

УДК 373.5.016:530.145

Войнов О.Л., Белошапка О.Я.

¹ старший учитель, фахівець вищої категорії, учитель фізики, астрономії та інформатики, Миколаївський ЗЗСО І-ІІІ ст. №3 Миколаївської міської ради Краматорського р-ну Донецької обл.

e-mail: bytic2010@gmail.com,

ORCID 0000-0002-1082-6565

² старший викладач кафедри фізики, ДВНЗ «ДДПУ»

e-mail: kafedrafiziki2018@gmail.com,

ORCID 0000-0001-7448-3832

ДО ВИВЧЕННЯ КВАНТОВОЇ ТЕОРІЇ В КУРСІ ФІЗИКИ В СЕРЕДНІХ НАВЧАЛЬНИХ ЗАКЛАДАХ

В статті розглядаються звідродження квантової теорії, проблема пояснення теплового випромінювання, гіпотеза Планка, світлові кванти. Автори пропонують матеріал з цієї теми, який можна використовувати під час проведення уроків.

Ключові слова: теплове випромінювання, поглинання, абсолютно чорне тіло, ультрафіолетова катастрофа, кванти світла, фотони, гіпотеза Планка, квантова фізика, квантова теорія.

Вступ

Роль сучасної школи полягає у формуванні гармонійної інноваційної особистості, яка здатна навчатися протягом життя та вміє орієнтуватися у навколишньому середовищі. З такої точки зору фізика як предмет корисна насамперед через потужний інструмент розвитку мислення та формування світогляду.

При вивченні багатьох фізичних явищ необхідно враховувати, що деякі фізичні величини, які вважалися раніше безперервними, складаються з елементарних квантів. Термін «квант» з'явився у фізиці в 1900 році завдяки роботам Макса Планка. Він намагався теоретично описати випромінювання, що випускається нагрітими тілами, — так зване «випромінювання абсолютно чорного тіла», здатного поглинати і випускати електромагнітне випромінювання, що падає на нього. Це й лягло в основу нової теорії.

У статті пропонується матеріал, який можна використовувати на першому уроці з вивчення квантової фізики. На основі цього матеріалу у учнів формується поняття кванта світла як мінімальної порції енергії електромагнітного випромінювання.

Основна частина

Тема. Квантова фізика. Зародження квантової теорії. Проблема пояснення теплового випромінювання. Гіпотеза Планка. Світлові кванти.

Мета. Сформувані у школярів поняття кванта світла як мінімальної порції енергії електромагнітного випромінювання.

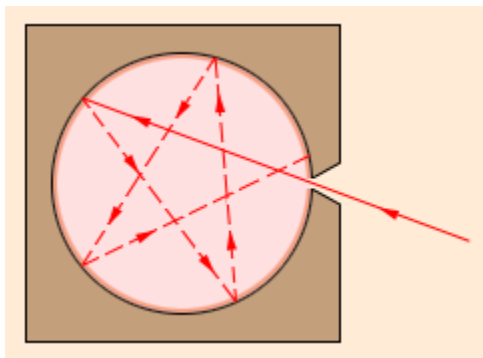
1. Повторити з матеріалу, що вивчений раніше електромагнітні хвилі, умови найефективнішого випромінювання цих хвиль.

2. Відзначити, що відкриття електромагнітних хвиль, вивчення їх властивостей та законів поширення показали, що основні властивості світла пояснюються електромагнітною теорією. Однак для повної перемоги електромагнітна теорія повинна була дати роз'яснення не лише закономірностям поширення світла, а й законам випромінювання та поглинання світла речовиною.

Існує багато різних механізмів підведення енергії до джерела світла. У випадках, коли необхідна енергія подається нагріванням, т. е. підведенням тепла, випромінювання називається тепловим чи температурним. Теплове випромінювання – це електромагнітне випромінювання, що виникає внаслідок внутрішньої енергії тіла. Таке випромінювання фізики кінця ХІХ століття вважали дуже цікавим, бо на відміну від інших видів люмінесценції, теплове випромінювання може перебувати в стані термодинамічної рівноваги з нагрітими тілами.

Вивчаючи закономірності теплового випромінювання тіл, фізики сподівалися встановити взаємозв'язок між термодинамікою та оптикою. Якщо в замкнуту порожнину з дзеркально відбивають стінками помістити кілька тіл, нагрітих до різної температури, то, як показує досвід, така система з часом приходить у стан теплової рівноваги, при якому всі тіла набувають однакової температури. Тіла обмінюються енергією тільки шляхом випромінювання та поглинання променистої енергії. У стані рівноваги процеси випромінювання і поглинання енергії кожним тілом в середньому компенсують один одного, і в просторі між тілами густина енергії випромінювання досягає певного значення, що залежить тільки від температури тіл. Випромінювання, що відбувається в термодинамічній рівновазі з тілами, що мають певну температуру, називається рівновісним або чорним випромінюванням. Густина енергії рівновісного випромінювання та його спектральний склад залежить тільки від температури.

3. Підкреслити, що на початку ХХ ст. увагу і найбільший інтерес фізиків займали закономірності випромінювання нагрітих тіл, властивості яких схожі на властивості абсолютно чорного тіла, тобто тіла, яке цілком поглинає електромагнітне випромінювання, що падає на нього, з будь-якою довжиною хвилі.



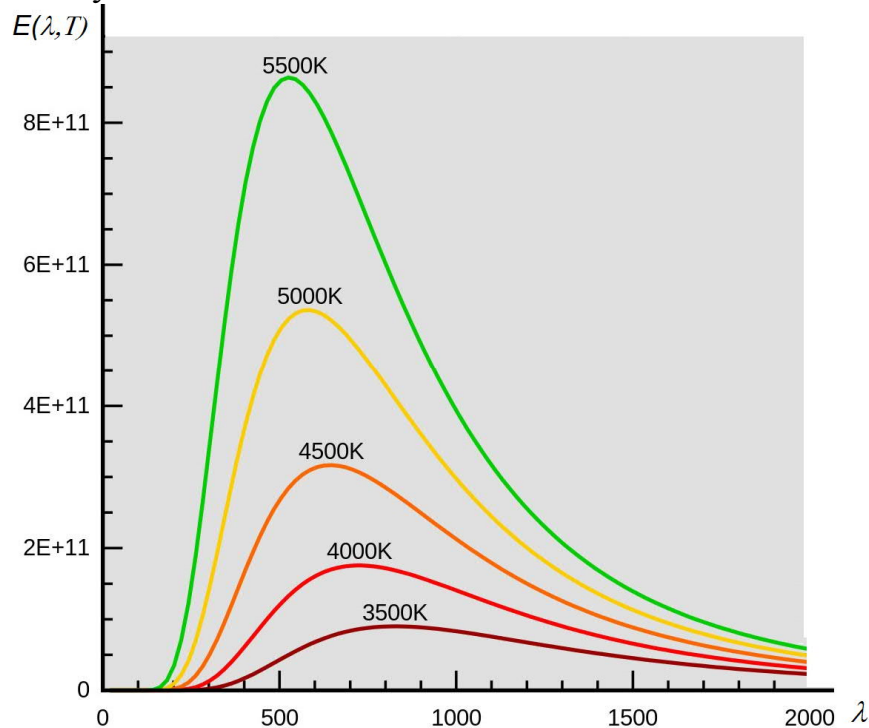
Моделью чорного тіла може служити пустий посуд довільної форми, (куля або циліндр) з отворами в стінках. Отвори такі малі, що промінь світла, що проникла в цю посудину, практично повністю поглинається багаторазово відбиваючись від його стінок і не може вийти назовні.

Абсолютно чорних тіл у природі не буває. Хорошою моделлю такого тіла є невеликий отвір замкнутої порожнини (рис. 1).

Світло, що падає через отвір всередину порожнини, після численних відбитків буде практично повністю поглинене стінками, і отвір буде здаватися зовсім чорним. Якщо порожнина нагріта до певної температури T і всередині встановилася теплова рівновага, то власне випромінювання порожнини, що виходить через отвір, буде випромінюванням абсолютно чорного тіла. Саме таким чином у всіх експериментах дослідження теплового випромінювання моделюється абсолютно чорне тіло.

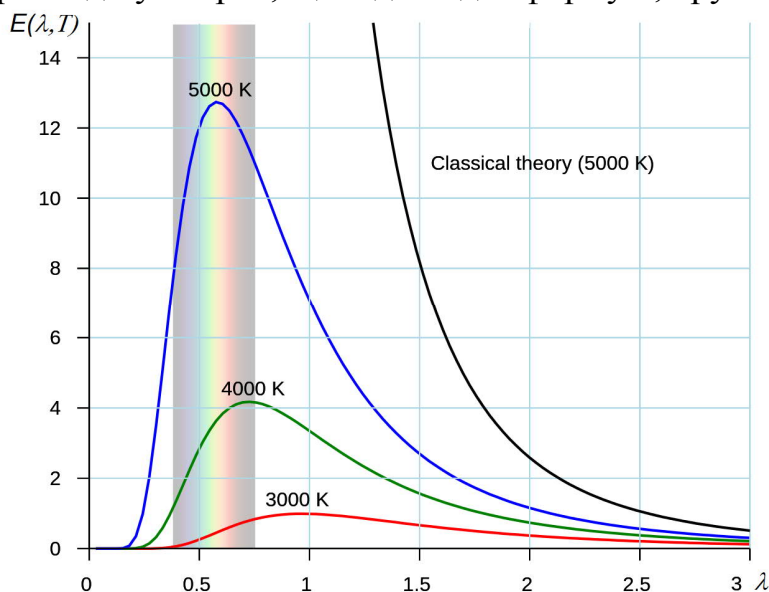
4. Відзначити, що експериментально було встановлено, що чорне нагріте тіло випромінює електромагнітні хвилі всіх частот. Але енергія випромінювання розподіляється не рівномірно; дуже довгі та дуже короткі хвилі несуть мало енергії; найбільша енергія належить хвилям певної довжини. Ця довжина хвилі залежить від температури тіла. Так для сонячного випромінювання з температурою поверхні приблизно 6000 К максимум посідає на жовто-зелену область видимого світла. Площа фігури, обмежена графіком та віссю абсцис, пропорційна повній енергії, що випромінюється тілом за одиницю часу.

5. Підкреслити, що експериментальні дослідження показали, що загальний характер графіка зі зміною температури не змінюється, але максимум кривої за меншої температури зміщується у бік менших частот або довших хвиль $\lambda = cT = \frac{c}{\nu}$, а повна енергія випромінювання (площа, обмежена графіком) зменшується.



Фізики намагалися теоретично знайти рівняння, що відповідає цьому графіку, тобто узгоджується з експериментом. Було зроблено пропозицію, що теплове електромагнітне випромінювання здійснюється електронами, що коливаються всередині атомів. Розрахунки були зроблені на основі суворого

застосування законів електродинаміки Максвелла та статичної фізики, але результат призвів до повної суперечності з досвідом. Графік кривої спектрального розподілу енергії, що відповідає формулі, круто йшов угору.



Це означало, що повна енергія, що випромінюється тілом за одиницю часу, нескінченно велика; фізично це означало, що тіло віддаючи енергію має охолоджуватися до абсолютного нуля і ніякої рівноваги між випромінюючим тілом і випромінюванням не існує, що суперечить дійсності. Теоретична та експериментальна крива розподілу енергії різко розходилися у області високих частот, що образно було названо П. Еренфестом як «ультрафіолетова катастрофа».

6. Відзначити, що розбіжності теоретичного рівняння з досвідом вказувало на існування якихось закономірностей, несумісних із представленими електродинаміками та класичної статистики.

Займаючись цією проблемою, М. Планк підібрав формулу, що відповідає експериментальній кривій. Але, щоб вивести «щасливо вгаданий закон» з теоретичних міркувань, Планку довелося зробити припущення про те, що енергія електрона в атомі може приймати не будь-які, а лише деякі дискретні значення, кратні величині $E_0 = h\nu$. При випромінюванні світла енергія електрона стрибком змінюється на величину $E_0 = h\nu$. Планк дійшов висновку, що процеси випромінювання та поглинання електромагнітної енергії нагрітим тілом відбуваються не безперервно, як це приймала класична фізика, а кінцевими порціями – *квантами*. Квант – це мінімальна порція енергії, що випромінюється або поглинається тілом. За теорією Планка, енергія кванта E прямо пропорційна частоті світла:

$$E = h\nu$$

де h – так звана *стала Планка*. $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж · с. Стала Планка – це універсальна константа, яка у квантовій фізиці відіграє ту ж роль, що й швидкість світла у СТВ.

На основі гіпотези про переривчастий характер процесів випромінювання та поглинання тілами електромагнітного випромінювання Планк отримав формулу для спектральної світності абсолютно чорного тіла. Формулу Планка зручно записувати у формі, що виражає розподіл енергії у спектрі випромінювання абсолютно чорного тіла за частотами, а не за довжинами хвиль λ .

$$\lambda = cT = c \frac{1}{\nu} = \frac{c}{\nu}, \quad E = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

$$r(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \cdot \frac{h\nu}{e^{kT} - 1}.$$

У цій формулі c – швидкість світла, h – стала Планка, k – стала Больцмана, T – абсолютна температура.

7. Підкреслити, що якщо прийняти цю гіпотезу, то треба укласти, що електрон, що коливається в атомі, може випускати і поглинати не довільну порцію енергії, а тільки ціле число елементарних порцій $E_0 = h\nu$. Отже електромагнітне випромінювання відбувається у вигляді окремих порцій, які отримали назву *світлових квантів*.

8. Звернути увагу на те, що електродинаміка Максвелла, яка правильно пояснює випромінювання електромагнітних хвиль електронами, що коливаються у дроті, виявилось непридатною до електронів в атомі. Закон квантів енергії $E_0 = h\nu$ Планка був продовженням колишньої фізики, а переворотом у ній. Наступні десятиліття все ясніше показували наскільки глибокий був цей переворот і наскільки він був необхідний. Саме за допомогою теорії квантів стало можливим розуміння атомних явищ» (М. Лауе «Історія фізики»)

9. Повторити основні найважливіші моменти матеріалу, що вивчається, зробити короткі висновки, відповісти на запитання.

Додаток

До кінця 90-х років XIX століття були виконані ретельні експериментальні вимірювання спектрального розподілу випромінювання абсолютно чорного тіла, які показали, що при кожному значенні температури T залежність $r(\lambda, T)$ має яскраво виражений максимум (рис. 2). Зі збільшенням температури максимум зміщується в область коротких довжин хвиль, причому добуток температури T на довжину хвилі λ_m , що відповідає максимуму, залишається незмінним:

$$\lambda_m T = b \quad \text{або} \quad \lambda_m = b/T.$$

Це співвідношення раніше було отримано Вином із термодинаміки. Воно виражає так званий закон усунення Вина: довжина хвилі λ_m , на яку припадає максимум енергії випромінювання абсолютно чорного тіла, обернено пропорційна абсолютній температурі T . Значення сталої Вина

$$b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м К}$$

Для температур які можна практично досягнути у лабораторних умовах максимум випромінювальної здатності $r(\lambda, T)$ лежить в інфрачервоній ділянці. Тільки при $T \geq 5000$ К максимум потрапляє у видиму область спектра. Максимум енергії випромінювання Сонця припадає приблизно на 470 нм (зелена область спектру), що відповідає температурі зовнішніх шарів Сонця близько 6200 К (якщо Сонце розглядати як абсолютно чорне тіло).

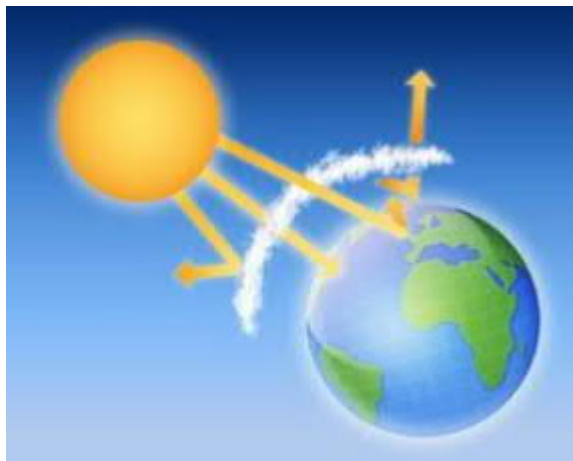
Через п'ять років А. Ейнштейн, узагальнивши ідею Планка, показав, що квантованість є загальною властивістю електромагнітного випромінювання. Згідно з ідеями Ейнштейна електромагнітне випромінювання складається з квантів, названих пізніше *фотонами*. Кожен фотон має певну енергію та імпульс.

Знання законів випромінювання та поглинання енергії тілами має важливе значення.

Теплове випромінювання Землі (інфрачервоне) поглинається атмосферою, внаслідок чого створюється сприятливий для життя тепловий режим. Таке явище прийнято називати парниковим ефектом.

Теплове випромінювання, що відіграє важливу роль у житті живих організмів поділяється на короткохвильову (від 0,3 до 3 мкм) і довгохвильову (від 5 до 100 мкм) частини. Джерелом короткохвильового випромінювання є Сонце і відкрите полум'я, а живі організми є виключно реципієнтами такого випромінювання. Довгохвильова радіація і випромінюється, і поглинається живими організмами.

Величина коефіцієнта поглинання залежить від співвідношення температур середовища і тіла, площі їх взаємодії, орієнтації цих площ, а короткохвильового випромінювання – від кольору поверхні. Так у людей білої раси поверхня шкіри відбиває близько 40% короткохвильового випромінювання, тоді як шкіра представників негроїдної раси лише 18% (швидше за все, колір шкіри негрів в еволюції не мав відношення до теплообміну). Для довгохвильового випромінювання коефіцієнт поглинання наближений до 1.



У ясний сонячний день на поверхню Землі надходить $\sim 10\%$ ультрафіолетового випромінювання, $\sim 45\%$ – видиме випромінювання, $\sim 45\%$ – інфрачервоного. Фотосинтетично активна радіація (ФАР) відповідає смузі видимого світла. ФАР використовується рослинами (фотосинтез) і становить близько 50% від сумарної енергії сонячного випромінювання (зелені рослини використовують синє та червоне, а відбивають зелене та інфрачервоне)). Потужність потоку сонячного випромінювання, що досягає земної поверхні, дорівнює 150 Вт/м^2 . Температура поверхні Сонця 6000 К , температура поверхні Землі 300 К ; кожен фотон сонячного випромінювання дає 20 теплових фотонів. Життя на Землі як упорядкований процес, засновано на використанні сонячного випромінювання.

Висновки

Матеріал цього уроку є дуже важливим тому, що він уперше знайомить учнів із поняттям кванта світла, енергії кванта. Опанувавши матеріал, учні приходять до висновку, що процеси випромінювання та поглинання електромагнітної енергії нагрітим тілом відбуваються не безперервно, як це приймала класична фізика, а кінцевими порціями – *квантами*. Квант - це мінімальна порція енергії, що випромінюється або поглинається тілом.

Розвинувши та поглибивши ідею М.Планка, Ейнштейн дійшов висновку, що світло має не тільки випромінюватись та поглинатися, а й поширюватись у вигляді окремих порцій енергії – квантів електромагнітного поля (фотонів). Він вважав, що при взаємодії з речовиною фотон поводить себе подібно до частки і передає свою енергію не речовині в цілому і навіть не атому, а лише окремим електронам.

Поняття кванта світла допоможе учням вивчення інших явищ природи, таких як фотоефект, тиск світла, хімічна дія світла, квантове розсіювання світла (ефект Комптона).

Важливість теми, на нашу думку, у тому, що квантова фізика викладається у 11 класі – на завершальному етапі вивчення фізики. Саме розділи квантової фізики формують цілісну картину світу та завершують формування світогляду учнів.

Матеріал неодноразово використовувався авторами під час проведення уроків фізики та факультативних занять з цієї теми у різні роки.

Література

1. Програма «Фізика 10-11» (рівень стандарту та профільний рівень), авторського колективу Національної академії наук України під керівництвом Локтєва В.М. Наказ МОН від 24.11.2017 №1539.
2. Савельєв І.В. Курс общей фізики. Том 3. М. : Наука, 1987. – 320 с.
3. Сущенко С.С. Викладання квантових властивостей світла у школі. Х. : Основа, 2007. – 144 с.

4. Бар'яхтар В.Г., Божинова Ф.Я. та ін. Фізика 11 кл. Академічний рівень. Профільний рівень. Х. : Видавництво «Ранок», 2011. – 320 с.
5. Фізика в школах України Науково-методичний журнал № 5–6 березень 2015 р. Збаратський Д.О. Рівняння Енштейна. Кванти світла. 11 клас. с. 65
6. Войнов О.Л., Белошاپка О.Я. До вивчення явища фотоefекту та його законів у курсі фізики в середніх навчальних закладах. Професіоналізм педагога: теоретичні й методичні аспекти. 2018. №. 7. С. 201–210.
URL: <http://pptma.dn.ua/index.php/uk/arkhiv-vipuskiv/za-2018-rik/vipusk-7-2018/685-do-vivchennya-yavishcha-fotoefektu-ta-jogo-zakoniv-u-kursifiziki-v-serednikh-navchalnikh-zakladakh>
7. Войнов О.Л., Белошاپка О.Я. Тиск світла та його особливості. Досвіди Лебедева. Збірник наукових праць фізико-математичного факультету ДДПУ 2020 №10 С.129-138
8. Войнов О.Л., Белошاپка О.Я., Лимарева Ю.М. Комптоновське розсіювання світла та його значення для розвитку квантової теорії. Збірник наукових праць фізико-математичного факультету ДДПУ 2020 №10 С.139-151.

Oleg Voinov, Oleksandr Beloshapka

Mykolajiv establishment of general secondary education I-III degrees No. 3 of Mykolajiv city council of Slavic district of Donetsk region, Ukraine;
Donbas State Pedagogical University, Slovians'k, Ukraine.

To the study of quantum theory in the course of physics in secondary educational institutions

This article deals with the birth of quantum theory, the problem of explaining thermal radiation, Planck's hypothesis, light quanta. The authors offer material on this topic that can be used in the lessons.

Keywords: *thermal radiation, absorption, absolutely black body ultraviolet catastrophe, light quanta, photon, Planck's hypothesis, quantum physics, quantum theory.*
