромінює, оскільки при  $a_{\nu,T} = 0$ ,  $r_{\nu,T} = 0$ .

Використовуючи закон Кірхгофа, виразу для інтегральної випромінювальної здатності можна надати вигляду:

$$R_T = \int_0^{\infty} a_{\nu,T} r_{\nu,T}^* d\nu.$$

Для сірого тіла

$$R_T^c = a_{\nu,T}^c \int_0^{\infty} r_{\nu,T}^* d\nu = a_{\nu,T}^c R_T^*,$$

де  $R_T^* = A_T \int_0^{\infty} r_{\nu,T}^* d\nu$  – інтегральна випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла,

яке залежить лише від абсолютної температури  $T$ .

У 1884р. Л. Больцман, застосувавши термодинамічний метод для дослідження чорного випромінювання, теоретично показав, що

*інтегральна випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла пропорційна четвертому степеню його абсолютної температури.*

$$R_T^* = \sigma T^4.$$

Цей закон називають **законом Стефана-Больцмана**, бо Д. Стефан на основі експериментальних даних дійшов аналогічного висновку. Але Д. Стефан помилково вважав, що інтегральна випромінювальна здатність будь-якого тіла також пропорційна четвертому степеню його абсолютної температури.

Коефіцієнт пропорційності  $\sigma$  – стала **Стефана-Больцмана**. Внаслідок численних експериментів знайдено, що

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{Вт}{м^2 K^4}.$$

Енергія, яка випромінюється за час  $t$  абсолютно чорним тілом з поверхні  $S$  при постійній температурі  $T$ , дорівнює:

$$W = \sigma T^4 St.$$

## 79. Розподіл енергії в спектрі абсолютно чорного тіла.

### Закон зміщення Віна

Розподіл енергії в спектрі випромінювання абсолютно чорного тіла вивчено експериментально до кінця XVIII ст. В ролі абсолютно чорного тіла використовували порожнину з малим отвором, а також вугілля.

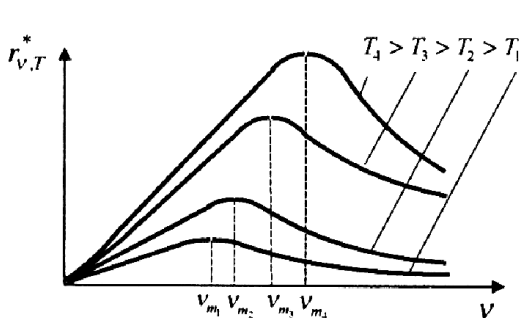


Рис. 122

Експерименти показали, що залежність  $r_{v,T}^*$  від частоти  $\nu$  при різних температурах  $T$  абсолютно чорного тіла має вигляд, зображений на рис. 100.

При малих частотах  $r_{v,T}^* \sim \nu^2 T$ , а в області великих частот залежність  $r_{v,T}^*$  від частот має вигляд

$$r_{v,T}^* \sim \nu^3 e^{-\frac{a_1 \nu}{T}}, \text{ де } a_1 - \text{сталий коефіцієнт, } [a_1] = K \cdot c.$$

Цю залежність встановив В. Він.

Існування на кожній кривій більш або менш чітко вираженого максимуму свідчить про те, що енергія випромінювання абсолютно чорного тіла розподілена по його спектрі нерівномірно: абсолютно чорне тіло майже не випромінює енергії в області дуже малих і дуже великих частот. З підвищенням температури тіла максимум  $r_{v,T}^*$  зміщується в область великих частот.

Площа, обмежена кривою залежності  $r_{v,T}^*$  від  $\nu$  і віссю абсцис, пропорційна до інтегральної випромінювальної здатності  $R_T^*$  абсолютно чорного тіла. Тому за законом Стефана-Больцмана вона зростає пропорційно до  $T^4$ .

Використовуючи закони термодинаміки і електродинаміки, В. Він у 1893 р. встановив характер залежності випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла  $r_{v,T}^*$  від частоти і температури. Було встановлено, що величина  $r_{v,T}^*$  прямо пропорційна кубу частоти і є функцією відношення  $\nu/T$ , тобто

$$r_{v,T}^* = \nu^3 f\left(\frac{\nu}{T}\right),$$

де  $f(\nu/T)$  – функція відношення частоти випромінювання абсолютно чорного тіла до його температури. Віну не вдалося теоретично встановити вигляд функції  $f(\nu/T)$ . Закон Віна дав змогу досягнути ряд важливих результатів.

Із закону Віна можна знайти залежність від температури частоти  $\nu_m$ , яка відповідає максимальному значенню випромінювальної здатності  $r_{\nu,T}^*$  абсолютно чорного тіла.

### **Закон зміщення Віна:**

*частота, яка відповідає максимальному значенню випромінювальної здатності  $r_{\nu,T}^*$  абсолютно чорного тіла, прямо пропорційна його абсолютній температурі:*

$$\nu_m = b_1 T .$$

Закон зміщення Віна записують і в дещо іншій формі, розглядаючи максимум випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла  $r_{\nu,T}^*$ , віднесеної до інтервалу  $d\lambda$  довжин хвиль (у вакуумі).

### **Закон зміщення Віна:**

*довжина хвилі  $\lambda_m$ , яка відповідає максимальному значенню випромінювальної здатності  $r_{\nu,T}^*$  абсолютно чорного тіла, обернено пропорційна його температурі:*

$$\lambda_m = \frac{b}{T} .$$

Із закону Віна видно, що при зниженні температури чорного тіла максимум і енергії його випромінювання зміщується в область великих довжин хвиль.

Значення максимуму випромінювальної здатності  $r_{\nu,T}^*$  абсолютно чорного тіла пропорційне п'ятому степеню його абсолютної температури:

$$(r_{\lambda,T}^*)_{\max} = b_2 T^5 ,$$

де  $b_2 = 1,29 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3 \text{К}^5} .$