

§ 47. ТЕОРІЯ М. ПЛАНКА. ФОТОНИ

?!

Ви вже знаєте, що сучасна теорія світла розглядає світло з позицій корпускулярно-хвильового дуалізму. Хвильові властивості світла ми вже розглянули. У цьому параграфі ви дізнаєтесь про частинки світла — фотони.

1

Чому Планк вимушений був висунути гіпотезу про дискретний характер випромінювання

Однією з проблем, з якою фізики стикнулися наприкінці XIX ст., було встановлення закономірностей випромінювання абсолютно чорного тіла.

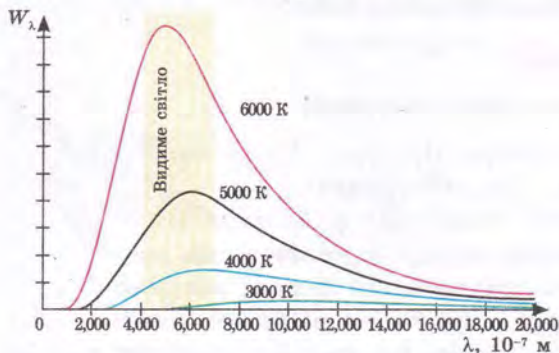


Рис. 47.1. Залежність енергії електромагнітних хвиль, випромінюваних за 1 с з одиниці площі поверхні абсолютно чорного тіла, від довжини хвилі

Абсолютно чорне тіло — це фізична модель тіла, яке повністю поглинає будь-яке випромінювання, що падає на нього. До випромінювання абсолютно чорного тіла близьке випромінювання багаття, волоска лампи розжарювання, Сонця тощо.

Експериментальні дослідження показали, що розподіл енергії в спектрі випромінювання абсолютно чорного тіла (графік залежності $W_\lambda(\lambda)$) має вигляд такий, як зображено на рис. 47.1.

Однак усі спроби вчених одержати аналітичний вигляд цієї функції, користуючись законами класичної електродинаміки Максвелла, зазнавали поразки.

Восени 1900 р., зіставивши всі отримані до цього часу результати, німецький фізик Макс Планк (рис. 47.2) нарешті встановив формулу, яка повністю відповідала експериментальній кривій. Точніше, вчений спочатку її просто вгадав. Але маючи вже готову формулу, Планк так і не зміг вивести її з відомих на той час законів, тому був змушений висунути гіпотезу, яка суперечила класичним уявленням про безперервність енергії випромінювання.

Гіпотеза Планка:

Випромінювання електромагнітних хвиль атомами й молекулами речовини відбувається не безперервно, а дискретно, тобто окремими елементами, енергія яких має бути пропорційною частоті ν випромінювання:

$$E = h\nu,$$

де h — стала величина.

Згодом «елементи енергії» стали називати *квантами енергії*, а сталу h — *сталою Планка*. За сучасним даними стала Планка дорівнює:

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

2 Знайомимосся з властивостями фотонів

Щоб якось «примиритися» з класичними уявленнями про електромагнітну природу світла, Планк спочатку вирішив, що світло тільки випромінюється квантами, а поширюється й поглинається безперервно. Ситуація докорінно змінилася, коли А. Ейнштейн вирішив розглянути властивості теплового випромінювання по-новому, тобто не базуючись на «будь-яких уявленнях про виникнення й поширення випромінювання». Використавши аналогію між відомими формулами для ідеального газу, Ейнштейн дійшов висновку, що монохроматичне випромінювання малої густини поводить так, ніби складається з $N = \frac{W}{h\nu}$ «незалежних один від одного квантів енергії» величиною $h\nu$ кожний.

Після тривалих міркувань Ейнштейн дійшов висновку, що річ не просто у квантах енергії, а в реальних частинках, з яких складається будь-яке електромагнітне випромінювання. Згодом *частинки світла* (кванти світла) стали називати *фотонами*.



Рис. 47.2. Макс Карл Ернст Людвиг Планк (1858–1947) — видатний німецький фізик-теоретик, засновник квантової теорії — сучасної теорії руху, взаємодії та взаємних перетворень мікроскопічних частинок

Згідно із сучасними уявленнями **фотони мають такі властивості:**

1. Фотон є електрично нейтральною частинкою, тобто його заряд дорівнює нулю ($q=0$).

2. Швидкість руху фотона не залежить від вибору системи відліку і завжди дорівнює швидкості світла у вакуумі $c=3\cdot 10^8$ м/с. Не слід плутати швидкість поширення світлової хвилі в речовині зі швидкістю руху фотона. Фотони в речовині рухаються від частинки до частинки, поглинаються ними і знову виникають.

3. Енергія фотона пропорційна частоті електромагнітного випромінювання, квантом якого він є: $E=h\nu$.

4. Імпульс фотона дорівнює відношенню його енергії до швидкості й обернено пропорційний довжині його хвилі: $p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$.

5. Маса фотона дорівнює нулю ($m=0$). Ця властивість стосується тільки окремого фотона, а світло в цілому (як потік фотонів) має масу. Наприклад, для системи із двох фотонів, які мають однакову енергію ($E=h\nu$) та летять під кутом θ один до одного, їхня маса визначається співвідношенням:

$$M = \frac{2E}{c^2} \sin \frac{\theta}{2}.$$

Цей результат може здаватися дивним, адже маса кожного фотона дорівнює нулю, а $0+0=0$. Але річ у тім, що маса, відповідно до законів теорії відносності, не є адитивною, тобто повна маса системи тіл не дорівнює сумі мас тіл, що утворюють цю систему.

6. Фотони випромінюються під час: переходів частинок речовини зі збудженого стану в стан з меншою енергією; прискорення заряджених частинок; розпаду деяких частинок; анігіляції. Під час поглинання світла речовиною фотон цілком передає всю енергію частинкам речовини.

Наведені властивості фотонів були встановлені не відразу. На початку ХХ ст. сама ідея існування частинок світла зустрічала різке неприйняття. Адже інтерференція, дифракція й поляризація світла показували, що світло — це хвилі. Зазначимо, що саме Ейнштейн через понад 50 років після висунення гіпотези Планка, коли існування фотонів уже не бралось під сумнів, писав, що він «після 50 років роздумів так і не зміг наблизитися до відповіді на питання, що ж таке світловий квант».

3

Учимося розв'язувати задачі

Задача. Скільки фотонів за секунду випромінює волосок електричної лампи розжарювання, споживана потужність якої 100 Вт, якщо на випромінювання світла витрачається 4,4 % електричної енергії? Довжину хвилі випромінювання вважайте такою, що дорівнює 600 нм.

$N = ?$

Дано:

$P_{\text{спож}} = 100 \text{ Вт}$

$\lambda = 6,0 \cdot 10^{-7} \text{ м}$

$\eta = 0,044$

$t = 1 \text{ с}$

$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$

$c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ м/с}$

Аналіз фізичної проблеми. За умовою задачі випромінювання лампи можна розглядати як сукупність фотонів однакової енергії. Оскільки кожний фотон має енергію E , то сумарна енергія N фотонів дорівнює $W = EN$, а потужність випромінювання $P_{\text{кор}} = \frac{W}{t}$, де t — час, за який лампа випромінює N фотонів. Корисну потужність можна знайти зі співвідношення: $\eta = \frac{P_{\text{кор}}}{P_{\text{спож}}}$.

Розв'язання. Енергія фотона дорівнює: $E = h\nu$, де $\nu = \frac{c}{\lambda}$, тому $E = \frac{hc}{\lambda}$. Таким чином, $P_{\text{кор}} = \frac{W}{t} = \frac{EN}{t} = \frac{h\nu N}{t} = \frac{hcN}{\lambda t}$. З формули ККД маємо: $P_{\text{кор}} = \eta P_{\text{спож}}$. Отже, $\eta P_{\text{спож}} = \frac{hcN}{\lambda t} \Rightarrow N = \frac{\eta P_{\text{спож}} \lambda t}{hc}$.

Визначимо значення шуканої величини:

$$[N] = \frac{\text{Вт} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{Дж} \cdot \text{с} \cdot (\text{м/с})} = \frac{(\text{Дж/с}) \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{Дж} \cdot \text{м}} = 1;$$

$$\{N\} = \frac{0,044 \cdot 100 \cdot 6,0 \cdot 10^{-7}}{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3,0 \cdot 10^8} = 1,3 \cdot 10^{19}, \quad N = 1,3 \cdot 10^{19}.$$

Відповідь: волосок лампи випромінює $1,3 \cdot 10^{19}$ фотонів за секунду.

! Підбиваємо підсумки

Відповідно до гіпотези Планка світло випромінюється скінченними порціями енергії, які вчений назвав квантами світла. Енергія цієї елементарної порції випромінювання залежить тільки від частоти хвилі: $E = h\nu$, де $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ — стала Планка. Ейнштейн довів, що світло не тільки випромінюється квантами енергії, а й поглинається та поширюється у вигляді набору частинок світла (фотонів).

За сучасними уявленнями, фотон є електрично нейтральною частинкою, що не має маси спокою, рухається зі швидкістю світла у вакуумі, має енергію $E = h\nu$ та імпульс $p = \frac{h}{\lambda}$.

? Контрольні запитання

1. У чому полягає гіпотеза М. Планка? 2. Як розрахувати енергію кванта випромінювання? 3. Який внесок зробив А. Ейнштейн у розвиток квантової теорії світла? 4. Що таке фотон? Які його властивості?

Вправа № 35

- Знайдіть енергії фотонів синього та червоного випромінювань, довжини хвиль яких дорівнюють 480 і 720 нм відповідно. Енергія якого фотона є більшою і в скільки разів?
- Визначте імпульс і енергію кванта ультрафіолетового випромінювання, довжина хвилі якого 20 нм.
- Тривалість імпульсу рубінового лазера 1 мс. За цей час лазер випромінює $2 \cdot 10^{19}$ світлових фотонів із довжиною хвилі 694 нм. Чому дорівнює потужність спалаху лазера?
- Чутливість сітківки ока до жовтого світла становить $3,3 \cdot 10^{-18} \text{ Вт}$. Скільки фотонів має щосекунди поглинатися сітківкою, щоб виникло зорове відчуття? Довжину хвилі вважайте такою, що дорівнює 600 нм.