

DOI 10.36074/logos-24.11.2023.38

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ АНАЛОГІЙ У ПРОЦЕСІ ВИВЧЕННЯ ДУАЛІЗМУ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ І ХВИЛЬ РУХОМИХ ЧАСТИНОК РЕЧОВИНИ

ORCID ID: 0000-0003-2103-9978

Краснобокий Юрій Миколайович

кандидат фіз.-мат. наук, доцент, доцент кафедри фізики
та інтегративних технологій навчання природничих наук

Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини

ORCID ID: 0000-0003-1775-1110

Ткаченко Ігор Анатолійович

доктор пед. наук, професор, професор кафедри фізики
та інтегративних технологій навчання природничих наук

Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини

ORCID ID: 0000-0002-6179-5543

Ільніцька Катерина Сергіївна

кандидат пед. наук, доцент кафедри фізики
та інтегративних технологій навчання природничих наук

Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини

УКРАЇНА

Як відомо, світло виявляє корпускулярно-хвильову природу властивостей у процесі поширення електромагнітного випромінювання: в одних явищах (інтерференція, дифракція, поляризація) виявляється його хвильова природа і воно поводить себе як електромагнітна хвиля, в інших явищах (тиск світла, фотоефект, ефект Комптона) світло проявляє корпускулярну природу і поводить себе як потік частинок (фотонів) [1, С. 16–25].

Для глибшого розуміння і полегшення засвоєння студентами такої дуалістичної природи світла ми намагаємося з'ясувати, формулюючи проблемне питання: у якому ж співвідношенні знаходяться хвильова і корпускулярна картини? Відповідь на нього можна отримати, розглянувши з обох точок зору процес освітленості будь-якої поверхні.

Згідно з хвильовими уявленнями освітленість у даній точці поверхні пропорціональна квадрату амплітуди світлової хвилі. З корпускулярної точки зору освітленість пропорціональна щільності (густині) потоку фотонів. Отже, між квадратом амплітуди світлової хвилі і щільністю потоку фотонів має місце пряма пропорціональність. Носієм енергії й імпульсу є фотон. Енергія виділяється у тій точці поверхні, в яку потрапляє фотон. Квадрат амплітуди хвилі визначає ймовірність того, що фотон потрапляє у дану точку поверхні. Точніше кажучи, ймовірність того, що фотон буде виявлений у межах об'єму dV , який містить у собі розглядувану точку простору. Ця ймовірність визначається виразом:

$$dP = \chi A^2 dV, \quad (1)$$

де χ – коефіцієнт пропорциональності, A – амплітуда світлової хвилі. Величина

$$dP/dV = \chi A^2 \quad (2)$$

називається щільністю (густиною) ймовірності.

Із наведеного випливає, що розподіл фотонів по поверхні, на яку падає світло, має статистичний характер. Спостережувана на практиці рівномірність освітленості, наприклад, поверхні столів чи екранів зумовлена тим, що зазвичай щільність потоку фотонів буває дуже значною. Так, наприклад, за освітленості поверхні стола 50 лк (така освітленість необхідна, щоб очі не стомлювалися при читанні та письмі) і довжині хвилі 0,555 мк (видиме світло) на 1 см² поверхні падає приблизно $2 \cdot 10^{13}$ фотонів за одну секунду. Відносні відхилення статистичних величин від середнього значення (відносні флуктуації) обернено пропорційні кореневі квадратному з числа частинок. Тому за наведеної щільності потоку фотонів флуктуації нехтовно малі і поверхня виглядає освітленою рівномірно.

Тож можна зробити такий висновок: квадрат амплітуди світлової хвилі в якій-небудь точці простору є мірою ймовірності потрапляння фотонів у цю точку.

Отже, корпускулярні і хвильові властивості світла не виключають, а навпаки, взаємно доповнюють одні одних. Вони відбивають дві різні, але водночас тісно взаємопов'язані закономірності поширення електромагнітного випромінювання і його взаємодії з речовиною. Корпускулярні властивості зумовлені тим, що енергія, імпульс і маса випромінювання локалізовані в дискретних «частинках» – фотонах, хвильові – статистичними закономірностями розподілу фотонів у просторі, тобто закономірностями, які визначають ймовірності перебування фотонів у різних точках простору.

З дослідів на дифракцію світла, відомо, що при зміні інтенсивності падаючого світлового потоку характер дифракційної картини, що виникає від певної перешкоди, тобто співвідношення між інтенсивностями в тих самих точках екрана, не змінюється. Це дає можливість стверджувати, що хвильові властивості притаманні не лише сукупності великої кількості фотонів, які рухаються одночасно, а й кожному окремому фотону. Хвильові властивості фотона проявляються в тому, що для нього не можна вказати точно, в яку саме точку екрана він потрапить після проходження через розглядувану оптичну систему. Можна говорити лише про ймовірності потрапляння кожного фотона в різні точки екрана. Отже, фотони якісно відрізняються від світлових корпускул Ньютона, рух яких, як вважав Ньютон, подібний до руху макроскопічних тіл і однозначно визначається другим законом динаміки Ньютона і початковими умовами. Зі сказаного зрозуміло, що створення квантової теорії світла зовсім не означало повернення до механічної корпускулярної теорії Ньютона.

У 1924 р. французький фізик Луї де Бройль дійшов висновку, що двоїста корпускулярно-хвильова природа характерна не лише для світла. Логіка його міркувань була приблизно такою: якщо із зростанням частоти світла його хвильові властивості проявляються дедалі менше, то можна припустити існування ще коротших хвиль, ніж у γ -променів, пов'язаних якимсь чином з частинками речовини – електронами, нейтронами, атомами, молекулами і т.д. Ці хвилі, як буде показано, не електромагнітні, вони мають специфічну природу, для якої не можна знайти аналогії в класичній фізиці.

Л. де Бройль узагальнив співвідношення для імпульсу фотона

$$p_f = h/\lambda, \quad (3)$$

припустивши, що воно має універсальний характер для будь-яких хвильових процесів, пов'язаних з частинками матерії, що мають імпульс p :

$$\lambda = h/p. \quad (4)$$

Формулу (4) називають формулою де Бройля; вона є одним із співвідношень, що лежать в основі сучасної фізики. Для частинки, що має масу m і рухається зі швидкістю $v \ll c$,

$$\lambda = h/mv. \quad (5)$$

Як відомо з історії фізики, формула де Бройля експериментально була підтверджена дослідями К. Девіссона і Л. Джермера у 1927 р. за спостереженнями розсіювання електронів монокристалом нікелю. Оскільки експеримент є критерієм наукової істини, то в існуванні хвиль де Бройля вже ніхто не мав сумніву і необхідно було лише встановити їх фізичну природу.

Оскільки на той час вже добре була відома природа електромагнітних хвиль, які породжуються змінним електромагнітним полем, що поширюється в просторі, то були намагання аналогічним чином пояснити й природу хвиль де Бройля. Проте, як виявилось, поширення хвиль де Бройля не пов'язане з поширенням у просторі якого-небудь електромагнітного поля. Можна було б гадати, що із зарядженими частинками (електронами, протонами, йонами, а також з нейтральними молекулами, що мають дипольні і мультидипольні електричні моменти), що рухаються в просторі і можуть у певних випадках випромінювати електромагнітні хвилі, пов'язаний якийсь додатковий особливий хвильовий електромагнітний процес. Однак експерименти спростовують ці припущення. Як відомо, із зарядженими частинками, які рухаються рівномірно і прямолінійно, поширення електромагнітних хвиль не пов'язане. Хвильові ж властивості електронів спостерігаються й у випадку їх рівномірного руху. Отже, електромагнітна природа хвиль, пов'язаних з рухомими частинками речовини, цілком виключається. Можна показати також, що не справджується природа й будь-яких інших хвиль, відомих у класичній фізиці. Це підводить до висновку: хвилі де Бройля, які пов'язані з рухомими частинками речовини, мають специфічну квантову природу, що не має аналогії в класичній фізиці.

Тож для розуміння фізичного змісту хвиль де Бройля ми використовуємо розглянуте вище взаємовідношення між корпускулярними і хвильовими властивостями світла. Питання про природу хвиль, пов'язаних з частинками речовини, можна сформулювати як питання про фізичний зміст амплітуди цих хвиль. Замість амплітуди A тут зручніше розглядати інтенсивність хвилі J , пропорційну $J \sim |A^2|$ – квадрату модуля амплітуди.

З дослідів на дифракцію електронів випливає, що в цих експериментах виявляється неоднаковий розподіл пучків електронів, відбитих або розсіяних у різних напрямках – у деяких напрямках число електронів більше, ніж у всіх інших. З хвильової точки зору наявність максимумів числа електронів у деяких напрямках означає, що ці напрями відповідають найбільшій інтенсивності хвиль де Бройля. Інакше кажучи, інтенсивність хвиль у певній точці простору визначає число електронів, що потрапили в цю точку за 1 с. Це було основою для своєрідного статистичного, ймовірнісного тлумачення хвиль де Бройля. Квадрат модуля амплітуди хвиль де Бройля в певній точці є мірою ймовірності того, що частинку виявляють у цій точці. Наведене й свідчить про аналогічну по суті інтерпретацію взаємовідношення між корпускулярними і хвильовими властивостями світла.

Щоб описати розподіл ймовірності перебування частинки в певний момент часу в деякій ділянці простору, вводять деяку функцію $\psi(x, y, z, t)$, яку називають хвильовою функцією (або псі-функцією). Означимо її так: ймовірність dw того, що частинка перебуває в елементі об'єму dV , пропорційна $|\psi|^2$ і елементу об'єму $dV = (dx dy dz)$:

$$dw = |\psi|^2 dV = |\psi|^2 dx dy dz . \quad (6)$$

Фізичний зміст має не сама функція ψ , а квадрат її модуля: $|\psi|^2 = \psi \cdot \psi^*$, де ψ^* – функція, комплексно спряжена з ψ . Величина $|\psi|^2$ має зміст густини ймовірності:

$$\rho = dw/dV = |\psi|^2, \quad (7)$$

тобто визначає ймовірність перебування частинки в певній точці простору. Інакше кажучи, величиною $|\psi|^2$ визначається інтенсивність хвиль де Бройля. Така інтерпретація хвильової функції ψ пояснює, чому хвилі де Бройля іноді називають «хвилями ймовірності». З означення хвильової функції випливає, що вона повинна задовольняти таку умову, яку називають умовою нормування ймовірностей:

$$\iiint_{-\infty}^{\infty} |\psi|^2 dx dy dz = 1, \quad (8)$$

де потрібний інтеграл обчислюють по всьому об'єму нескінченного простору, тобто по координатах x , y і z від $-\infty$ до $+\infty$. Справді, ця умова означає, що перебування частинки десь у просторі є достовірною подією і її ймовірність повинна дорівнювати одиниці.

Отже, хвильова функція ψ є основною характеристикою стану мікрооб'єктів (елементарних частинок, атомів, молекул). За її допомогою в квантовій механіці можна обчислити середні значення фізичних величин, які характеризують певний об'єкт, що перебуває в стані, який описує хвильова функція ψ [2, С. 246–247].

Список використаних джерел:

- [1] Кучерук, І. М. & Горбачук, І. Т. (2006). *Загальний курс фізики : у 3 томах. Т. 3 : Оптика. Квантова фізика*. Київ : Техніка.
- [2] Яворський, Б. М., & Детлаф А. А. (1973). *Курс фізики, т. III*. Київ : Вища школа.