

Войнов О.Л., Белошанка О.Я., Лимарева Ю.М.

<sup>1</sup> старший учитель, фахівець вищої категорії, учитель фізики, астрономії та інформатики,  
Миколаївський ЗЗСО І-ІІІ ст. №3 Миколаївської міської ради Слов'янського р-ну Донецької обл.

e-mail: bytic2010@gmail.com, ORCID 0000-0002-1082-6565

<sup>2</sup> старший викладач кафедри фізики, ДВНЗ «ДДПУ»

e-mail: kafedrafiziki2018@gmail.com, ORCID 0000-0001-7448-3832

<sup>3</sup> кандидат педагогічних наук, доцент кафедри фізики, ДВНЗ «ДДПУ»

e-mail: ulialymareva23@gmail.com, ORCID 0000-0002-5828-0231

## КОМПТОНОВСЬКЕ РОЗСІЮВАННЯ СВІТЛА ТА ЙОГО ЗНАЧЕННЯ ДЛЯ РОЗВИТКУ КВАНТОВОЇ ТЕОРІЇ

У даній статті розглядається вивчення ефекту Комптона та його застосування в курсі фізики в середніх навчальних закладів. Автори пропонують матеріал з даної теми, у якому використовуються нетрадиційні методичні прийоми, що допомагають осмисленому та усвідомленому використанню цього явища. Цей матеріал можна застосовувати при проведенні уроків в 11-х класах, а також при розширенні знань з даної теми на факультативних заняттях.

**Ключові слова:** розсіювання світла, світлові кванти, фотони, фотоефект, природа світла, корпускулярно-хвильовий дуалізм.

### Вступ

Вчення про світло є одним з важливих у сучасній фізиці.

Згідно до сучасних подань, світло має подвійну корпускулярно-хвильову природу. В одних явищах світло виявляє властивості хвиль, а в інших — властивості частинок. Хвильові й квантові властивості доповнюють одна одну.

У цей час встановлено, що корпускулярно-хвильова подвійність властивостей притаманні також будь-якій елементарній частці речовини. Наприклад, виявлена дифракція електронів, нейтронів.

Корпускулярно-хвильовий дуалізм є проявом двох форм існування матерії — речовини й поля.

Важливість теми, на нашу думку, полягає в тім, що сучасна фізика викладається в 11 класі — на завершальному етапі вивчення фізики. Отже, саме розділи сучасної фізики формують в учнів цілісну картину світу й завершують формування світогляду учнів.

Серед «штрихів», що «малюють» сучасну картину світу, дуже важливим є поняття корпускулярно-хвильового дуалізму.

Про корпускулярно-хвильовий дуалізм заговорили фізики на початку ХХ ст. Як елементарні «цеглинки», з яких побудована вся матерія, розглядалися три частинки — електрон, протон і фотон.

Фотони виступали «цеглинками» електромагнітного поля, а дуалізм «примиряв» хвильову природу поля з корпускулярною: розглядаючи електромагнітне поле разом із хвильовими, використовували корпускулярні уявлення. З 1916 року А. Ейнштейн увів поняття світлових квантів, а в 1922 року квантову природу світлового випромінювання експериментально довів А. Комптон під час спостереження розсіювання рентгенівського випромінювання в речовині. На основі цього А. Ейнштейн уперше висловив гіпотезу про корпускулярно-хвильовий дуалізм.

Програма з фізики для загальноосвітньої школи містить достатній обсяг знань по оптиці, але значного вдосконалення потребує методика їх викладання, зокрема квантової оптики.

У зв'язку із цим метою даної роботи є вдосконалення методики викладання квантової оптики в 11 класах загальноосвітньої школи та розробки уроків по даній темі.

## Основна частина

*Тема. Комптоновське розсіювання світла та його значення для розвитку квантової теорії. Ефект Комптона.*

*Мета. Продовжити формування уявлень про фотон, наданих при вивченні фотоефекта. Розглянути питання про ефект Комптона, що має особливо важливе значення для доказу квантових властивостей світла.*

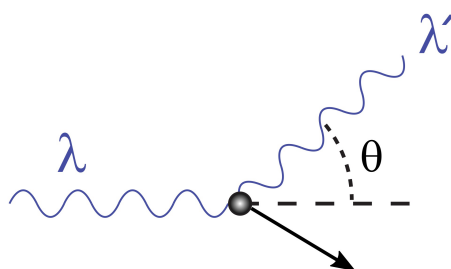
### *Повторення*

1. Повторити явище фотоефекта, пояснення фотоефекта за допомогою квантової теорії і його значення.
2. Повторити які нові уявлення про природу й властивості світла виникли при вивченні явища фотоефекта?
3. Повторити поняття світлового кванта — фотона, основні властивості фотонів, основні характеристики, що описують стан кванта світла.

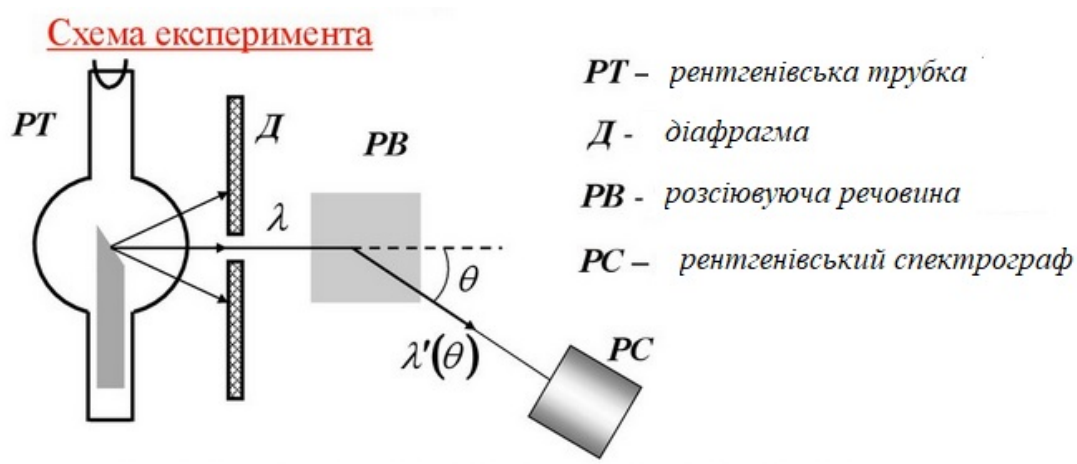
### *Вивчення нового матеріалу*

4. Познайомити учнів з явищем розсіювання світла. Відмітити, що аналіз явища фотоефекта показує: енергетичний обмін між світлом і речовиною носить квантовий характер, це й деякі інші явища приводять до виникнення гіпотези світлових квантів. Але для перетворення гіпотези в теорію її варто перевірити на практиці. Тому важливо розглянути ще один приклад взаємодії світла з речовиною — *явище розсіювання*.
5. Відмітити, що пружне розсіювання електромагнітного випромінювання на вільних або слабо зв'язаних електронах, що супроводжується збільшенням довжини хвилі, називається *ефектом Комптона*.

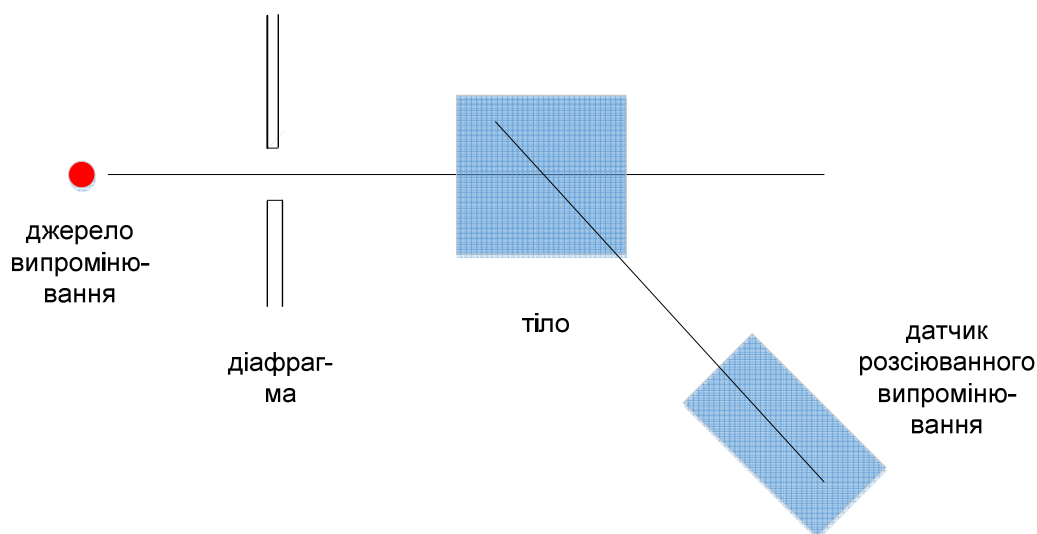
Відкритий в 1922 році американським фізиком Артуром Комптоном (Arthur Holly Compton, 1892 – 1962) при дослідженні розсіювання рентгєнівських променів у парафіні.



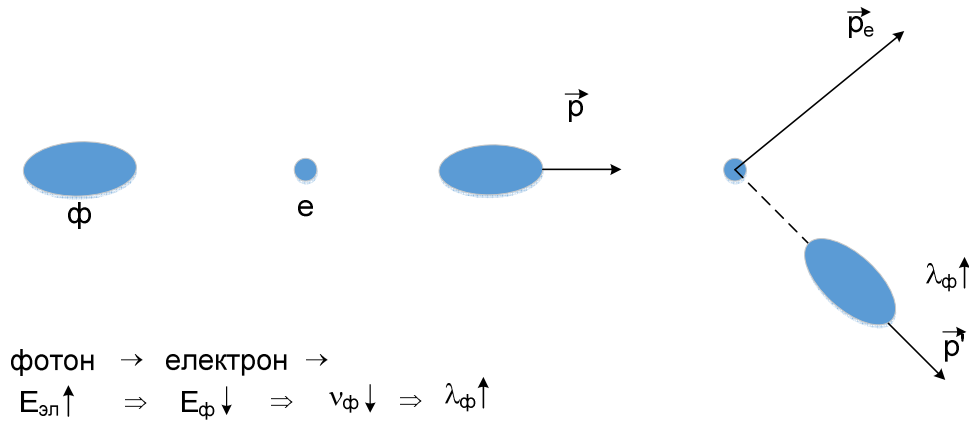
Випромінювання з довжиною хвилі  $\lambda$  має напрямок  $\lambda$  праворуч. Після взаємодії з електроном воно міняє довжину хвилі на  $\lambda'$  а напрямок на кут  $\theta'$  від початкового напрямку. Стрілкою зазначений напрямок руху електрона, у якого відбулася взаємодія з фотоном.



Схематично дослід можна зобразити в такий спосіб.

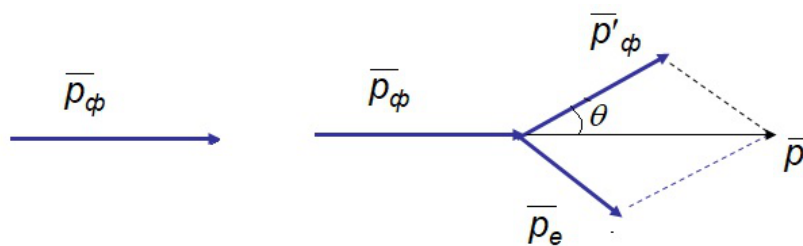


Розглянути який механізм розсіювання електромагнітних хвиль згідно хвильової теорії. Відмітити, що суть його зводиться до наступного: електромагнітна хвиля, падаючи на електрон, збуджує його змушені коливання, у результаті частинка що коливається, діючи як передавальна антена, випромінює електромагнітну хвилю, це і є розсіюване випромінювання.



Відповідно до хвильової теорії, частота розсіюваного випромінювання повинна збігатися із частотою коливання електрона й, отже, із частотою падаючої хвилі. Цей висновок хвильової теорії підтверджується багатьма довідченими фактами. Наприклад, розглядаючи своє зображення в дзеркалі ми не помічаємо зміну кольору очей або одягу. Інший приклад, радіохвилі, перш ніж потрапити в приймач, нерідко зазнають багаторазових відбивань від іоносфери, поверхні Землі й т. ін., але зміни довжини хвилі при цьому не спостерігається.

Однак, А. Комптон в 1921 – 1922 р.р. виявив, що при розсіюванні на вільних електронах, довжина хвилі рентгенівського випромінювання збільшується. Оскільки хвильова теорія пояснити цього явища не могла, вчений звернувся до ідей А. Ейнштейна про квантові властивості випромінювання й вирішив з'ясувати, що було б, якби кожний квант енергії рентгенівських променів був зосереджений в окремій частинці та діяв би як ціле на окремий електрон. Як модель взаємодії фотона з електроном Комптон розглянув зіткнення двох більярдних куль.



Комптон і іншим дослідникам вдалося одночасно з визначенням енергії й напрямку руху розсіяного фотона зафіксувати електрони віддачі, а також виміряти енергію й імпульс, що отримав електрон. Результати цих робіт дозволили зробити висновок про те, що в кожному акті розсіювання строго виконуються закони збереження енергії й імпульсу в релятивістській формі. Згідно із цими законами вони одержали формули для розрахунку зміни довжини хвилі розсіяного випромінювання.

Ефект Комптона можна пояснити, розглядаючи розсіювання як процес *пружного* зіткнення рентгенівських фотонів із практично вільними частинками.

У процесі зіткнення фотон передає електрону частину енергії та імпульсу. При пружному розсіюванні виконується як закон збереження енергії, так і закон збереження імпульсу.

$$p = mc = \frac{h\nu}{c^2} \cdot c = \frac{h\nu}{c} \quad p' = \frac{h\nu'}{c} \quad p_e = m\vartheta$$

$$E_\Phi = E_{eл} + E'_\Phi \quad h\nu = h\nu' + \frac{m\vartheta^2}{2} \quad (1)$$

$$\vec{p} = \vec{p}' + m\vec{\vartheta} \quad p_e^2 = p^2 + p'^2 - 2 \cdot p \cdot p' \cdot \cos \theta$$

$$(m\vartheta)^2 = \left(\frac{h\nu}{c}\right)^2 + \left(\frac{h\nu'}{c}\right)^2 - 2 \cdot \left(\frac{h\nu}{c}\right) \cdot \left(\frac{h\nu'}{c}\right) \cdot \cos \theta \quad (2)$$

Вирішуючи спільно рівняння (1) і (2) можна одержати формулу для розрахунку зміни довжини хвилі розсіяного фотона.

$$\nu - \nu' = \frac{h}{mc} \cdot \frac{\nu \cdot \nu'}{c} (1 - \cos \theta)$$

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{mc} \cdot (1 - \cos \theta) = \frac{h}{mc} \cdot 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} = 2 \cdot \frac{h}{mc} \cdot \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

$\lambda_e = \frac{h}{mc} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 3 \cdot 10^8} = 2,42 \cdot 10^{-12} \text{ м}$  — комптоновська довжина хвилі для електрона.

З дослідів з розсіювання рентгенівських променів випливає, що елементарна порція електромагнітного випромінювання (фотон) у процесі взаємодії з речовиною неподільна, що фотон із частотою  $\nu$  завжди має енергію  $h\nu$  й імпульс  $\frac{h\nu}{c}$ .

Ефект Комптона можна вважати прямим доказом існування фотонів.

*Ефект Комптона не може спостерігатися у видимій області спектра, оскільки енергія фотонів видимого спектра порівнянна з енергією зв'язку електрона з атомом.*

Для спостереження ефекту Комптона необхідне випромінювання дуже високих енергій — рентгенівське або гамма-випромінювання. Ефект Комптона — релятивістський ефект.

Ефект Комптона не вкладається в рамки хвильової теорії, відповідно до якої довжина хвилі при розсіюванні не повинна змінюватися під дією поля світлової хвилі. Виявивши це явище, Комптон пожартував: «Це також дивно, як, якби я одяг зелений светр, а в дзеркалі побачив себе в червоному!»

З формули Комптона випливає:

- зі збільшенням кута розсіювання зростає різниця значень довжин хвиль  $\Delta\lambda$ , що падають на речовину і тих, що нею розсіюються;
- зі збільшенням кута розсіювання частота розсіюваного випромінювання зменшується в порівнянні із частотою падаючої хвилі;
- максимальна зміна різниці спостерігається при зворотному розсіюванні  $\theta = 180^\circ$ ;  $\cos\theta = -1$
- у прямому напрямку розсіюване випромінювання відсутнє  $\Delta\lambda = 0$ .

*Закріплення матеріалу*

*Основні закономірності ефекту Комптона:*

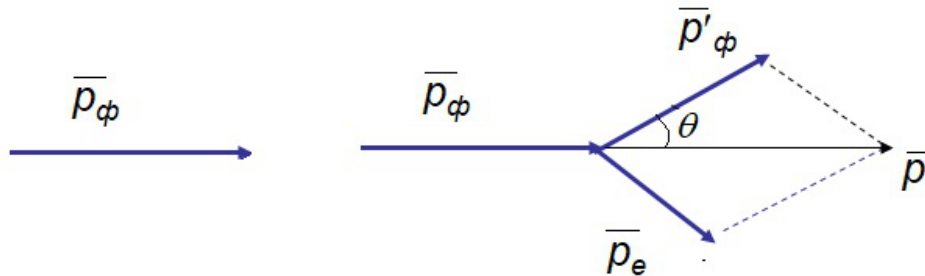
1. ефект Комптона — релятивістський ефект;
2. ефект Комптона неможливо спостерігати у видимій області спектра. Ефект Комптона можливий тільки при розсіюванні речовиною рентгенівського або гама-випромінювання;
3. як ефект Комптона, так і фотоефект зумовлені взаємодією фотонів з електронами. У першому випадку фотон розсіюється, у другому — поглинається. Розсіювання відбувається при взаємодії фотона з вільними електронами, а поглинання (фотоефект) — зі зв'язаними.
4. поглинання фотона вільним електроном неможливо, тому що цей процес суперечив би законам збереження енергії й імпульсу.

За можливістю доцільно розглянути розв'язання декількох завдань на застосування ефекту Комптона, а також відеофрагмент або презентацію з вивчення цього явища.

**Завдання 1.** *Визначити максимальну зміну довжини хвилі при комптонівському розсіюванні: 1) на вільних електронах; 2) на вільних протонах.*

### Розв'язання.

У процесі зіткнення фотон передає електрону частину енергії й імпульсу. При пружному розсіюванні виконується як закон збереження енергії, так і закон збереження імпульсу.



Тому можемо записати

$$(m\vartheta)^2 = \left(\frac{h\nu}{c}\right)^2 + \left(\frac{h\nu'}{c}\right)^2 - 2 \cdot \left(\frac{h\nu}{c}\right) \cdot \left(\frac{h\nu'}{c}\right) \cdot \cos \theta$$

$$\nu - \nu' = \frac{h}{mc} \cdot \frac{\nu \cdot \nu'}{c} (1 - \cos \theta)$$

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{mc} \cdot (1 - \cos \theta) = \frac{h}{mc} \cdot 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} = 2 \cdot \frac{h}{mc} \cdot \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

$$\Delta\lambda_{\max} = 2 \cdot \frac{h}{mc} \cdot \sin^2 \frac{\theta}{2} = 2 \cdot \frac{h}{mc} \cdot 1^2 = 2 \cdot \frac{h}{mc}$$

Для електрона  $m = 9,11 \cdot 10^{-31}$  кг

$$\Delta\lambda_{\max 1} = 2 \cdot \frac{h}{mc} = 2 \cdot \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}}{3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}} = 4,85 \cdot 10^{-12} \text{ м} = 4,85 \text{ нм}$$

Для протона  $m = 1,672 \cdot 10^{-27}$  кг

$$\Delta\lambda_{\max 2} = 2 \cdot \frac{h}{mc} = 2 \cdot \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}}{3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 1,672 \cdot 10^{-27} \text{ кг}} = 2,643 \cdot 10^{-15} \text{ м} = 2,64 \text{ фм}$$

Відповідь.  $\Delta\lambda_{\max 1} = 4,85 \text{ нм}$ ,  $\Delta\lambda_{\max 2} = 2,64 \text{ фм}$

**Завдання 2.** Визначити кут  $\theta$  розсіювання фотона, що зазнав зіткнення з вільним електроном, якщо зміна довжини хвилі  $\Delta\lambda$  при розсіюванні дорівнює  $3,62$  нм.

Дано

$$m = m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$\Delta\lambda = 3,62 \text{ нм} = 3,62 \cdot 10^{-12} \text{ м}$$

Знайти

$\theta$  -?

Застосуємо формулу для розрахунку зміни довжини хвилі при пружному розсіянні фотона, що взаємодіє з вільним електроном.

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{mc} \cdot (1 - \cos \theta)$$

$$\Delta\lambda = \frac{h}{mc} - \frac{h}{mc} \cdot \cos \theta \quad \frac{h}{mc} \cdot \cos \theta = \frac{h}{mc} - \Delta\lambda \quad \cos \theta = 1 - \Delta\lambda \cdot \frac{mc}{h}$$

$$\theta = \arccos \left( 1 - \Delta\lambda \cdot \frac{mc}{h} \right)$$

$$\theta = \arccos \left( 1 - 3,62 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}}{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}} \right)$$

$$\theta = \arccos(1 - 1,492) \approx \arccos(-0,492) \approx 119,5^\circ \approx 120^\circ$$

Відповідь. Кут розсіювання фотона приблизно  $\theta \approx 120^\circ$

**Завдання 3.** Фотон з енергією  $\varepsilon = 0,4$  МеВ розсіявся під кутом  $\theta = 90^\circ$  на вільному електроні. Визначити енергію  $\varepsilon'$  розсіяного фотона й кінетичну енергію  $T$  електрона віддачі.

Дано

фотон

$$\varepsilon = 0,4 \text{ МеВ}$$

$$m = m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$\theta = 90^\circ$$

Знайти

$\varepsilon'$  -?

$T$  -?

Застосуємо формулу для розрахунку зміни довжини хвилі при пружному розсіянні фотона, що взаємодіє з вільним електроном.

$$\Delta\lambda = \frac{h}{mc} \cdot (1 - \cos \theta)$$

де  $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$  — зміни довжини хвилі фотона при розсіюванні

За законом збереження енергії

$$E_\phi = E_{\text{ел}} + E'_\phi$$



$$\varepsilon = T + \varepsilon' \quad T = \varepsilon - \varepsilon' \quad \varepsilon = h\nu = h\frac{c}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda} \quad \varepsilon' = \frac{hc}{\lambda'}$$

$$T = \varepsilon - \varepsilon' = \frac{hc}{\lambda} - \frac{hc}{\lambda'} = hc \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda'} \right) = hc \frac{\lambda' - \lambda}{\lambda\lambda'} = \frac{hc\Delta\lambda}{\lambda\lambda'} \quad \lambda' = \lambda + \Delta\lambda$$

$$T = \frac{hc\Delta\lambda}{\lambda\lambda'} = \frac{hc \cdot \frac{h}{mc} \cdot (1 - \cos\theta)}{\lambda \cdot (\lambda + \Delta\lambda)} = \frac{\frac{hc}{\lambda} \cdot \frac{h}{mc} \cdot (1 - \cos\theta)}{\lambda + \Delta\lambda} = \frac{\varepsilon \cdot \frac{h}{mc} \cdot (1 - \cos\theta)}{\lambda + \frac{h}{mc} \cdot (1 - \cos\theta)}$$

$$T = \frac{\varepsilon \cdot \frac{h}{mc} \cdot (1 - \cos\theta)}{\lambda + \frac{h}{mc} \cdot (1 - \cos\theta)} = \frac{\varepsilon \cdot \frac{h}{mc} \cdot (1 - \cos\theta)}{\frac{h}{mc} \cdot (1 - \cos\theta) + \frac{h}{mc} \cdot \frac{mc}{h} \lambda}$$

$$T = \frac{\varepsilon \cdot \frac{h}{mc} \cdot (1 - \cos\theta)}{\frac{h}{mc} \cdot (1 - \cos\theta) + \frac{h}{mc} \cdot \frac{mc}{h} \lambda} = \frac{\varepsilon \cdot (1 - \cos\theta)}{\frac{h}{mc} \cdot \left( (1 - \cos\theta) + \frac{mc}{h} \lambda \right)}$$

$$T = \frac{\varepsilon \cdot (1 - \cos\theta)}{\frac{h}{mc} \cdot \left( (1 - \cos\theta) + \frac{mc}{h} \lambda \right)} = \frac{\varepsilon \cdot (1 - \cos\theta)}{mc \cdot \left( \frac{1}{mc} (1 - \cos\theta) + \frac{1}{h} \lambda \right)}$$

$$T = \frac{\varepsilon \cdot \frac{h}{mc} \cdot (1 - \cos\theta)}{\frac{h}{mc} \cdot \left( (1 - \cos\theta) + \frac{mc}{h} \lambda \right)} = \frac{\varepsilon \cdot (1 - \cos\theta)}{\left( (1 - \cos\theta) + \frac{mc}{h} \lambda \right)}$$

$$T = \frac{\varepsilon \cdot (1 - \cos\theta)}{\left( (1 - \cos\theta) + \frac{mc}{h} \lambda \right)} = \frac{\varepsilon \cdot (1 - \cos\theta)}{mc \cdot \left( \frac{1}{mc} (1 - \cos\theta) + \frac{1}{h} \frac{hc}{\varepsilon} \right)}$$

$$T = \frac{\varepsilon \cdot (1 - \cos\theta)}{mc \cdot \left( \frac{c}{\varepsilon} + \frac{1}{mc} (1 - \cos\theta) \right)}$$

Одержали вираз, що дозволяє визначити кінетичну енергію  $T$  електрона віддачі

$$\varepsilon = 0,4 \text{ MeV} = 0,4 \cdot 10^6 \text{ eV} = 0,4 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 0,64 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$$

$$\begin{aligned}
T &= \frac{\varepsilon \cdot (1 - \cos \theta)}{mc \cdot \left( \frac{c}{\varepsilon} + \frac{1}{mc} (1 - \cos \theta) \right)} = \\
&= \frac{0,64 \cdot 10^{-13} \cdot (1 - 0)}{9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot \left( \frac{3 \cdot 10^8}{0,64 \cdot 10^{-13}} + \frac{1}{9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 3 \cdot 10^8} (1 - 0) \right)} \\
T &= \frac{0,64 \cdot 10^{-13}}{2,733 \cdot 10^{-22} \cdot \left( \frac{3 \cdot 10^8}{0,64 \cdot 10^{-13}} + \frac{1}{2,733 \cdot 10^{-22}} \right)} \\
T &= \frac{0,64 \cdot 10^{-13}}{2,733 \cdot 10^{-22} \cdot (4,687 \cdot 10^{21} + 3,659 \cdot 10^{21})} \\
T &= \frac{0,64 \cdot 10^{-13}}{2,733 \cdot 10^{-22} \cdot 8,346 \cdot 10^{21}} = \frac{0,64 \cdot 10^{-13}}{2,2809} = 0,2806 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} \\
T &= 0,2806 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} = 0,2806 \cdot 10^{-13} \cdot \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19}} \text{ eV} = \\
&= \frac{0,2806 \cdot 10^{-13}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \text{ MeV} = 0,1753 \text{ MeV} \\
T &= 0,1753 \text{ MeV} \approx 0,18 \text{ MeV}
\end{aligned}$$

Визначимо енергію  $\varepsilon'$  розсіяного фотона  $\varepsilon = T + \varepsilon' \Rightarrow \varepsilon' = \varepsilon - T$

$$\varepsilon' = \varepsilon - T = 0,40 \text{ MeV} - 0,18 \text{ MeV} = 0,22 \text{ MeV}$$

Відповідь. Кінетична енергія електрона віддачі  $T = 0,1753 \text{ MeV} \approx 0,18 \text{ MeV}$  й енергія розсіяного фотона  $\varepsilon' \approx 0,22 \text{ MeV}$

**Завдання 4.** Визначити імпульс  $p$  електрона віддачі при ефекті Комптона, якщо фотон з енергією, що дорівнює енергії спокою електрона, був розсіяний на кут  $\theta = 180^\circ$ .

Дано  
 фотон  
 $\varepsilon = E_{0el} = E_0$   
 $m = m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$   
 $\theta = 90^\circ$   
 Знайти  
 $p_{el} - ?$

Застосуємо формулу для розрахунку зміни довжини хвилі при пружному розсіянні фотона, що взаємодіє з вільним електронном.

$$\Delta\lambda = \frac{h}{mc} \cdot (1 - \cos \theta)$$

де  $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$  — зміни довжини хвилі фотона при розсіюванні

За законом збереження енергії

$$E_{\phi} = E_{e\lambda} + E'_{\phi}$$

За умовою завдання

$$E_0 = E_{0e\lambda} = m_e c^2 = m c^2,$$

де  $m$  — маса спокою електрона віддачі

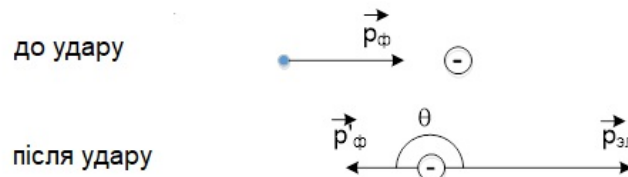
$$E_{\phi} = \varepsilon = h\nu = h \frac{c}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda} \quad E_{\phi} = E_0 \quad \frac{hc}{\lambda} = m c^2 \quad \lambda = \frac{h}{m c}$$

Після розсіюванні фотона, взаємодіючого з вільним електроном, одержимо

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda \quad \lambda' = \lambda + \Delta\lambda \quad \Delta\lambda = \frac{h}{m c} \cdot (1 - \cos\theta)$$

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m c} \cdot (1 - \cos\theta) = \frac{h}{m c} \cdot (1 - \cos 180^\circ) = 2 \cdot \frac{h}{m c}$$

Застосуємо закон збереження імпульсу при пружному розсіюванні фотона після взаємодії з вільним електроном, вважаючи, що  $\theta = 180^\circ$ , тобто після взаємодії з електроном фотон відлетів у протилежному напрямку.



$$\vec{p}_{\phi} = \vec{p}'_{\phi} + \vec{p}_{e\lambda} \quad p_{\phi} = -p'_{\phi} + p_{e\lambda}$$

$$p_{\phi} = -p'_{\phi} + p_{e\lambda} \quad p_{e\lambda} = p_{\phi} + p'_{\phi}$$

$$p_{\phi} = \frac{h}{\lambda} \quad p'_{\phi} = \frac{h}{\lambda'} \quad \text{з попередніх міркувань } \lambda = \frac{h}{m c} \text{ і } \lambda' = \frac{3h}{m c}$$

$$\text{Тоді одержимо } p_{e\lambda} = p_{\phi} + p'_{\phi} = \frac{h}{\lambda} + \frac{h}{\lambda'} = h \cdot \frac{\lambda' + \lambda}{\lambda \cdot \lambda'}$$

$$p_{e\lambda} = h \cdot \frac{\lambda' + \lambda}{\lambda \cdot \lambda'} = h \cdot \frac{\frac{3h}{m c} + \frac{h}{m c}}{\frac{h}{m c} \cdot \frac{3h}{m c}} = \frac{h^2 \cdot (3 + 1)}{\frac{h^2}{m c} \cdot \frac{h}{m c}} = \frac{4}{3} = \frac{4}{3} \cdot m c$$

$$\text{Одержали } p_{e\lambda} = \frac{4}{3} \cdot m c = \frac{4}{3} \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 3 \cdot 10^8 = 3,64 \cdot 10^{-22} \left( \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}} \right)$$

$$\text{Відповідь. Імпульс електрона віддачі } p_{e\lambda} = \frac{4}{3} \cdot m c = 3,64 \cdot 10^{-22} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$$

## Висновки

Удосконалювання методики викладання квантової оптики сприяє рішення низки завдань, серед яких головними є: поглиблення знань учнів, розвиток уявлень про роль оптики в системі знань про природу електромагнітного випромінювання.

Важливість теми, полягає в тім, що сучасна фізика, що викладається в 11 класі на завершальному етапі вивчення фізики, і саме розділи сучасної фізики формують в учнів загальну картину світу й завершують формування світогляду учнів.

Методи квантової фізики широко використовують у фізиці високих енергій, квантовій електроніці, фізиці твердого тіла, сучасній хімії. Квантова фізика є більш високим рівнем пізнання в порівнянні із класичною фізикою. Без вивчення основ квантової фізики уявлення про будову й властивості навколишнього світу будуть неповними й неадекватними сучасному науковому знанню.

Матеріал цієї теми сприяє активізації пізнавальної й розумової діяльності учнів, підвищує їхній інтерес і успішність у навчанні, сприяє свідомому вибору майбутньої професії.

Матеріал неодноразово використовувався авторами при проведенні уроків фізики й занять факультативу з розглянутої теми в різні роки.

## Література

1. Програма «Фізика й Астрономія 10-11» (рівень стандарту та профільний рівень), авторського колективу Національної академії педагогічних наук під керівництвом Ляшенка О.І. Наказ МОН від 24.11.2017 № 1539
2. Програма «Фізика 10-11» (рівень стандарту та профільний рівень), авторського колективу Національної академії наук України під керівництвом Локтева В.М. Наказ МОН від 24.11.2017 № 1539
3. *Джеммер М.* Эволюция понятий квантовой механики. М. : Наука, 1985. 384 с.
4. Физика микромира: Маленькая энциклопедия. М. : Советская энциклопедия, 1980. 528 с.
5. *Тарасов Л.В.* Современная физика в средней школе. М. : Просвещение, 1990.
6. *Яровский Б.М.* Основные вопросы современного школьного курса физики. М. : Просвещение, 1990.
7. *Иродов И.Е.* Квантовая физика. Основные законы. Учебное пособие. М. : Бинум. Лаборатория знаний, 2014. 256 с.

8. *Савельев И.В.* Курс общей физики. В 3 томах. Том 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. М. : Лань, 2016. 308 с.
9. *Compton A.* A Quantum Theory of the Scattering of X-rays by Light Elements, *Physical Review*, 21, 483 (1923).
10. *John E. Carlstrom, Gilbert P. Holder, and Erik D. Reese,* Cosmology with the Sunyaev-Zel'dovich Effect, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 40, 643 (2002).
11. *Войнов О.Л., Белошапка О.Я.* До вивчення явища фотоефекту 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-kursi-fiziki-v-serednikh-navchalnikh-zakladakh>
12. *Шурыгина Л.С.* Об изучении эффекта Комптона. *Физика в школе*. 1987. №2. С. 32–35.

---

### **Voinov Oleg, Beloshapka Alexander, Lymareva Yuliya**

Donbas State Pedagogical University, Sloviansk, Ukraine;

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, Sloviansk, Ukraine.

### **Compton diffusion of light and its value for the development of quantum theory**

This article discusses the study of the Compton effect and its application to a physics course in secondary schools. The authors offer material on this topic, which uses unconventional teaching methods to help comprehend and consciously apply this phenomenon. This material can be used when conducting classes in 11th grades, as well as expanding knowledge on this topic in elective classes.

**Keywords:** *light scattering, light quanta, photons, photoelectric effect, nature of light, wave-particle duality.*