

## Лекція № 20

### 8.2.2. Закони випромінювання АЧТ. Гіпотеза Планка

Закон Кірхгофа становить в центр уваги теорії теплового випромінювання функцію  $f(\nu, T) = \varepsilon(\lambda, T)$ , яка являє собою випромінювальну здатність абсолютно чорного тіла. Визначення виду цієї функції складало основну задачу вчення про температурне випромінювання. Розв'язок цієї задачі було одержано не відразу. Спочатку був встановлений теоретично і експериментально закон, що визначає сумарне випромінювання чорного тіла (закон Стефана-Больцмана); потім були визначенні деякі основні риси цієї функції (закон Віна), знайдено досить точний експериментальний вид її залежності від  $\nu$  для різних  $T$ . І накінець, після ряду невдалих спроб, які мають величезне значення для розуміння цього питання (Міхельсон, Релей-Джинс, Він, Лоренц) Макс Планку вдалося знайти кінцевий теоретичний розв'язок цієї задачі.

#### Закон Стефана-Больцмана

Австралійські фізики Стефан і Больцман прийшли до висновку, що *інтегральна енергетична світність АЧТ*  $M_{T,\lambda}^{AЧТ}$  яка уявляє собою площу під графіком

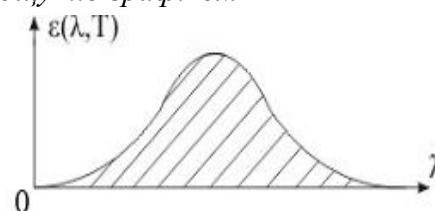


рис. 8.16

на рис. 8.16, пропорційна четвертому ступеню абсолютної температури :

$$M_{T,\lambda}^{AЧТ} = \sigma * T^4, \quad (8.20)$$

де  $\sigma$  – коефіцієнт пропорційності, який називається *постійною Стефана-Больцмана*;  $\sigma = 5,7 * 10^{-8} \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$ .

#### Закон Віна

Подальші спроби фізиків отримати аналітичний вираз для універсальної функції Кірхгофа привели німецького вченого Віна до відкриття двох законів, які отримали його ім'я. **Перший закон Віна** встановлює значення довжини хвилі, на яку приходиться максимум цієї функції (по суті – максимум в спектрі випромінювання АЧТ) :

$$\lambda_{max} = \frac{b_1}{T}, \quad (8.21)$$

Де  $b_1$  – перша постійна Віна,  $b_1 = 3 * 10^3$  мкм. К.

Якщо застосувати цей закон до випромінювання Сонця (яке є природним АЧТ), то підставив температуру його поверхні  $T = 6 * 10^3$  К, отримаємо :  $\lambda_{max} = 0,5$  мкм , що відповідає зеленому кольору. Дуже цікавий факт, бо саме зеленого кольору уся рослинність на Землі , а у людини найбільша чутливість зору теж приходить на зелений колір.

**Другий закон Віна** визначає максимум спектральної енергетичної світності АЧТ , як величину пропорційну п'ятому ступеню абсолютної температури :

$$(M_{T,\lambda}^{AЧТ})_{max} = b_2 * T^5, \quad (8.22)$$

Де  $b_2$  – друга постійна Віна ,  $b_2 = 1,3 * 10^{-5}$  Вт/м<sup>3</sup>К<sup>5</sup>.

З допомогою розглянутих законів АЧТ можна пояснити , чому криві, отримані при різних Т, не перетинаються (рис. 8.15) : с ростом Т максимум кривої росте швидше (пропорційна 5-му ступеню) , ніж її площа (пропорційна 4-му ступеню).

Але ці закони не дають відповіді на головне питання -отримання аналітичного виразу для  $M_{T,\lambda}^{AЧТ}$ .

### Гіпотеза Планка

Це стало можливим завдяки Максиму Планку , який відмовився від класичних уявлень про механізм випромінювання атомів і сформував свою **квантову гіпотезу** : *атоми іспускають електромагнітне випромінювання не безперервно , тобто хвилями, а порціями – квантами енергії* :

$$E = h\nu ,$$

Де  $h$  – постійна Планка ,  $h = 6.6 * 10^{-34}$  Дж \* с ;  $\nu$  – частота ЕМ .

### Закон Планка

Відштовхуючись від цієї гіпотези , Планк спромігся вирішити основну задачу – отримати формулу для спектральної випромінювальної здатності АЧТ , яка була названа **Законом Планка** :

$$M_{T,\nu}^{AЧТ} = \frac{2*\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{kT}-1}. \quad (8.23)$$

У формулі (8.23) замість  $\lambda$  аргументом є  $\nu$  , але це не міняє її суті , бо між  $\lambda$  і  $\nu$  існує однозначний зв'язок :  $\nu = \frac{c}{\lambda}$ .

Крім того у формулі ( 8.23) присутня середня енергія хаотичного теплового руху атому  $E = kT$ , де  $k$  – постійна Больцмана ,  
 $k = 1,4 * 10^{-23}$  Дж/К .

Якщо по формулі (8.23) побудувати графік  $M_{\tau,\lambda}^{AЧТ} = f(\lambda)$ , то він співпадає з експериментальною отриманим Кірхгофом, тобто теорія повністю підтверджується практикою.

Значення гіпотези і закона Планка важко переоцінити : - уперше вводиться уявлення про квантування енергії електромагнітного випромінювання ;

- Закон Планка є узагальненням усіх законів випромінюванням АЧТ.

Таким чином , теплове випромінювання , як явище , демонструє нам квантову, а не хвильову природу світла.

### 8.2.3. Зовнішній фотоефект

**Зовнішній фотоефект** – явище іспускання електронів речовинною під дією електромагнітного випромінювання.

#### Досліди Столетова

Перші фундаментальні дослідження фотоефекта були виконані російським фізиком Столетовим. На рис. 8.17 наведена схема установки для дослідження зовнішнього фотоефекту. В вакуумній колбі розміщені два електрода – анод А і катод К , між якими прикладена напруга (позитивний полюс – анод). Напруга  $U$  може регулюватися потенціометром R .

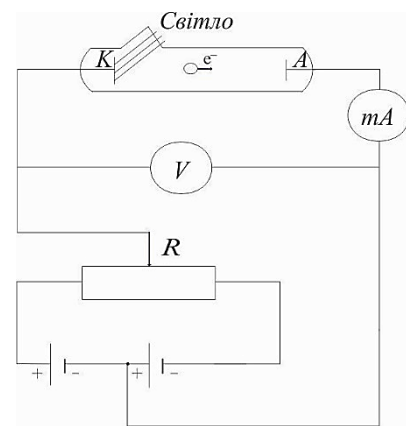


Рис. 8.17

Принцип дії установки полягає у наступному . При освітленні катода світлом воно поглинається і за рахунок поглинутої енергії із катода вилітають електрони, які під дією прикладеної напруги прямують до анода і в ланцюгу виникає струм.

#### Закони зовнішнього фотоефекту

Столетов встановив закони зовнішнього фотоефекту, серед яких найбільш цікаві наступні :

1. Початкова швидкість фотоелектронів не залежить від енергії (інтенсивності) світла, що падає на катод, а визначається його частотою.

2. Має місце найбільша довжина хвилі  $\lambda_{max}$ , при якій припиняється фотоефект (електрони не покидають катод). Оскільки у спектрі світла найбільша довжина хвилі у червоного кольору,  $\lambda_{max}$  отримала назву **червона межа фотоефекту**.

Дати пояснення цим фактам з позиції класичної фізики уявляється неможливим, тому що при підвищенні енергії світла здавалось би і енергія фотоелектронів (їх початкова швидкість) також повинна зростати. А при чому тут довжина хвилі (або частота) світла теж не зрозуміло, бо енергія катодом поглинається на будь-якій довжині, а електрони при одній  $\lambda$  виходять, а при іншій – ні.

**Квантова гіпотеза Ейнштейна**

Пояснення цих протиріч дав Ейнштейн у своїй **квантовій гіпотезі**: *електромагнітне випромінювання не тільки іспускається квантами, но і розповсюджується, і поглинається теж квантами*. Іншими словами, **електромагнітне випромінювання має квантову природу**.

На основі цієї гіпотези Ейнштейн отримав **рівняння для зовнішнього фотоефекту**:

$$h\nu = A_{\text{вих}} + \frac{mv_0^2}{2} \quad (8.24)$$

де  $h\nu$  – енергія кванта ЕМВ, який поглинув електрон в речовині;

$A_{\text{вих}}$  – робота, яку повинен виконати електрон, щоб залишити речовину;

$\frac{mv_0^2}{2}$  – кінетична енергія електрона, що залишив речовину;

$v_0$  – початкова швидкість електрона.

Таким чином смисл рівняння (8.24) міститься у наступному: *енергія поглинутого кванта  $h\nu$  йде на виконання електроном роботи виходу і отримання їм кінетичної енергії*.

На основі рівняння Ейнштейна стають очевидними пояснення законів Столетова. Зокрема з (8.24) чітко виден зв'язок початкової швидкості електрона  $v_0$  з частотою ЕМВ  $\nu$ . Що стосується червоної межі фотоефекту, то її значення можна отримати з (8.24) у припущенні, що  $v_0 = 0$  (електрон хоча б покидає речовину):

$$h\nu_{min} = A_{\text{вих}}; \frac{hc}{\lambda_{max}} = A_{\text{вих}}; \lambda_{max} = \frac{hc}{A_{\text{вих}}}.$$

#### 8.2.4. Маса і імпульс фотона. Ефект Комптона

**Характеристика фотона**

**Фотон** – це квант енергії електромагнітного випромінювання оптичного діапазона.

Оптичний діапазон на шкалі ЕМХ (розділ 7) охоплює теплове випромінювання, світло і ультрафіолетове випромінювання. Таким чином *енергія фотона*:  $E = h\nu$ .

*Межа фотона* у стані спокою дорівнює нулю, оскільки фотон уявляє собою квант електромагнітного випромінювання, а не частинку речовини. Частинки з

нульовою масою спокою називаються *квазічастинками*. З іншого боку фотон володіє релятивістською масою, бо згідно спеціальної теорії відносності Ейнштейна маса і енергія пов'язані формулою :  $E = mc^2$ , де  $m$  – релятивістська маса. Стосовно фотона, підставив його енергію  $h\nu$ , отримаємо *релятивістську масу фотона*:

$$m = \frac{h\nu}{c^2}.$$

*Швидкість фотона* в будь-якому середовищі однакова і дорівнює швидкості світла в вакуумі :  $v_\varphi = c$ .

*Імпульс фотона* згідно відомій з механіки формули  $p = mv$  дорівнює :  $P = mc = \frac{h\nu}{c}$ .

Таким чином електромагнітне випромінювання має усі ознаки корпускулярної природи – це потік частинок (корпускул), які є фотонами (або квантами).

### Ефект Комптона

Ще одним явищем де проявляється квантова природа світла є ефект Комптона – зростання довжини хвилі ЕМВ при розсіянні його у речовині.

Ефект Комптона більш чітко проявляється при розсіянні ЕМВ рентгенівського діапазону на речовині, наприклад типу парафіну. При розсіянні ЕМВ довжина хвилі  $\lambda$ , збільшується до  $\lambda'$  в залежності від кута відхилення  $\theta$  (рис.8.18) :

$$\lambda' = \lambda + \Delta\lambda.$$

Величина збільшення  $\Delta\lambda$  розраховується по *формулі Комптона* :

$$\Delta\lambda = 2\lambda_c \sin^2 \frac{\theta}{2}.$$

Де  $\lambda_c$  – комптоновская довжина хвилі (фізична стала),  $\lambda_c = 2,4 * 10^{-12}$  м ;

$\theta$  – кут розсіювання

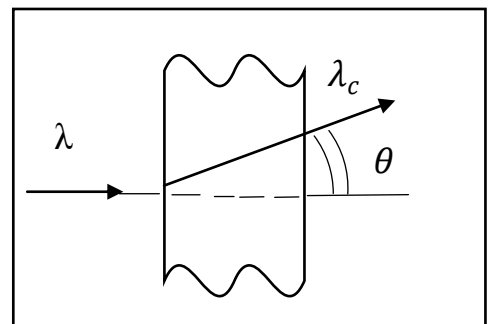


Рис. 8.18

Фізичний механізм ефекта Комптона пояснюється на основі квантових уявлень, а саме пружного зіткнення двох частинок – фотона і електрона речовини.

При зіткненні фотон віддає частку свого імпульсу  $\vec{P}$  електрону  $\vec{P}_e$  (він називається «електроном віддачі») і по закону збереження імпульсу (рис. 8.19) імпульс фотона зменшується:  $\frac{h\nu'}{c} = \frac{h\nu}{c} - P_e$ .

А у зв'язку зі зменшенням  $\nu$  довжина хвилі  $\lambda$  зростає.

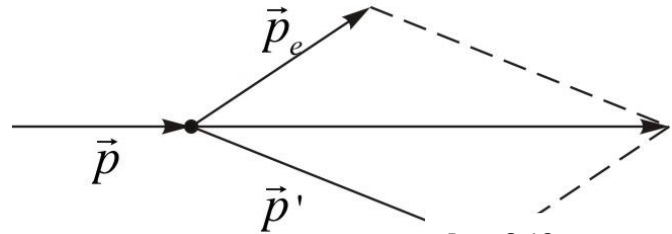


Рис. 8.19

### Висновок з розділу «Оптика»

Електромагнітному випромінюванню характерний *корпускулярно-хвильовий дуалізм*, тобто подвійна фізична природа: з одного боку ЕМВ – це хвиля, з другого – потік частинок (фотонів). Дуалізм ЕМВ проявляється у тому, що в одних явищах ЕМВ веде себе як хвиля (інтерференція, дифракція, поляризація і т.і.), а в інших – як потік фотонів (теплове випромінювання, фотоефект, ефект Комптона)

Між тим між двома «природами» ЕМВ немає протиріччя: у зв'язку з малою дискретністю ЕМВ (енергія фотонів дуже мала, навіть для рентгенівського діапазону порядку  $10^{-22}$  Дж) ряд явищ хвильової оптики (наприклад, дифракцію) можна пояснити з квантових позицій.