

Scientific journal
PHYSICAL AND MATHEMATICAL EDUCATION
Has been issued since 2013.

Науковий журнал
ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНА ОСВІТА
Видається з 2013.



<http://fmo-journal.fizmatsspu.sumy.ua/>

Мусієнко І. Методика вивчення квантових властивостей світла в школі // Фізико-математична освіта. Науковий журнал. – Суми : СумДПУ ім. А.С.Макаренка, 2014. – № 2 (3). – С. 37-45.

УДК 371.315.6:51

Ігор Мусієнко

Сумський державний педагогічний університет імені А.С. Макаренка, Україна

МЕТОДИКА ВИВЧЕННЯ КВАНТОВИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СВІТЛА В ШКОЛІ

Мабуть, жодне з фізичних понять шкільного курсу фізики не потребує такої зміни уявлень у процесі його вивчення, як це відбувається зі світлом. Дійсно, спочатку при вивченні світлових явищ у 7 класі на основі властивостей світла прямолінійно поширюватися в однорідному середовищі будується геометрична модель світла. Потім ця модель закономірно змінюється на хвильову модель, в якій геометричні уявлення замінюються хвильовими. У подальшому ситуація ще раз повторюється при переході до квантової моделі випромінювання. «Учні залишаються переконаними, що існує не одна наука оптика про єдиний об'єкт – випромінювання, а кілька різних оптик (геометрична, хвильова, квантова), які вивчають різні об'єкти (промені, світлові хвилі, фотони). У гіршому випадку у них формується невпевненість в істинності будь-яких моделей випромінювання, фізичних моделей взагалі. В жодному разі знання учнів про оптичні явища в цілісну систему не перетворюються. Негативне значення такого факту очевидне» [1, 4 – 7].

У зв'язку з цим у процесі викладання квантової оптики дуже важливо правильно користуватися понятійним апаратом теорії випромінювання. Це в першу чергу стосується поняття дуалізму природи світла, яке зустрічається в літературі. Зрозуміло, що ніякого дуалізму природи світла не існує. Природа світла така ж єдина, як єдина природа взагалі. А ось відсутність єдиної наочної моделі світла, яка б пояснювала усі його властивості, – це факт, який був встановлений на початку ХХ століття і який змушує нас говорити про дуалізм властивостей світла. Природа світла – електромагнітна, а властивості світла – хвильові та корпускулярні. При вивченні квантових властивостей світла використовуються деякі положення теорії відносності, зокрема, закон взаємозв'язку між масою та енергією. Для більш високого наукового рівня викладу

матеріалу потрібно, щоб учні попередньо були ознайомлені і з релятивістським співвідношенням між енергією та імпульсом. Як відомо, енергія та імпульс є універсальними характеристиками матеріальної точки у вільному стані. У процесі взаємодії енергія та імпульс матеріальної точки змінюються, але таким чином, що їх зв'язок описується співвідношенням:

$$E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4 \quad (1.),$$

де E – повна енергія матеріальної точки, p – її імпульс, m_0 – маса спокою.

Ця формула є фундаментальним співвідношенням релятивістської механіки. Оскільки це співвідношення впливає із властивостей простору-часу, то воно є універсальним для будь-яких фізичних об'єктів, в тому числі і для фотонів [6, 6 – 10].

У шкільних підручниках вираз для імпульсу фотона записують за відомою із механіки формулою $p = mv$. Але цю формулу для фотона неможливо застосувати без важливих додаткових пояснень. Більш науково обґрунтованим є виведення формули для імпульсу фотона саме із релятивістського співвідношення між енергією та імпульсом.

Для фотона $m_0 = 0$ і $E = h\nu$. Тому

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = mc \quad (2.)$$

де m – маса фотона, яка визначається за формулою $m = \frac{h\nu}{c^2}$.

Ознайомити учнів із співвідношенням між енергією та імпульсом можна під час вивчення спеціальної теорії відносності. Для цього використаємо вираз для релятивістської маси:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3.)$$

Піднесемо цей вираз до квадрата:

$$m^2 = \frac{m_0^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

і запишемо у вигляді:

$$m^2 - \frac{m^2 v^2}{c^2} = m_0^2,$$

помноживши на c^4 , одержимо $m^2 c^4 - m^2 v^2 c^2 = m_0^2 c^4$. Враховуючи, що $E = mc^2$, а $p = mv$, запишемо:

$$E^2 - p^2 c^2 = m_0^2 c^4.$$

Це співвідношення можна використати також при виведенні формули Комптона і при розв'язуванні задач з квантової фізики [6, 6 – 10].

Аналіз навчального матеріалу з квантової оптики показав, що є можливість його викласти відповідно до гносеологічного циклу пізнання і на прикладі розвитку квантових уявлень проілюструвати виникнення нових наукових фактів, накопичення

експериментальних даних, висунення гіпотез, виведення наслідків із них й експериментальну перевірку цих наслідків, побудову послідовної теорії і відкриття з її допомогою нових, не відомих раніше явищ, створення на основі фізичної теорії нової техніки.

Як відмічав В.Г. Разумовський, саме ці ступені так необхідні для формування творчого потенціалу особистості, для радості навчального пізнання, для розвитку мислення.

На *рис. 1* представлена схема циклічної побудови навчального матеріалу з квантової оптики.

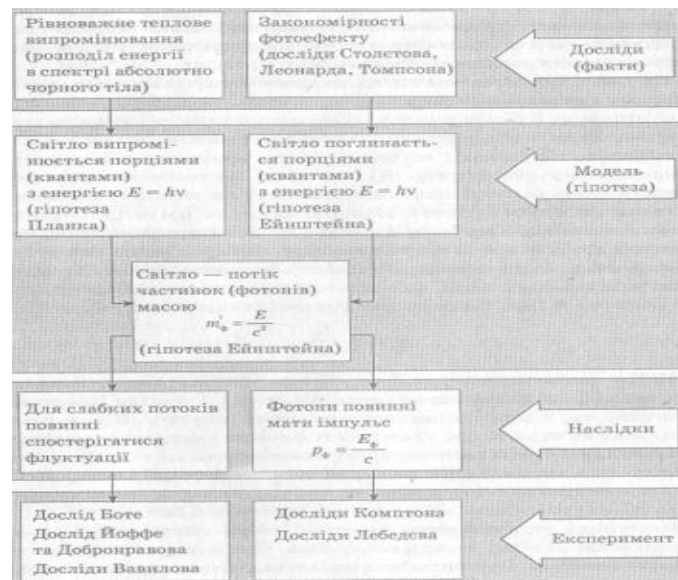


Рис. 1. Схема циклічної побудови навчального матеріалу з квантової оптики

Розглянемо її більш детально. Спочатку з учнями вивчаємо висхідні факти, які потім кладемо в основу квантової моделі світла. Такими фактами є розподіл енергії в спектрі абсолютно чорного тіла і закономірності фотоефекту. Від висхідних фактів індуктивно здійснюємо перехід до побудови моделі, яка виступає спочатку як гіпотеза. Такою гіпотезою є гіпотеза Ейнштейна про те, що світло — потік частинок (фотонів) з енергією $h\nu$.

З цієї моделі одержуємо наслідки, які підтверджуються експериментально. Дійсно, якщо світло — потік фотонів, то, по-перше, для слабких фотонних потоків повинні спостерігатись флуктуації, а по-друге, відповідно до співвідношення між енергією та імпульсом фотони повинні володіти імпульсом:

$$p_{\phi} = \frac{E_{\phi}}{c}.$$

Потім вивчаємо досліди Боте, Йоффе-Добронравова, Вавилова, в яких спостерігаються флуктуації фотонів, і досліди Комптона і Лебедева, які є доказом наявності у фотона імпульсу. Після цього узагальнюємо знання про властивості фотонів і формуємо поняття корпускулярно-хвильового дуалізму властивостей світла. На цьому

завершується перший етап побудови квантової теорії світла. Далі розглядаємо такі світлові явища, як хімічна дія світла, люмінесценція та ін., які пояснюємо в рамках квантової теорії світла.

Наступний етап побудови квантової теорії світла відбувається при вивченні атомної та ядерної фізики. Тут вона поглиблюється та узагальнюється. Розкривається механізм випускання й поглинання випромінювання атомами та ядрами, пояснюється походження атомних і ядерних спектрів. Прикладом евристичної сили теорії є передбачення Ейнштейном вимушеного випромінювання, а прикладом створення на основі квантової теорії нової техніки є квантові генератори радіо- та оптичного випромінювання (мазери та лазери).

При такому підході до розробки структури навчального матеріалу його дидактичні, розвиваючі й виховні функції розглядаються в єдності і взаємозв'язку. Але цим не обмежуються шляхи підвищення ефективності вивчення цього розділу.

Вивчення квантової оптики може проходити успішно тільки за умови застосування сучасних інтерактивних технологій навчання, які ґрунтуються на діалозі, спільному розв'язанні проблем, вільному обміні думками, активній взаємодії всіх учнів. Особливо широкі можливості виникають при вивченні цього розділу у зв'язку з використанням у навчанні нових інформаційних технологій, зокрема мультимедійних посібників.

Досліди, які підтверджують фотонну структуру світла

Якщо ознайомлення учнів з тепловим випромінюванням і гіпотезою Планка переконує їх у квантовому характері випромінювання, а розгляд закономірностей фотоефекту та ефекту Комптона послужив доказом квантового характеру поглинання та розсіювання світла, то це не означає, що ці ж явища слугують доказом того, що світло поширюється у просторі у вигляді дискретних частинок (фотонів). Тому дуже важливо познайомити учнів ще й з дослідями, які безпосередньо підтверджують квантову (фотонну) структуру випромінювання, яке ще не вступило у взаємодію з речовиною. Такими дослідями є спеціальні досліди, що були виконані вченими В. Боте, О. Йоффе і М. Добронравовим, С. Вавиловим.

Ідея їх полягає в тому, що якщо світло має дискретну структуру, то для слабких світлових потоків повинні спостерігатись флуктуації числа фотонів. Щоб учням стала зрозумілою ця ідея, необхідно спочатку провести аналогію з ідеєю про дискретну структуру речовини. Якщо, наприклад, число молекул газу в системі дуже велике, то їхні властивості проявляються як деякі середні величини: тиск, густина і т. ін.

Якщо число молекул мале, то стає помітним відхилення від середніх величин, які називають флуктуаціями тих чи інших величин. Флуктуації саме і вказують на корпускулярну природу газів. Так і у світлових потоках. Як тільки число фотонів у світловому потоці зменшується, повинні стати помітними флуктуації інтенсивності світла, що й буде доказом його квантової структури. Після цього можна перейти до розгляду самих дослідів [6, 43 – 46].

Дослід Боте

У 1924 році В. Боте поставив дослід щодо спостереження флуктуацій фотонів рентгенівського випромінювання. Установку Боте схематично зображено на *рис. 2*. Тут А — металева (залізна чи мідна) фольга, яка освітлювалася збоку вузьким пучком рентгенівських променів, при цьому фольга сама ставала джерелом рентгенівського випромінювання з певною частотою (рентгенівська флуоресценція).

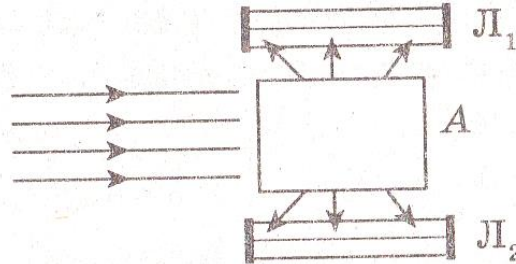


Рис. 2. Установа Боте

Це вторинне випромінювання потрапляє у два лічильники Гейгера L_1 і L_2 . Потраплення фотона в лічильник призводить до виникнення розряду в ньому. Якби джерело А випромінювало так, як цього вимагає хвильова теорія, то сферична хвиля одночасно досягла б обох лічильників L_1 та L_2 і розряди в них виникали б одночасно. Якщо із фольги А вилітають окремі фотони, то вильоти їх вгору і вниз будуть незалежними хаотичними подіями. При малому числі фотонів буде безладно спрацьовувати то перший лічильник, то другий. Досліди показали, що розряди, які виникали у лічильниках під впливом рентгенівських імпульсів, проходили в обох лічильниках незалежно і безладно, що підтверджувало квантову структуру випромінювання [6, 43 – 46].

Дослід Йоффе-Добронравова

Знайомство учнів з цим дослідом можна провести у вигляді розв'язування відповідної фізичної задачі:

Негативно заряджена порошинка вісмуту діаметром $d=0,6$ мкм урівноважена в електричному полі на відстані $h=0,2$ мм від нижньої пластинки конденсатора, виготовленого із тонкої фольги (*рис. 3*). В точку А цієї пластинки щосекунди потрапляє 1000 електронів з енергією 12 кеВ кожний. При ударах електрона об фольгу в цій точці виникає рентгенівське випромінювання, що вільно проходить крізь неї.

Вважати, що енергія електрона повністю переходить в енергію випромінювання. Чи буде рентгенівське випромінювання вибивати електрони з порошинки і порушувати її рівновагу? ($A_{вих} = 4,4$ еВ - робота виходу для Ві). Дати відповідь спочатку на основі хвильової, а потім квантової теорії світла.

Дано: $d = 0,6$ мкм, $h = 0,2$ мм, $n = 10^3$ с⁻¹, $E = 12$ кеВ, $A_v = 4,4$ еВ

Знайти: E_0 - ?, t - ?

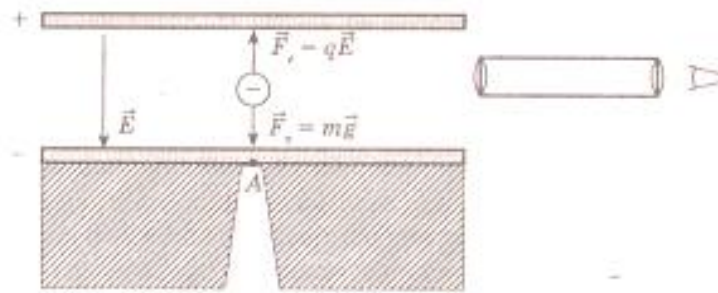


Рис. 3. Дослід Йоффе-Добронравова

Розв'язування

Хвильова теорія

Під час удару електрона об фольгу виникає в точці А сферична хвиля з енергією $E = 12 \text{ кеВ} = 1,2 \cdot 10^4 \text{ еВ}$. Згідно з хвильовою теорією, ця енергія повинна рівномірно розподілитися по сферичному фронту хвилі, тобто в тілесному куті $4\pi \text{ ср.}$ (1 стерадіан — це тілесний кут, що вирізає на сфері площу, яка дорівнює площі квадрата із стороною, що дорівнює радіусу сфери.) [6, 43 – 46].

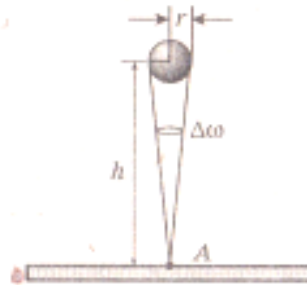


Рис. 4.

Порошинку видно із т. А під тілесним кутом $\Delta\omega$ (рис. 4):

$$\Delta\omega = \frac{\pi d^2}{4h^2},$$

де d — діаметр порошинки, h — відстань від нижньої пластинки. Тоді:

$$\Delta\omega = \frac{\pi \cdot 0,6^2 \cdot 10^{-12}}{4 \cdot 4 \cdot 10^{-8}} = 7 \cdot 10^{-6} \text{ (ср.)}$$

Отже, на порошину падає енергія хвилі:

$$E_0 = \frac{E}{4\pi} \Delta\omega = \frac{12 \cdot 10^3 \cdot 7 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 3,14} \approx 6,68 \cdot 10^{-3} \text{ (еВ)},$$

оскільки $E_0 < A_s$ (A_s — робота виходу), то електрон вириватись не буде, а відтак рівновага порошинки порушуватись теж не буде.

Квантова теорія

При ударі електрона об фольгу в т. А виникає один фотон рентгенівського випромінювання з енергією 12 кеВ, яка набагато більша роботи виходу електрона,

отже, цей фотон, якщо потрапить у порошок, обов'язково вирве електрон з неї, і рівновага повинна порушитись. При цьому потік фотонів повинен бути слабким.

Дослід, описаний у задачі, у 1922 р. поставили А. Йоффе і М. Добронравов, і він підтвердив правильність зробленого припущення.

Рівновага порошинки порушувалась. Змінюючи напругу між обкладками, порошок знову зрівноважували і продовжували спостерігати за нею за допомогою мікроскопа. Дослід показав, що через деякий час порошок знову зривалась з місця.

Можна запропонувати учням визначити проміжок часу між послідовними потрапляннями фотонів у порошок.

Але треба повідомити їм, що ймовірність потрапляння фотона в порошок визначається відношенням:

$$k = \frac{\Delta\omega}{4\pi}$$

Оскільки за 1 с на фольгу в т. А падає 10^3 електронів, то стільки ж фотонів за 1 с і випромінюється, тоді проміжок часу між потрапляннями фотонів буде визначатися:

$$t = \frac{1}{nk} = \frac{1 \cdot 4\pi}{n\Delta\omega} = \frac{4 \cdot 3,14}{10^3 \cdot 7 \cdot 10^{-6}} \approx 1799 \text{ c} = 30 \text{ хв.}$$

Одержали результат, який добре збігається з дослідом. У досліді, проведеному вченими, окремі виривання електронів з порошинки наставали одне за одним через випадкові проміжки часу, але середній проміжок часу виявився дійсно рівним 30 хвилинам. Робимо висновок: розглянутий дослід може бути пояснений тільки на основі квантової структури випромінювання.

Цей дослід особливий тим, що дозволяє простежити дії саме окремих фотонів. Рентгенівське випромінювання було настільки слабким, що наступний фотон випромінювався з т. А набагато пізніше після того, як пролетів попередній фотон: відстань $h=0,2$ мм фотон проходить за $\frac{0,0002}{3 \cdot 10^8} = 7 \cdot 10^{-13}$ (с), а наступний фотон випромінювався тільки через 10^{-3} с.

На зауваження учнів про те, що, можливо, один електрон неймовірно тривалий час ($t=30$ хв.) накопичував енергію рентгенівського випромінювання, не віддаючи її сусіднім частинкам, або всі електрони порошинки незрозумілим чином іноді передавали енергію, яку поглинають, одному електрону, який вивільнювався з порошини, можна пояснити, що для цього немає підстав, оскільки випромінювання електронів відбувалось з однаковою енергією через різні проміжки часу.

Таким чином, порошок витрачає електрони під дією слабого рентгенівського випромінювання, і це відбувається саме внаслідок дії окремих фотонів [4, 22 – 23].

Для осмислення результатів досліді Йоффе-Добронравова пропоную учням ряд запитань:

1. Як у розглянутому досліді проявляються флуктуації фотонів?
2. Як буде змінюватись проміжок часу між потраплянням фотонів у порошок, якщо число електронів, які щосекунди потрапляють в т. А, весь час зростатиме?

3. Виривання електронів з порошинки є результатом явища фотоефекту чи ефекту Комптона?

Висновок

Таким чином, теорія світла мала три періоди розвитку:

1) корпускулярна теорія, запропонована Ньютоном, що панувала в оптиці з XVIII ст. і до 30-х років XIX ст.;

2) другий період розвитку теорії світла (XIX ст.) був періодом відносно швидкого розвитку хвильової теорії, яка розглядала світло як поширення хвильового процесу в деякому гіпотетичному середовищі — світлоносному ефірі, що пронизує всі тіла;

3) третій період розвитку теорії світла (початок XX ст.) характеризується всебічним розвитком квантової теорії світла – вчення про єдність корпускулярно-хвильових властивостей світла.

Список використаних джерел

1. Бугаев А.И., Горбунцова Л.Г., Савченко В.И. Квантовая физика: Дидактич. материал.- К.: Рад. шк., 1988. – 88 с. – На укр. яз.- ст. 4 – 7.
2. Величко С.П., Костенко Л.Д. Вивчення основ квантової фізики: Навч. Посібник. – Кіровоград, 2002. – 274 с.
3. Гончаренко С.У., Розенберг М.Й. Методика обучения физике в средней школе. (Колебания и волны. Оптика. Теория относительности. Физика атомного ядра).
4. Гончаренко С.У. Формування наукового світогляду учнів під час вивчення фізики: Посібник для вчителя. – К.: Рад. шк., 1990. – 208 с. – Мова укр. – ст. 119 – 138.
5. Костенко Л.Д. Диференційоване вивчення основ квантової фізики у середніх навчальних закладах різного профілю. Дис.... канд.. пед. наук: 13.00.02. – Кіровоград, 2000. – 316с.
6. Сущенко С.С. Вивчення квантових властивостей світла у школі / С.С. Сущенко, Л.С. Недбаєвська – Х: Вид. група. «Основа», 2007. – 144 с.

Анотація. Мусієнко І. Методика вивчення квантових властивостей світла у школі.

У статті розглянуто методичні підходи до вивчення квантових властивостей світла в школі, розкрито циклічний принцип побудови навчального матеріалу з квантової оптики.

Ключові слова: корпускулярно-хвильовий дуалізм, фотон, квантова оптика, вивчення фізики у школі.

Аннотация. Мусиенко И. Методика изучения квантовых свойств света в школе.

В статье рассмотрены методические подходы к изучению квантовых свойств света в школе; описан циклический принцип построения учебного материала по квантовой оптике.

Ключевые слова: корпускулярно-волновой дуализм, фотон, квантовая оптика, изучение физики в школе.

Abstract. Musienko I. Method for studying the quantum properties of light in the school.

Article touches upon the methodical approaches to the study of the quantum properties of light in the school; second - disclosed cyclic principle of educational material on quantum optics, and the third - has developed lessons and their experimental verification of teaching physics lessons.

Keywords: wave-particle duality, photon, quantum optics.