

УДК 53(07)

Сергій Терещук,
кандидат педагогічних наук, доцент,
докторант НПУ ім. М. П. Драгоманова

НАУКОВО-МЕТОДИЧНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДИКО-МЕТОДОЛОГІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИВЧЕННЯ КВАНТОВОЇ ТЕОРІЇ У КУРСІ ФІЗИКИ СТАРШОЇ ШКОЛИ

У статті здійснено науково-методичний аналіз поняття «квантова теорія». Розкрито глибокий методологічний зміст поняття «квант світла». На підставі проведеного аналізу, запропоновано методичний підхід щодо пояснення суті гіпотези Планка для учнів, які вивчають фізику на поглибленому рівні (академічний або профільний рівень).

Ключові слова: квантова теорія, квант, абсолютно чорне тіло, профільна школа, методична система.

В статье проведен научно-методический анализ понятия «квантовая теория». Раскрыто глубокий методологический смысл понятия «квант света». На основании проведенного анализа, предложен методический подход к объяснению сути гипотезы Планка для учащихся, изучающих физику на углубленном уровне (академический или профильный уровень).

Ключевые слова: квантовая теория, квант, абсолютно черное тело, профильная школа, методическая система.

The article gives a scientific and methodical analysis of the concept of «quantum theory». Revealed a deep methodological meaning of the «quantum of light.» Based on the analysis, the methodical approach to explain the essence of the hypothesis of Planck for students studying physics at the advanced level (academic or profile level).

Key words: quantum theory, quantum, black body, profile school, methodical system.

Вивчення явищ взаємодії світла з речовиною у курсі фізики старшої школи, дозволяє учням глибше пізнати природу світла. До таких явищ відносять випромінювання абсолютно чорного тіла та фотоефект. Вивчення означених відомостей створює сприятливі методичні умови з формування уявлень про дискретний характер електромагнітного випромінювання і, що головне, ознайомлює старшокласників з елементами квантової теорії. У нових підручниках з фізики [1–3; 5] вивчення квантової оптики пропонується розпочинати саме з уведення поняття «квантова

теорія» («квантова фізика»). Доречність такого підходу можна обґрунтувати наступним чином.

Становлення і розвиток квантової теорії супроводжувався уведенням в науковий обіг нових фундаментальних понять, які суперечили усталеним уявленням класичної фізики. Серед таких понять слід окремо вказати на поняття кванту електромагнітного випромінювання. Формування даного поняття у курсі фізики старшої школи становить складну науково-методичну проблему. Теорія формування понять з поміж інших критеріїв, вимагає уведення нових для учнів наукових понять здійснювати через демонстрацію недостатності вже відомих понять для пояснення нових фактів або явищ в межах існуючих тогочасних наукових теорій. Інакше кажучи, учням слід навести мотивацію уведення того чи іншого нового поняття у науці. Методологічно це правильно, однак методично іноді доволі складно виконати, оскільки процедура вказаної мотивації підвищує ймовірність використання логіки та відповідного рівня абстрагувань із залученням складного математичного апарату, який використовується вченими-фізиками. Для того, аби виокремити можливі шляхи подолання вказаних методичних проблем слід провести науково-методичний аналіз системи понять, які складають основу фундаментального поняття «квантова теорія». У зв'язку з цим, нижче розглянуто зміст даних понять та логіка їх становлення у науці. Результати такого аналізу дозволять вказати на пріоритетні напрями методичної системи вивчення квантової фізики у профільній школі.

Народження квантової фізики пов'язують з ім'ям видатного німецького фізика Макса Планка (1858–1947) та з подією, що відбулася 14 грудня 1900 року на засіданні Німецького фізичного товариства, коли ним було представлено результати дослідження спектральної густини енергії випромінювання абсолютно чорного тіла та введено фундаментальну фізичну константу h .

Цій події передувало розв'язання проблеми випромінювання абсолютно чорного тіла. Суть означеної проблеми полягала в тому, що потрібно було знайти розподіл за частотами ν енергії рівноважного електромагнітного випромінювання тіла, нагрітого до певної температури T . Г. Кірхгоф показав, що енергія E рівноважного випромінювання абсолютно чорного тіла є універсальною функцією температури. Згідно із законом Кірхгофа відношення випромінюючої здатності A_ν тіла до його поглинаючої здатності a_ν не залежить від природи тіла і дорівнює випромінюючій здатності абсолютно чорного тіла r_ν за тих же значень температури і частоти:

$$\frac{A_\nu}{a_\nu} = r_\nu = \frac{c}{4} \rho(\nu, T) \quad (1)$$

Залежність r_ν від ν і T задається функцією Кірхгофа:

$$r_\nu = f(\nu, T) \quad (2)$$

Із закону Кірхгофа випливає, що енергетична світність R_e чисельно дорівнює енергії випромінювання усіх довжин хвиль з одиниці поверхні тіла за одиницю часу:

$$R_e = \int_0^\infty r_\lambda d\lambda \quad (3)$$

де r_λ – спектральна густина енергетичної світності (тобто енергетична світність, що припадає на одиничний інтервал довжин хвиль).

Л. Больцман теоретично, а Й. Стефан емпірично довели, що густина енергії пропорційна четвертій степені абсолютної температури (закон Стефана-Больцмана).

Перед вченими постала задача на визначення виду функції Кірхгофа (1). У 1895 р. Люммером і Прінгсгеймом було отримано експериментальні криві розподілу енергії в спектрі випромінювання абсолютно чорного тіла (мал. 175 підручника [5, с. 183]), одержані за допомогою моделі абсолютно чорного тіла, сконструйованою Люммером у вигляді випромінюючої порожнини. Ці криві відповідали функції Кірхгофа. Відповідно до формули (3) площа під кривою чисельно дорівнює енергетичній світності абсолютно чорного тіла для певної температури. Однак, теоретично обґрунтувати дану функцію, представлену цими кривими, ніяк не вдавалося. Спроби такого обґрунтування із посиланням на закони класичної фізики, були здійснені незалежно одне від одного В. Віном та Д. Релеєм. Так, Він застосувавши методи термодинаміки, отримав формулу

$$r_\nu = \nu^3 f\left(\frac{\nu}{T}\right) \quad (4)$$

де $f\left(\frac{\nu}{T}\right)$ – невідома функція відношення $\left(\frac{\nu}{T}\right)$.

Формула (4) добре узгоджувалась з емпіричними даними в області коротких хвиль (великих частот). Використання законів електродинаміки і закону класичної статистичної фізики про рівномірний розподіл енергії за ступенями вільності рівноважної системи, привело Релея до формули, яка згодом отримала назву Релея-Джинса¹:

$$r_\nu = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT \quad (5)$$

де k – стала Больцмана.

Формула (5) узгоджувалась із експериментальними даними лише в області малих частот (довгих хвиль).

Таким чином, експериментально отриманий вид функції

¹ В історію науки цей закон розподілу Релея увійшов під назвою закону Релея-Джинса, оскільки Джинсом було показано універсальність виразу $r_e = \frac{ckT}{\lambda^4}$.

Кірхгофа (2) (мал. Підручника [5, с. 183]), описувався двома формулами: одна для короткохвильової частини спектру (формула Віна (4)), друга – для довгохвильової (формула Релея-Джинса (5)). Необхідно було «зшити» ці формули. Вирішити цю непросту задачу вдалося саме М. Планку, який знайшов правильний вираз для середньої енергії коливної системи та її функції Кірхгофа. Нижче буде наведено міркування Планка² для того, аби на підставі науково-методичного аналізу вибудувати методичні рекомендації щодо викладу даного навчального матеріалу.

Абсолютно чорне тіло можна представити як модель, що являє собою нескінченну систему осциляторів³ із різноманітними власними частотами. Зрозуміло, що один такий осцилятор відповідає монохроматичній компоненті абсолютно чорного тіла. Прийнемо також, що для даної моделі буде справедливим наступне: об'ємна густина енергії рівноважного чорного випромінювання в замкненій порожнині та розподіл енергії цього випромінювання за частотами не залежить від матеріалу стінок цієї порожнини. Обрахунки показують, що

$$r_\nu = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \bar{E}_\nu, \quad (6)$$

де \bar{E}_ν – середнє значення енергії осцилятора із власною частотою ν .

Якщо ця енергія дорівнюватиме kT у відповідності до класичного закону про рівномірний розподіл енергії за ступенями вільності, тоді вираз (6) перетворюється на закон Релея-Джинса (5). Гіпотеза Планка полягала в тому, що енергія осцилятора \bar{E}_ν може приймати лише певні дискретні значення:

$$E_\nu = nE_0 \quad (7)$$

де $n = 0, 1, 2, \dots$ – цілі числа.

Далі, прийнявши, що розподіл осциляторів за можливими дискретними енергетичними станами описується законом Больцмана, Планк отримав формулу ймовірності знаходження осцилятора у стані з енергією nE_0 при температурі T , з якої й вивів рівняння для середньої енергії \bar{E}_ν осцилятора із власною частотою ν . Порівнюючи отриманий результат із формулою Віна (4), він прийшов до висновку, що формулу (7) можна переписати так:

$$E_\nu = nE_0 = nh\nu_0 \quad (8)$$

де h – коефіцієнт пропорційності, який згодом назвали сталою Планка. Таким чином, М. Планк представив абсолютно чорне тіло як сукупність гармонічних осциляторів і припустив, що енергія теплового випромінювання є переривчатою (дискретною). Енергія одного кванту (порції) $E = h\nu$. Висунута гіпотеза Планка, дозволяла розв'язати задачу із випромінюванням абсолютно чорного тіла. Густина енергії

² Тут і далі не наводиться складний математичний апарат, натомість зберігається основна ідея, покладена в основу гіпотези Планка.

³ Осцилятор (від лат. *oscillo* – коливаюсь) – коливна система.

випромінювання, обрахована за класичною теорією, прямувала у нескінченність після інтегрування за усіма частотами («ультрафіолетова катастрофа»). За формулою Планка густина енергії випромінювання виявилась скінченною і відповідала експериментальним даним.

Як видно з наведеного аналізу, в основу гіпотези Планка покладено досить просту (і водночас геніальну) ідею. Привабливість цієї ідеї не лише в тому, що вона проста за змістом і може бути зрозуміла навіть учням загальноосвітньої школи, а саме тому, що вона дозволяє пояснити чому так, а не інакше поводить себе експериментально отримана крива розподілу енергії в спектрі випромінювання абсолютно чорного тіла (мал. 175 [5, с. 183]). Тепер легко зрозуміти, чому, наприклад, при великих частотах енергія не виявляється нескінченною (адже згідно із класичним законом енергія одного осцилятора дорівнює kT , а таких осциляторів нескінченно багато), а навпаки близька до нуля, що унеможливило так звану «ультрафіолетову катастрофу». Саме ці особливості, слід враховувати при поясненні учням відповідного навчального матеріалу, звичайно уникаючи термінології і математичного апарату (1)–(6).

М. Планк тривалий час вважав, що «квант дії» можна інтерпретувати в межах класичної теорії. Так, ним спочатку була запропонована теорія згідно з якою електромагнітне випромінювання має дискретний характер, а поглинання – неперервний. Потім він схилився до думки, що і поглинання, і випромінювання відбувається неперервно, однак при зіткненнях осциляторів з частинками (молекулами, іонами, електронами) енергія осцилятора змінюється стрибкоподібно на величину, що кратна $h\nu$.

М. Планком було уведено дві константи – сталої Больцмана та «елементарного кванту дії» h (згодом стала Планка). Якщо перша константа мала цілком зрозумілий і прозорий зміст – коефіцієнт пропорційності, що дозволяє визначати температуру як середню кінетичну енергію молекули ідеального газу ($E = \frac{3}{2}kT$), то друга створювала прецедент дискретності випромінювання електромагнітної енергії. За словами самого М. Планка, це означало, що «...квант дії мав би відігравати у фізиці фундаментальну роль, тоді поява його означала дещо зовсім нове, дотепер нечуване, що, здавалося, вимагало перетворення основ нашого фізичного мислення, заснованого, з часів обґрунтування аналізу нескінченно малих Ньютоном і Лейбніцем, на припущенні про неперервність усіх причинних зв'язків» [4, с. 608].

А. Ейнштейн, досліджуючи явище зовнішнього фотоефекту (1905), висловив припущення, що світло не лише випромінюється, а й поглинається квантами з енергією $h\nu$. Це дозволило пояснити механізм протікання та закони фотоефекту.

Досить вагомим рушієм розвитку квантової теорії, крім вивчення теплового випромінювання і фотоефекту, стали дослідження в галузі спектроскопії газів та будови атома. Ще наприкінці XIX ст. були отримані лінійчасті спектри, що дозволило зробити висновок про те, що ізольовані

атоми даного хімічного елемента випромінюють цілком певні довжини хвиль. Причому, кожному хімічному елементу притаманний лише для нього власний набір спектральних ліній, який розпадається на кілька серій. У 1908 р. В. Рітц (1878–1909) сформулював комбінаційний принцип, згідно з яким, будь-яку нову лінію в спектрі даного елемента можна вивести із раніше відомих, комбінуючи їх у вигляді сум і різниць. Виникало слушне запитання: які закони покладені в основу таких закономірностей? Подібних питань, на які класична фізика не давала відповіді, на початку ХХ ст. накопичилось достатньо багато. Головним питанням було – як побудований атом і як його будова пов'язана із закономірностями у спектрах? Шукаючи відповіді на ці питання через створення відповідних теорій (теорія атома за Бором, взаємодія випромінювання з атомами за Ейнштейном та ін.), поступово було розвинуто квантову механіку.

Вчені починають пропонувати до уведення в науковий обіг нові поняття при появі протиріч між наявними знаннями та науково-практичними задачами, які не вдається розв'язати в межах відомої теорії (чи теорій). Слід, однак, усвідомлювати, що розв'язання наукової задачі чи сукупності проблем не зводиться до уведення нового терміну із заміною старих понять на нові. Нове поняття є результатом величезної роботи зі створення теорії, її дослідного обґрунтування та практичного використання. У цьому сенсі про наукове поняття слід говорити як про складну систему логіко-гносеологічних категорій. Тому вкрай важливо продемонструвати учням, хоча б у загальних рисах, логіку і напрямок наукових пошуків, які передували утворенню фундаментального поняття «квант». Рівень розкриття змісту цих досліджень визначатиметься рівнем профільної диференціації.

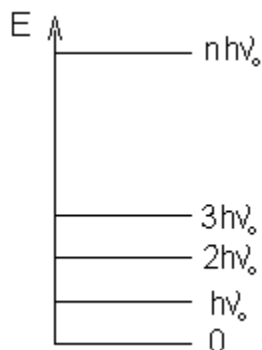
Таким чином, вивчення квантової теорії доцільно розпочинати з розгляду сутності протиріч, які виникли під час спроб пояснити закономірності випромінювання абсолютно чорного тіла з позицій класичної теорії випромінювання.

Означена на початку статті проблема формування понять через виявлення протиріч, які існували в науці на час творення нового поняття, вимагає, безумовно, диференційованого підходу, а відтак врахування особливостей профільного вивчення фізики у старшій школі. Для учнів, які засвоюватимуть курс фізики на рівні стандарту, варто лише вказати на неможливість пояснити експериментально одержані графіки розподілу енергії в спектрі випромінювання вугільної спіралі при різних температурах [5]. Для учнів, що вивчають відповідний навчальний матеріал на більш глибокому рівні (профільний чи академічний рівень [1; 2]), обґрунтування квантової гіпотези можна представити наступним чином.

Гіпотеза Планка полягала у тому, що енергія гармонічного осцилятора, як елементарної коливної системи, не може приймати будь-які значення. За власної частоти коливань ν_0 вона приймає лише дискретні значення:

$$E_n = h\nu_0 n, \quad (9)$$

де $n = 0, 1, 2, 3, \dots$. У відповідності до гіпотези Планка енергія осцилятора, відповідно до формули (9), може приймати значення $0, h\nu_0, 2h\nu_0, 3h\nu_0, \dots, nh\nu_0$ (мал. 1).



Мал. 1

Енергія, яка необхідна для коливань осцилятора, може бути отримана від теплового руху частинок. Отже, для однієї частинки вона складатиме kT . Для того, щоб осцилятор почав коливатися, йому необхідно надати енергію $E > h\nu_0$. Якщо ж $h\nu_0 \gg kT$, осцилятор випромінювати не буде. Тому середнє значення енергії осцилятора E не дорівнює kT , а залежить від частоти і при прямуванні останньої до нескінченності дорівнює нуль. Те, що енергія осцилятора приймає лише дискретні значення означає його неперервне випромінювання, а окремими порціями (квантами). Інакше кажучи, енергія коливної системи може змінюватись лише стрибкоподібно на величину $h\nu_0$. Таким чином, наведені міркування приводять до висновку: кванту електромагнітного випромінювання відповідає енергія $E = h\nu_0$.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Фізика 11 клас. Академічний рівень. Профільний рівень : підручник для загальноосвіт. Навч. закл. / В. Г. Бар'яхтар, Ф. Я. Божинова, М. М. Кірюхін, О. О. Кірюхіна. – Х. : Видавництво «Ранок», 2011. – 320 с.
2. Засекіна Т. М. Фізика : підручн. Для 11 кл. загальноосвіт. Навч. закл.: (академічний рівень, профільний рівень) / Т. М. Засекіна, Д. О. Засекін. – Харків : Сиція, 2011. – 336 с.
3. Коршак Є. В. Фізика: 11 кл. : підруч для загальноосвіт навч закл.: рівень стандарту / Є. В. Коршак, О. І. Ляшенко, В. Ф. Савченко. – К. : Генеза, 2011. – 256 с.
4. Планк М. Избр. труды / Планк М. – М. : Наука, 1975. – 812 с.
5. Сиротюк В. Д. Фізика : підруч. Для 11 кл. загальноосвіт. Навч. закл.: (рівень стандарту) / В. Д. Сиротюк, В. І. Баштовий. – Харків : Синиця, 2011. – 304 с.