

§ 33. ФОРМУЛА ПЛАНКА. СВІТЛОВІ КВАНТИ



«...Ми знаємо, що світло — це хвильовий рух. Сумніватися в цих фактах більше неможливо, спростувати ці погляди незбагненно для фізика...» — писав у 1889 р. Г. Герц. Наприкінці XIX ст. фізики не мали сумнівів у тому, що світло — це хвиля. Проте ми знаємо, що світло — це одночасно і хвиля, і частинка. А як зароджувалася наука про частинки світла? Які властивості мають ці частинки?

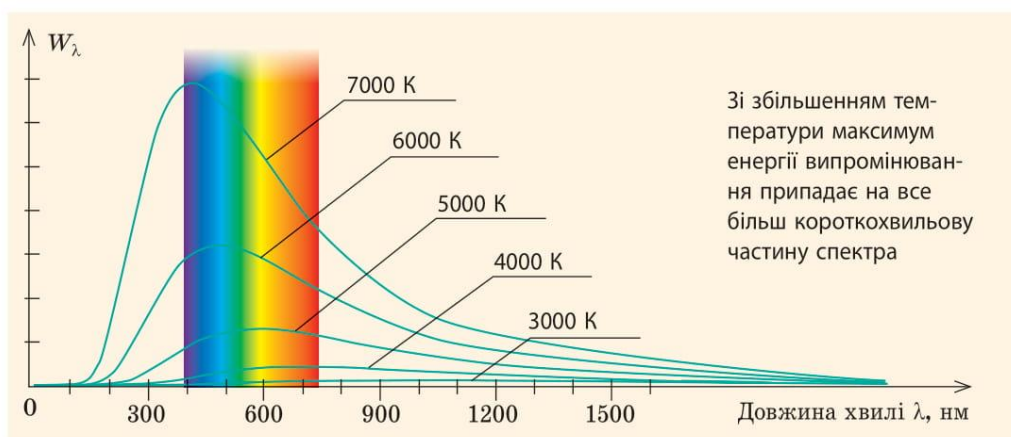
1 Зародження квантової теорії

Зародження квантової теорії пов'язане з установленням закономірностей випромінювання *абсолютно чорного тіла*.

Абсолютно чорне тіло — це фізична модель тіла, яке повністю поглинає будь-яке випромінювання, що падає на нього.

Незважаючи на назву, абсолютно чорне тіло може випромінювати світло. До випромінювання абсолютно чорного тіла близьке випромінювання багаття, нитки розжарення лампи, випромінювання більшості зір тощо. Спектр випромінювання абсолютно чорного тіла залежить лише від його температури. Експериментальні дослідження показали, що розподіл енергії випромінювання залежно від довжини хвилі має вигляд низки кривих (рис. 33.1). Але всі спроби вчених одержати універсальну формулу цієї залежності зазнавали поразки.

Восени 1900 р., зіставивши всі відомі на той час результати досліджень, німецький фізик *Макс Планк* (рис. 33.2) нарешті встановив формулу, яка повністю відповідала експериментальним кривим. Точніше, вчений цю формулу просто вгадав, він так і не зміг її вивести, спираючись на закони класичної електродинаміки Максвелла. Тому Планк *був змушений висунути гіпотезу, яка суперечила класичним уявленням про природу світла*.



Зі збільшенням температури максимум енергії випромінювання припадає на все більш короткохвильову частину спектра

Рис. 33.1. Залежність енергії W_λ електромагнітних хвиль, випромінюваних за 1 с з одиниці площі поверхні абсолютно чорного тіла, від довжини λ хвилі. Графік показує, яка частина всієї енергії випромінювання припадає на хвилю певної довжини



Рис. 33.2. Макс Карл Ернст Людвіг Планк (1858–1947) — видатний німецький фізик-теоретик, засновник квантової теорії — сучасної теорії руху, взаємодії та взаємних перетворень мікроскопічних частинок

Фотон є безмасовою частинкою, проте світло в цілому (як потік фотонів) має масу. Так, для системи двох фотонів, які мають однакоvu енергію ($E = h\nu$) і летять під кутом θ один до одного, маса системи визначається співвідношенням:

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

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

Гіпотеза Планка:

Випромінювання електромагнітних хвиль атомами і молекулами речовини відбувається не безперервно, а дискретно, тобто окремими порціями, енергія E кожної з яких прямо пропорційна частоті ν випромінювання:

$$E = h\nu,$$

де h — стала величина.

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

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \approx 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

2 Знайомимось із властивостями фотонів

Щоб якось «примиритися» з класичними уявленнями про електромагнітну природу світла, М. Планк спочатку вирішив, що світло тільки випромінюється квантами, а поширюється й поглинається безперервно. Ситуація докорінно змінилася, коли *Альберт Ейнштейн* (1879–1955) розглянув властивості теплового випромінювання по-новому.

Використавши аналогію між відомими формулами для ідеального газу, Ейнштейн довів, що монохроматичне випромінювання малої густини поводить ся так, ніби складається з N «незалежних один від одного квантів енергії», кожен з яких має енергію $h\nu$. Урешті-решт 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**.

Згідно із сучасними уявленнями, **фотони мають такі властивості**.

1. *Заряд фотона дорівнює нулю:* $q = 0$ — фотон є електрично нейтральною частинкою.

2. *Маса фотона дорівнює нулю:* $m = 0$ — фотон є безмасовою частинкою.

3. *Швидкість руху фотона* не залежить від вибору системи відліку, *завжди дорівнює швидкості поширення світла у вакуумі* ($v_{\text{ф}} = c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$) і пов'язана з частотою і довжиною відповідної світлової хвилі *формулою хвилі:* $c = \lambda\nu$.

Зверніть увагу! Не слід плутати швидкість поширення світлової хвилі в речовині зі швидкістю руху фотона. Фотони в речовині рухаються від атома до атома, поглинаються ними і знову випромінюються.

4. *Енергія фотона* прямо пропорційна частоті електромагнітного випромінювання, квантом якого і є цей фотон: $E = h\nu$. У разі поглинання світла речовиною фотон передає всю енергію частинкам речовини.

5. *Імпульс фотона* дорівнює відношенню його енергії до швидкості руху та обернено пропорційний довжині хвилі фотона:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

6. *Фотони випромінюються* в разі переходу частинок речовини зі збудженого стану в стан із меншою енергією, в разі прискореного руху заряджених частинок, розпаду деяких частинок, анігіляції.

Наведені властивості фотонів були встановлені не відразу. На початку ХХ ст. навіть ідея існування частинок світла зустрічала різке неприйняття. Адже інтерференція і дифракція світла показували, що світло — це хвилі. Через 50 років після появи гіпотези М. Планка, коли існування фотонів уже не викликало сумнівів, А. Ейнштейн писав: «...після 50 років роздумів я так і не зміг наблизитися до відповіді на питання, що ж таке світловий квант».

3 Учимся розв'язувати задачі

Задача. Споживана потужність електричної лампи розжарювання — 100 Вт. Скільки фотонів щосекунди випромінює нитка розжарення лампи, якщо на випромінювання світла витрачається 4,4 % електричної енергії? Вважайте, що довжина хвилі випромінювання дорівнює 600 нм.

Аналіз фізичної проблеми. За умовою, випромінювання лампи можна розглядати як сукупність фотонів однакової енергії. Оскільки кожний фотон має енергію E , їхня сумарна енергія дорівнює $W = EN$, а потужність випромінювання (корисна потужність) $P_{\text{кор}} = \frac{W}{t}$, де t — час, за який лампа випромінює N

фотонів. Корисну потужність можна знайти зі співвідношення: $\eta = \frac{P_{\text{кор}}}{P_{\text{спож}}}$.

Дано:

$$P_{\text{спож}} = 100 \text{ Вт}$$

$$t = 1 \text{ с}$$

$$\eta = 0,044$$

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

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

$$c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

N — ?

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

Із формули ККД маємо: $P_{\text{кор}} = \eta P_{\text{спож}}$.

$$\text{Отже, } \eta P_{\text{спож}} = \frac{hcN}{\lambda t} \Rightarrow N = \frac{\eta P_{\text{спож}} \lambda t}{hc}.$$

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

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

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

Відповідь: $N = 1,3 \cdot 10^{19}$.

**Підбиваємо підсумки**

- Світло випромінюється окремими порціями енергії — квантами. Енергія кванта залежить тільки від частоти світлової хвилі: $E = h\nu$, де $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — стала Планка.
- А. Ейнштейн довів, що світло випромінюється, поглинається та поширюється у вигляді частинок світла — фотонів.
- За сучасними уявленнями, фотон є електрично нейтральною частинкою, яка не має маси, рухається зі швидкістю, що дорівнює швидкості поширення світла у вакуумі, має енергію $E = h\nu$ та імпульс $p = \frac{h}{\lambda}$, де λ — довжина хвилі.

**Контрольні запитання**

1. Що таке абсолютно чорне тіло? 2. Як пов'язані температура тіла, довжина світлової хвилі та енергія, яку випромінює тіло (див. рис. 33.1)? 3. У чому полягає гіпотеза М. Планка? 4. Як розрахувати енергію кванта випромінювання? 5. Що таке фотон? Які властивості він має?

**Вправа № 33**

1. Якщо подивитися на зоряне небо, можна помітити, що зорі мають різні відтінки блакитного, жовтого, червоного тощо. Поверхні яких зір мають більшу температуру? Обґрунтуйте свою відповідь, скориставшись графіком на рис. 33.1.
2. Визначте енергію, імпульс кванта і довжину хвилі електромагнітного випромінювання частотою $5 \cdot 10^{14}$ Гц.
3. Визначте імпульс і енергію кванта ультрафіолетового випромінювання, довжина хвилі якого 20 нм.
4. Знайдіть імпульс фотонів синього та червоного випромінювань, довжини хвиль яких дорівнюють 480 і 720 нм відповідно. Енергія яких фотонів є більшою і в скільки разів?
5. Тривалість імпульсу рубінового лазера 1 мс. За цей час лазер випромінює $2 \cdot 10^{19}$ фотонів із довжиною хвилі 694 нм. Чому дорівнює потужність спа-лаху лазера?
6. Чутливість сітківки ока до жовтого світла становить $3,3 \cdot 10^{-18}$ Вт. Скільки фотонів жовтого світла має щосекунди поглинатися сітківкою, щоб око зафіксувало його наявність? Вважайте, що довжина хвилі дорівнює 600 нм.
7. Які властивості фотонів суперечать вашим уявленням про навколишній світ?