

Формула Планка. Світлові кванти

«...Ми знаємо, що світло – це хвильовий рух. Сумніватися в цих фактах більше неможливо, спростовувати 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. Як зароджувалася наука про частинки світла? Які властивості мають ці частинки?

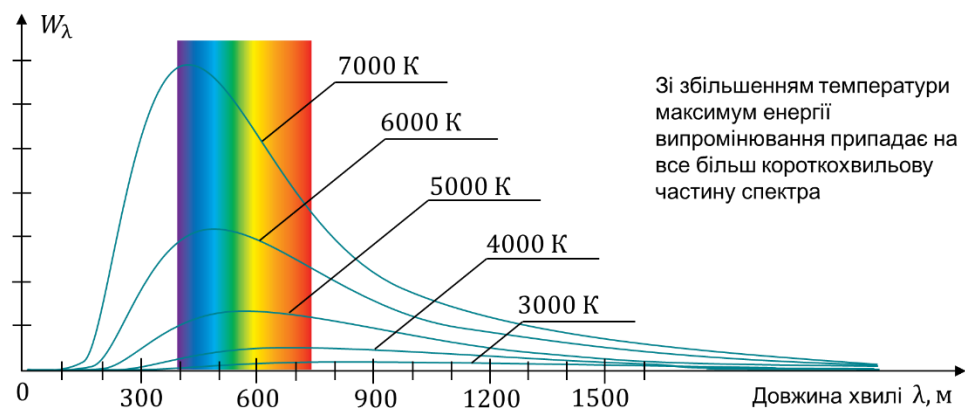
Зародження квантової теорії

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 (абсолютно чорне тіло може випромінювати світло).

До випромінювання абсолютно чорного тіла близьке *випромінювання багаття, нитки розжарення лампи, випромінювання більшості зір*. 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. Але всі спроби вчених одержати універсальну формулу цієї залежності зазнавали поразки.

Рисунок 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 хвилі певної довжини



Восени 1900 р., зіставивши всі відомі на той час результати досліджень, німецький фізик Макс Планк 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.

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.

$$E = h\nu$$

h – стала Планка.

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

Фотони

Планк спочатку вирішив, що світло тільки випромінюється квантами, а поширюється й поглинається безперервно. Ситуація докорінно змінилася, коли Альберт Ейнштейн (1879-1955) дійшов висновку, що монохроматичне випромінювання поводить себе так, начебто складається з $N = \frac{W}{h\nu}$ незалежних один від одного квантів енергії величиною $h\nu$ кожний. Ейнштейн припустив, 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*.

Властивості фотонів:

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

2. *Маса фотона дорівнює нулю: $m = 0$* – фотон є безмасовою частинкою. Ця властивість стосується тільки окремого фотона, а світло в цілому (як потік фотонів) має масу.

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 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 XX 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*».

ЗАКРІПЛЕННЯ

1. Знайдіть енергію фотона інфрачервоного випромінювання, довжина хвилі якого 10 мкм.

Дано:

$$\lambda = 10 \text{ мкм}$$

$$= 10 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

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

$$E = ?$$

Розв'язання

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad [E] = \frac{\text{Дж} \cdot \text{с} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}}{\text{м}} = \text{Дж}$$
$$E = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{10 \cdot 10^{-6}} \approx 2 \cdot 10^{-20} \text{ (Дж)}$$

Відповідь: $E \approx 2 \cdot 10^{-20} \text{ Дж}$.

2. Знайдіть імпульс фотона, довжина хвилі якого 720 нм.

Дано:

$$\lambda = 720 \text{ нм}$$

$$= 7,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

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

$$p = ?$$

Розв'язання

$$p = \frac{h}{\lambda}$$
$$[p] = \frac{\text{Дж} \cdot \text{с}}{\text{м}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{м}} = \text{Н} \cdot \text{с} = \text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot \text{с} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$$
$$p = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{7,2 \cdot 10^{-7}} \approx 9,2 \cdot 10^{-28} \left(\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}} \right)$$

Відповідь: $p \approx 9,2 \cdot 10^{-28} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$.

3. Знайдіть частоту ультрафіолетового випромінювання, імпульс кванта якого дорівнює $3 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$.

Дано:

$$p = 3 \cdot 10^{-27} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

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

$$\nu = ?$$

Розв'язання

$$p = \frac{h\nu}{c} \Rightarrow \nu = \frac{pc}{h}$$
$$[\nu] = \frac{\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}}{\text{Дж} \cdot \text{с}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^3} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot \text{с}^3} = \frac{1}{\text{с}} = \text{Гц}$$
$$\nu = \frac{3 \cdot 10^{-27} \cdot 3 \cdot 10^8}{6,63 \cdot 10^{-34}} \approx 1,36 \cdot 10^{15} \text{ (Гц)}$$

Відповідь: $\nu \approx 1,36 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$.

4. Знайдіть довжину хвилі випромінювання, енергія фотонів якого відповідає енергії протона, що рухається зі швидкістю $4,6 \cdot 10^4 \text{ м/с}$.

Дано:

$$v = 4,6 \cdot 10^4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

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

$$\lambda = ?$$

Розв'язання

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad E = \frac{m_p v^2}{2}$$
$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{m_p v^2}{2} \Rightarrow \lambda = \frac{2hc}{m_p v^2}$$
$$[\lambda] = \frac{\text{Дж} \cdot \text{с} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}}{\text{кг} \cdot \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right)^2} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2}{\text{кг} \cdot \text{м}} = \frac{\text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot \text{с}^2}{\text{кг}} = \text{м}$$

$$\lambda = \frac{2 \cdot 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{1,67 \cdot 10^{-27} \cdot (4,6 \cdot 10^4)^2} \approx 1,13 \cdot 10^{-7} \text{ (м)}$$

Відповідь: $\lambda \approx 1,13 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$

5. Яку енергію має приносити світлове випромінювання на кожний квадратний міліметр абсолютно чорної поверхні за секунду, щоб світловий тиск на неї становив 1 Па?

Дано:

$$S = 1 \text{ мм}^2 \\ = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

$$p_{\text{тиск}} = 1 \text{ Па}$$

$$t = 1 \text{ с}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$W - ?$

Розв'язання

Тиск, який чинить світлове випромінювання на поверхню $p_{\text{тиск}}$, будемо шукати за наступною формулою:

$$p_{\text{тиск}} = \frac{F}{S}$$

Силу тиску світлового випромінювання на поверхню F будемо знаходити з другого закону Ньютона, записаного в загальному вигляді:

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$$

Загальна зміна імпульсу пучка дорівнює:

$$\Delta p = \frac{W}{c}$$

$$F = \frac{W}{ct} \quad p_{\text{тиск}} = \frac{W}{Sct} \Rightarrow W = p_{\text{тиск}} Sct$$

$$[W] = \text{Па} \cdot \text{м}^2 \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \text{с} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \cdot \text{м}^3 = \text{Н} \cdot \text{м} = \text{Дж}$$

$$W = 1 \cdot 1 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 1 = 300 \text{ (Дж)}$$

Відповідь: $W = 300 \text{ Дж.}$

Повторити § 33, Вправа № 33 (2, 4)