

## § 49. ТИСК СВІТЛА. КОРПУСКУЛЯРНО-ХВИЛЬОВИЙ ДУАЛІЗМ

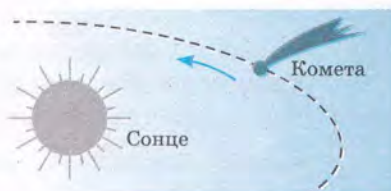


Протягом кількох століть тривала «боротьба» між прихильниками корпускулярної та хвильової теорій світла. Найвидатніші фізики докладали зусиль, щоб з'ясувати природу світла. Результат цієї багаторічної дискусії врешті привів до перегляду всіх класичних уявлень фізики й до створення квантової фізики. У цьому параграфі ви ознайомитеся із сучасним поглядом на природу світла й речовини та з'ясуєте причину тиску світла.



### Чому світло здійснює тиск

Гіпотеза про те, що світло здійснює тиск, виникла ще у XVII ст., коли І. Кеплер та І. Ньютон припустили, що відхилення хвостів комет у бік, протилежний Сонцю, спричинене тиском світла (рис. 49.1). Для пояснення світлового тиску розглянемо дію електромагнітної хвилі, що падає на металеву пластину, перпендикулярно до її поверхні



**Рис. 49.1.** Відхилення хвостів комет у бік, протилежний Сонцю, пояснюється тиском світла

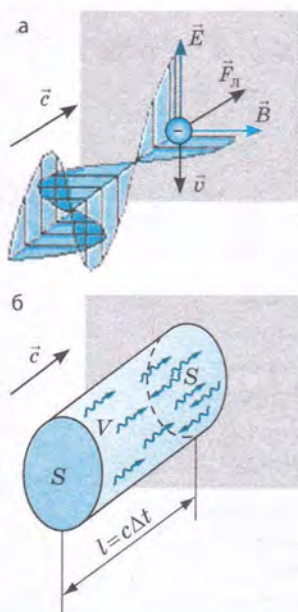


Рис. 49.2. До пояснення тиску світла в межах електромагнітної (а) та квантової (б) теорій світла

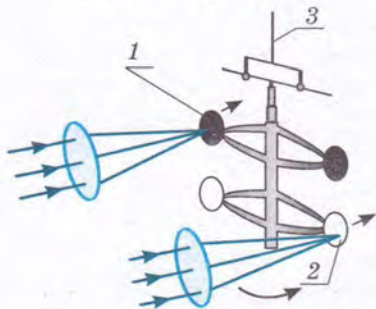


Рис. 49.3. Схема досліду Лебедева: тиск світла на темне крильце (1) у два рази менш, ніж на дзеркальне крильце (2), тому нитка (3) закручується; за кутом закручення нитки можна визначити тиск світла

(рис. 49.2, а). Під дією електричного поля хвилі вільні електрони рухатимуться з певною швидкістю  $\vec{v}$  в напрямку, протилежному напрямку вектора напруженості  $\vec{E}$ . З боку магнітного поля хвилі на рухомий електрон діє сила Лоренца. Якщо, скориставшись правилом лівої руки, визначити напрямок сили Лоренца, то побачимо, що він збігається з напрямком поширення хвилі. Сумарна сила Лоренца, що діє на електрони пластини, і є силою тиску, а її відношення до площі поверхні пластини визначає тиск електромагнітної хвилі.

Максвелл теоретично довів, що тиск, створюваний електромагнітною хвилею на абсолютного непрозоре тіло, визначається за формулою:

$$p = (1 + R)w_{\text{сер}},$$

де  $R$  — коефіцієнт відбивання,  $w_{\text{сер}}$  — середня густина енергії хвилі.

Дзеркальна поверхня повністю відбиває світло, тому  $R_{\text{да}} = 1$  і  $p_{\text{да}} = 2w_{\text{сер}}$ . Чорна поверхня, навпаки, повністю поглинає світло, тому  $R_{\text{ч}} = 0$  і  $p_{\text{ч}} = w_{\text{сер}}$ . Отже, тиск, створюваний світлом на дзеркальну поверхню, вдвічі більший, ніж тиск на чорну. Саме цим висновком Максвелла скористався російський фізик Петро Михайлович Лебедев (1866–1912), створюючи прилад для вимірювання тиску світла. Пристрій Лебедева являв собою дуже чутливі крутильні терези, рухливою частиною яких була рамка із закріпленими на ній «крильцями» — світлимими й чорними дисками завтовшки від 0,1 до 0,01 мм (рис. 49.3). Результат, отриманий Лебедевим у 1899 р., збігався з теоретичними розрахунками Максвелла. Зазначимо, що дослід було виконано дуже майстерно, оскільки світловий тиск є надзвичайно малим. Наприклад, влітку в сонячний день він дорівнює лише  $4 \cdot 10^{-8}$  Па.

Тиск світла можна розрахувати і в межах квантової теорії. Припустимо, що паралельний пучок монохроматичного світла падає на тіло перпендикулярно до його поверхні (рис. 49.2, б). За інтервал часу  $\Delta t$  на поверхню падає  $N$  фотонів. Кожний із поглинених фотонів передає тілу імпульс  $p_v = \frac{h\nu}{c}$ , а кожний із відбитих — імпульс  $\Delta p_v = \frac{2h\nu}{c}$ . Якщо  $R$  — коефіцієнт відбивання фотонів, то  $RN$  фотонів



відбивається від тіла, а  $(1-R)N$  — поглинається. Сумарний імпульс, який передають тілу всі  $N$  фотонів, дорівнює:

$$\Delta p = (1-R)N \frac{h\nu}{c} + RN \frac{2h\nu}{c} = (1+R) \frac{N h \nu}{c} = (1+R) \frac{W}{c},$$

де  $W = N h \nu$  — сумарна енергія всіх фотонів.

Сила тиску, відповідно до другого закону Ньютона, дорівнює  $F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$ , тому тиск світла визначається співвідношенням:

$$p = \frac{F}{S} = \frac{\Delta p}{S \Delta t} = \frac{(1+R)W}{c S \Delta t} = \frac{(1+R)W}{V} = (1+R)w,$$

де  $w = \frac{W}{V}$  — об'ємна густина енергії падаючого світла.

Таким чином, вираз для тиску світла, отриманий у межах квантової теорії, повністю збігається з виразом для тиску світла, передбаченим теорією Максвелла.

## 2

### Що означає корпускулярно-хвильовий дуалізм світла

Отже, що таке світло — потік частинок чи електромагнітні хвилі? Сучасна фізика відповідає на це питання так.

**Світло** — це потік фотонів, а фотони — це кванти електромагнітного випромінювання, що мають водночас і хвильові, і корпускулярні властивості.

Подати ці кванти у вигляді якогось наочного образу неможливо, тому що наш досвід і наша уява базуються на сприйнятті лише макроскопічних тіл, серед яких об'єктів, аналогічних квантам, немає. Недарма фізика завжди чітко розмежовувала об'єкти, що мають хвильову природу (наприклад, радіохвилі або звук), і об'єкти, що мають дискретну (тобто переривчасту) структуру (наприклад, системи матеріальних точок). Але вивчення світла привело до розуміння хибності розмежування його корпускулярних і хвильових властивостей.

**Кванти світла** — це особливі частинки, енергія та імпульс яких, на відміну від звичайних матеріальних точок, визначаються не через масу і швидкість руху, а через хвильові характеристики — частоту й довжину хвилі:  $E = h\nu$ ,  $p = \frac{h}{\lambda}$ .

Наявність у фотонів водночас і корпускулярних, і хвильових характеристик якраз і зумовлює те, що світло виявляє властивості як безперервних електромагнітних хвиль, так і окремих частинок.

Властивість матеріальних об'єктів, яка полягає в тому, що в поведінці одного об'єкта можуть виявлятися і корпускулярні, і хвильові риси, називається **корпускулярно-хвильовим дуалізмом**.



Відповідно до принципу корпускулярно-хвильового дуалізму електромагнітна хвиля може мати властивості частинок. Цей факт у 1922 р. експериментально встановив американський фізик Артур Холлі Комптон (1892–1962). Він виявив, що при розсіянні рентгенівського випромінювання речовиною у відбитих хвилях поряд



із хвилями тієї самої довжини  $\lambda_0$  спостерігаються хвилі і з більшою довжиною. Ефект Комптона можна пояснити, тільки враховуючи квантові властивості рентгенівського випромінювання. Врахування тільки хвильових властивостей призводить до хибного висновку: розсіяне випромінювання повинне мати ту саму частоту (довжину хвилі), що й випромінювання, яке падає на речовину, оскільки частота вимушених коливань дорівнює частоті змушуючої сили.★

### ★ 3 Які фізичні основи квантової механіки

Згідно з принципом корпускулярно-хвильового дуалізму *будь-яка частинка має властивості хвилі*.

Уявлення про корпускулярно-хвильовий дуалізм частинок лежить в основі *квантової механіки*, яка є одним з основних напрямів сучасної фізики.

У 1924 р. французький фізик Луї де Бройль (1892–1987) висунув гіпотезу, згідно з якою *корпускулярно-хвильовий дуалізм є універсальною властивістю матеріальних об'єктів, характерною не лише для фотонів, а й для будь-яких інших мікрочастинок*.

За де Бройлем, формули для розрахунку енергії ( $E = h\nu$ ) та імпульсу ( $p = \frac{h}{\lambda}$ ) слід вважати *універсальними* — такими, що справджуються як для фотонів, так і для будь-яких інших частинок, а кожній частинці відповідає *хвиля* довжиною  $\lambda = \frac{h}{p}$  і частотою  $\nu = \frac{E}{h}$ . Ці

*хвилі речовини* отримали назву *хвилі де Бройля*. Довжина хвилі де Бройля для всіх реальних тіл виявляється дуже малою. Наприклад, для електронів, розігнаних до швидкості  $v = 7,3 \cdot 10^6$  м/с, вона дорівнює  $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = 1,0 \cdot 10^{-10}$  м, а для тіла масою 1 г, що рухається

зі швидкістю 0,5 м/с, лише  $3,3 \cdot 10^{-30}$  м, що на 20 порядків менше за розмір атома. Тому хвильові ефекти від макротіл виявити неможливо. Разом із тим нині експериментально виявлено *хвильові властивості не тільки електронів та інших елементарних частинок, а й атомів і молекул*.

Одними з перших, хто виявив хвильові властивості в електронів, були американські фізики *Клінтон Джозеф Девіссон* (1881–1958) та *Лестер Хелберт Джермер* (1896–1971). У 1927 р. вони спостерігали дифракцію електронів на монокристалі нікелю, який виконував функцію дифракційної ґратки. Цей дослід виявився блискучим підтвердженням наявності в електронів хвильових властивостей.

Отже, природу електрона, як і інших частинок речовини, не можна повністю описати з використанням тільки корпускулярних або тільки хвильових уявлень. Марними виявились і спроби механічно поєднати корпускулярні й хвильові властивості в одному об'єкті.



Квантова механіка, на відміну від класичної, використовує інший метод опису стану системи. У будь-якій задачі класичної механіки матеріальна точка (або тіло) має визначені координати, які характеризують її положення в просторі, і швидкість (або імпульс). У квантовій механіці й координата, й імпульс визначаються лише з певною точністю ( $\Delta x$  — невизначеність координати;  $\Delta p$  — невизначеність імпульсу), тобто можна знайти лише ймовірність виявлення об'єкта в певній ділянці простору, ймовірність наявності в об'єкта певного імпульсу. *Визначити одночасно координати і швидкість (або імпульс) частинки в будь-який момент часу в принципі неможливо.* Отже, квантова механіка дає статистичний опис стану мікросистем. ★

Радянський фізик *Сергій Іванович Вавилов (1891–1951)* писав: «Речовина і світло одночасно мають властивості хвиль і частинок, однак у цілому це не хвилі, й не частинки, й не суміш того й іншого. Наші механічні поняття неспроможні повністю охопити реальність, для цього не достатньо реальних образів». ★



### Підбиваємо підсумки

Максвелл на основі електромагнітної теорії світла показав, що світло має чинити тиск, і теоретично довів, що цей тиск визначається за формулою:  $p = (1 + R)w_{\text{сеп}}$ . Квантова теорія пояснює тиск світла як сумарний імпульс, переданий фотонами за одиницю часу одиничній площі поверхні. Виміряв тиск світла та експериментально підтвердив розрахунки Максвелла П. М. Лебедев.

Світло має двоїсту корпускулярно-хвильову природу. Кванти світла — це особливі частинки, енергія та імпульс яких, на відміну від звичайних матеріальних точок, визначаються через хвильові характеристики — частоту й довжину хвилі:  $E = h\nu$ ,  $p = \frac{h}{\lambda}$ .

★ Корпускулярно-хвильовий дуалізм є універсальною властивістю будь-яких матеріальних об'єктів. Хвильові властивості матеріального об'єкта, що має імпульс  $p$ , характеризує довжина хвилі де Бройля:  $\lambda = \frac{h}{p}$ . Відмітною рисою квантової механіки є врахування корпускулярно-хвильового дуалізму та ймовірнісний опис поведінки мікрочастинок. ★



### Контрольні запитання

1. Як пояснюється наявність світлового тиску на основі електромагнітної теорії світла?
2. Опишіть досліди Лебедева з вимірювання світлового тиску.
3. Як пояснює тиск світла квантова теорія?
4. Чому тиск світла залежить від типу поверхні?
5. У яких явищах виявляються хвильові властивості світла?
6. У яких явищах виявляються корпускулярні властивості світла?
7. Що таке світло? ★
8. У чому суперечність між дослідами Комптона й класичною теорією розсіювання електромагнітних хвиль?
9. У чому сутність корпускулярно-хвильового дуалізму? ★
10. У чому полягає гіпотеза де Бройля? ★
11. Чому ми не спостерігаємо хвильові властивості тіл навколо нас? ★
12. У чому принципова відмінність квантово-механічного опису стану системи від класичного?