

# КВАНТОВА ФІЗИКА

## Лекція 1.

### Теплове випромінювання і його характеристики

*Тепловим* випромінюванням називається випускання електромагнітних хвиль нагрітими тілами за рахунок їх внутрішньої енергії. Теплове випромінювання властиве всім тілам при температурі вище 0К і має суцільний спектр частот. При цьому випромінювання всіх довжин хвиль обумовлено коливаннями електричних зарядів, що входять до складу речовини, тобто іонів і електронів. Коливання іонів дає випромінювання з низькими частотами (інфрачервоне) внаслідок їх значительної маси. Рух електронів, що входять до складу атомів або молекул, створює високочастотне випромінювання (видиме й ультра-фіолетове).

Випромінювання супроводжується втратою енергії тілом. Поповнення енергії може здійснюватися різними способами. Всі види випромінювань, порушені за рахунок будь-якого виду енергії, крім теплової (хімічної реакції, освітлення, електричного розряду і т.д.), об'єднуються під загальною назвою люмінесценції. При тепловому випромінюванні енергія поповнюється за рахунок нагрівання тіла.

*Теплове випромінювання* - єдиний вид випромінювання, який являється рівноважним. Всі інші види випромінювань - *нерівноважні*. Пояснимо це на прикладі. Нехай нагріте (яке випромінює) тіло поміщено в порожнину, обмежений ідеально відображає оболонкою. За рахунок випромінювання температура тіла зменшується. Але тіло одночасно з випромінюванням отримує назад частину цієї енергії, відображеної від порожнини. В результаті безперервного обміну енергією між тілом і випромінюванням через деякий час настане рівновага, тобто тіло в одиницю часу буде стільки ж поглинати енергії, скільки і випромінювати. При цьому температура тіла не буде змінюватися. Припустимо, що рівновага з якої-небудь причини порушено, і тіло випромінює в одиницю часу енергії більше, ніж поглинає (або навпаки). Тоді температура тіла почне знижуватися (або зростати). В результаті буде зменшуватися (або зростати) кількість випромінюваної в одиницю часу тілом енергії, доки, нарешті, не установиться рівноважний стан системи тіло-випромінювання.

Нехай в порожнину поміщено тіло, що містить фосфор. Це тіло дає додатковий (до теплового) люмінесцентне випромінювання за рахунок хімічного процесу окислення фосфору. Люмінесцентне випромінювання триває до повного окислення фосфору, причому воно не супроводжується поповненням енергії ззовні. Отже, люмінесценція – *неврівноважене* випромінювання.

Теплове або рівноважне випромінювання підпорядковується певним загальним закономірностям, що впливають з принципів термодинаміки. Однак перш ніж перейти до розгляду законів теплового випромінювання, необхідно ввести його основні характеристики.

Розглянемо основні характеристики теплового випромінювання.

Потік випромінювання  $\Phi_e$  - фізична величина, що дорівнює кількості енергії, випромінюваної нагрітим тілом з усією поверхні в одиницю часу:

$$\Phi_e = \frac{dW}{dt} \quad [\text{Дж/с} = \text{Вт}].$$

Енергетична світність (випромінювальні) тіла  $R_T$  - енергія, яку випромінює в одиницю часу з одиниці площі нагрітого тіла у всьому інтервалі довжин хвиль ( $0 < \lambda < \infty$ ). Енергетична світність пов'язана з струмом випромінювання формулою:

$$R_T = \frac{d\Phi_e}{dS} = \frac{d^2W}{dSdt} \quad [\text{Вт/м}^2]. \quad (2)$$

Потік випромінювання і енергетична світність - функції температури.

Випромінювання нагрітого тіла при даній температурі  $T$  складається з хвиль різної довжини (або частоти), причому хвилі різних довжин несуть відмінні один від одного енергію. Тому в різних частинах спектра випромінювання енергія, яка припадає на одиничний інтервал довжин хвиль, різна. Отже, повинна існувати функція розподілу, що відображає залежність енергії випромінювання від довжини хвилі, біля якої взято цей одиничний інтервал. Такою функцією є спектральна щільність енергетичної світності (излучательности)  $r_{\lambda,T}$ . Це величина, чисельно дорівнює енергії, випромінюваної нагрітим тілом в одиницю часу з одиниці площі і яка припадає на одиничний інтервал довжин хвиль, взятий близько заданої довжини хвилі.

Енергетична світність  $R_T$ , яка є інтегральною характеристикою випромінювання, пов'язана зі спектральною щільністю енергетичної світності співвідношенням

$$r_{\lambda,T} = \frac{dR_T}{d\lambda} \quad \left( \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3} \right). \quad (3)$$

Зі співвідношенням (4.3) можна знайти енергетичну світність (формула зв'язку між енергетичної світності і випромінювальної здатністю):

$$R_T = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda \quad (4)$$

Індекс "Т" у  $R_T$  і  $r_{\lambda,T}$  підкреслює залежність цих величин від температури.

Так як довжина хвилі і частота пов'язані відомим співвідношенням  $\lambda = c/\nu$ , спектральні характеристики випромінювання можна характеризувати також і частотою. Тоді ділянки спектра  $d\lambda$  буде відповідати інтеграл частот  $d\nu$ .

Будь-яке тіло не тільки випромінює, а й частково поглинає падаюча на нього енергію, тобто всі тіла здатні в тій чи іншій степені обмінюватися енергією (теплообмін випромінюванням). Спектральної характеристик поглинання є поглотительная здатність  $a_{\lambda,T}$ . Поглинальна здатність (коефіцієнт поглинання) тіла  $a_{\lambda,T}$  - безрозмірна фізична величина, що показує, яка частка

енергії, що падає в одиницю часу на одиницю поверхні тіла в інтервалі довжин хвиль від  $\lambda$  до  $\lambda+d\lambda$ , їм поглинається:

$$a_{\lambda,T} = \frac{dW_{\text{погл}}}{dW_{\text{пад}}} \quad (5)$$

Досвід показує, що  $r_{\lambda,T}$  і  $a_{\lambda,T}$  твердих тіл залежать не тільки від довжини хвилі і температури, але і від хімічного складу тіла і стану його по-поверхні.

За визначенням  $a_{\lambda,T}$  не може бути більшим за одиницю. Для тіла, повністю поглинає падаюче на нього випромінювання всіх довжин хвиль,  $a_{\lambda,T} = 1$ . Таке тіло називається абсолютно чорним. Для тіла, повністю відображає впало на нього випромінювання всіх довжин хвиль,  $a_{\lambda,T} = 0$ . Таке тіло називається *абсолютно білим*. Тіло, для якого поглинальна здатність однакова для всіх довжин хвиль і залежить тільки від температури, називають сірим:  $a_{\lambda,T} = a_T = \text{const}$ .

У природі не існує абсолютно чорних тіл. Але можна знайти тіла, дуже близькі за своїми властивостями до абсолютно чорних тіл (сажа, чорний оксамит). Найбільш досконалою моделлю абсолютно чорного тіла може служити невеликий отвір у непрозорій стінці замкнутої площини (рис. 1). Промінь світла, що потрапляє всередину порожнини через отвір, зазнає багатократних віддзеркалень від стінок порожнини, поглинається ними і практично повністю залишається всередині порожнини.

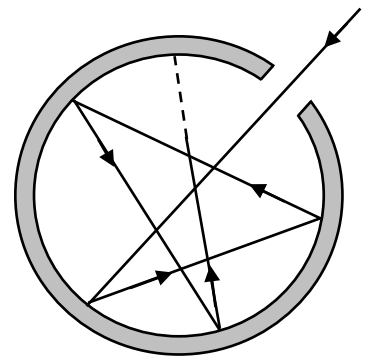


Рис. 1.

Схема моделі

Модель абсолютно чорного тіла дозволяє

зрозуміти, чому вузький вхід до печери або відкриті вікна дому зверху здаються чорними, хоча усередині досить світло. З цієї ж причини ворсисті тканини мають більшу поглинальну здатність, ніж гладкі.

## Закони теплового випромінювання

Між спектральною щільністю енергетичної світності і поглинальною здатністю будь-якого тіла є зв'язок, яка виражена-ється співвідношенням:

$$\left( \frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} \right)_{1\text{-тіла}} = \left( \frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} \right)_{2\text{-тіла}} = \dots = r_{\lambda,T}^* \quad (6)$$

(Тут і далі характеристики, відмічені зірочкою, відносяться до абсолютно чорного тіла). Співвідношення (4.6) називається *законом Кірхгофа*, а  $r_{\lambda,T}^*$  - *універсальною функцією Кірхгофа*. Цей закон формулюється наступним чином: відношення спектральної щільності енергетичної світності будь-якого тіла до його поглинальної здатності при дан довжині хвилі і температурі є величиною постійною для всіх тіл і дорівнює спектральній щільності

енергетичної світності абсолютно чорного тіла  $r_{\lambda,T}^*$  при тій же температурі і довжині хвилі (так як  $a_{\lambda,T}^* = 1$ ).

Із закону Кірхгофа випливає, що чим більше тіло поглинає, тим більше воно випромінює енергії, тобто спектральна щільність енергетичної світності будь-якого тіла в будь-якій області спектра завжди менша спектральної щільності енергетичної світності абсолютно чорного тіла при тих же значеннях  $\lambda$  і  $T$ , так як  $a_{\lambda,T} < 1$ . Так, наприклад, якщо розпечену білу чашку з чорним малюнком швидко дістати з печі в світлій кімнаті, то спочатку темний малюнок світиться яскравіше білого тла. Після охолодження, коли власне випромінювання чашки стає зникаюче малою, знову стає видимим темний візерунок на білому тлі.

Крім того, із закону Кірхгофа випливає, що якщо тіло не поглинає електромагнітні хвилі якийсь частоти, то воно їх і не випромінює, так як при  $a_{\lambda,T} = 0$ ,  $r_{\lambda,T} = 0$ .

Із закону Кірхгофа видно, що основним завданням при описі теплового випромінювання було знаходження залежності спектральної щільності енергетичної світності абсолютно чорного тіла від температури і довжини хвилі (частоти), так як вона універсальна для всіх тіл. Інтерес представляє і залежність енергетичної світності  $R_T^*$  від температури.

Залежність функції  $R_T^*$  від температури була отримана Д. Стефаном (1879 г.) з аналізу експериментальних даних, а потім Л. Больцманом (1884 г.) -

теоретичним шляхом. Ці вчені встановили, що енергетична світність абсолютно чорного тіла пропорційна його абсолютній температурі в четвертого ступеня:

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

(7)

де  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$

Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – постійна Стефана-Больцмана (знайдена експериментально).

Формула (7) носить назву закону Стефана - Больцмана.

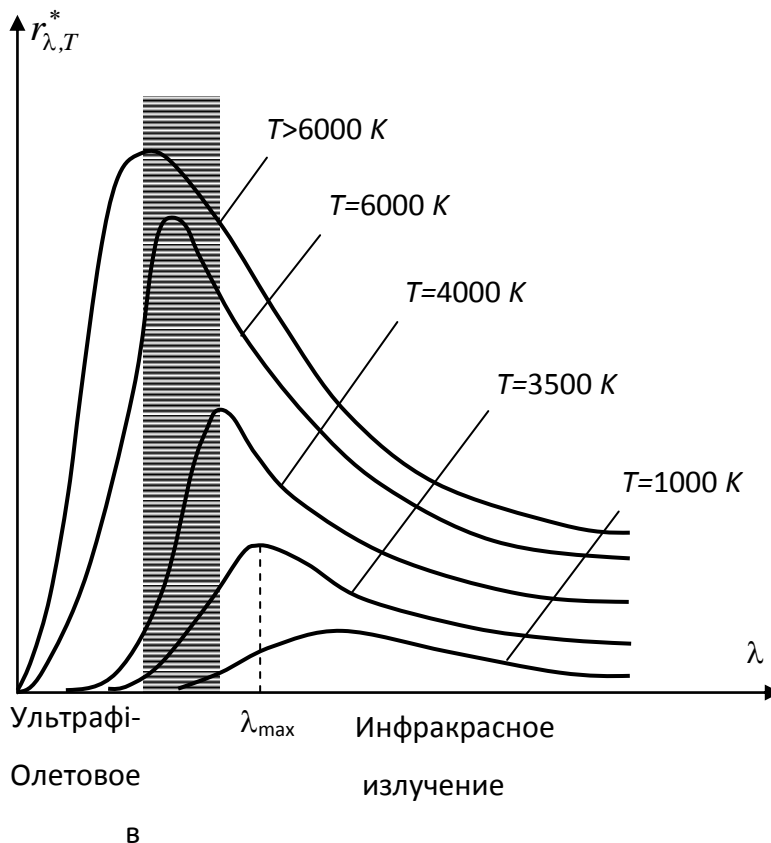


Рис. 2.

Температурная и спектральная зависимости универсальной функции Кирхгофа. Выделена область видимого излучения.

Значно складніше виявилася задача відшукування універсальної функції Кірхгофа, тобто залежно  $r_{\lambda,T}^*$  від довжини хвилі і температури. Як і катування отримати теоретично вид функції  $r_{\lambda,T}^*$  на основі уявлень класичної фізики не увінчалася успіхом. Експериментально ж була отримана система кривих (рис. 4.2), що дають розподілу  $r_{\lambda,T}^*$  по довжинах хвиль при фіксованих температурах ( $T = \text{const}$ ). Дослідження ходу кривих на рис. 2 встановлює наступні закономірності.

1. Залежність  $r_{\lambda,T}^*$  від довжини хвилі зображується неперервною кривою, що звертається в нуль при малих і великих довжинах хвиль.

2. Енергія випромінювання абсолютно чорного тіла розподілена по довжинах хвиль нерівномірно: крива має яскраво виражений максимум.

3. У міру підвищення температури тіла максимум кривої зміщується в область коротких довжин хвиль.

4. Площа, обмежена кривою і віссю абсцис, дорівнює енергетичною світності абсолютно чорного тіла  $R_{\text{T}}^*$ .

Залежність довжини хвилі  $\lambda_{\text{max}}$ , що відповідає максимуму функції  $r_{\lambda,T}^*$  від температури, що встановлює зсув  $\lambda_{\text{max}}$  в короткохвильовий діапазон довжин хвиль при збільшенні температури тіла була встановлена німецьким фізиком В.Віном (1893 г.) і отримала назву закону зміщення Віна:

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{b_1}{T}, \quad (8)$$

де  $b_1 = 2,89 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$  – постійна Віна.

Закон зміщення Віна, таким чином, встановлює: довжина хвилі, на яку припадає максимум спектральної щільності енергетичної світності абсолютно чорного тіла, обернено пропорційна абсолютній температурі цього тіла.

Цей закон пояснює, чому частка енергії, що припадає на видимі промені, зростає, і світіння тіла при нагріванні переходить від червоного до білого розжареного.

Аналітично встановити вид функції  $r_{\lambda,T}^*$  довгий час не вдавалося. Тільки в 1900 році німецький фізик Макс Планк припустив, що енергія випромінювання випускається тілом не неперервно у вигляді хвиль, а окремими пір-ціями - квантами. Енергія одного кванта:

$$\varepsilon = h\nu, \quad (9)$$

де  $\nu$  – частота випромінювання, а  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$  – константа, що отримала назву постійної Планка.

Виходячи з цього припущення, М. Планк отримав розподіл для спектральної щільності енергетичної світності абсолютно чорного тіла:

$$r_{\lambda,T}^* = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}, \quad (10)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі випромінювання,  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – швидкість світла у вакуумі,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постійна Больцмана. Вираз (10) отримало назву формули Планка для функції розподілу  $r_{\lambda}^*$ . З формули Планка можна отримати всі закони теплового випромінювання.

Висуванням гіпотези про дискретності випромінювання М. Планк заклав основи квантової теорії.