

¹ 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

² старший викладач кафедри фізики, ДВНЗ «ДДПУ»

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

ТИСК СВІТЛА ТА ЙОГО ОСОБЛИВОСТІ. ДОСВІДИ ЛЕБЕДЄВА

Стаття розглядає вивчення тиску світла і його застосування в курсі фізики в закладах загальної середньої освіти. Автори пропонують матеріал з даної теми, в якому застосовується 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: тиск 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 інші — властивості частинок. Хвильові й квантові властивості доповнюють один одного.

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 корпускулярної: розглядаючи електромагнітне поле разом із хвильовими, використовували корпускулярні уявлення.

З 1916 року А. Ейнштейн увів поняття світлових квантів, а в 1922 р. 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 квантовій 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. Тиск світла та його особливості. Досвіди Лебедева.

Мета. Розглянути тиск світла і його особливості. Продовжити формування уявлень про фотон, наданих при вивченні фотоефекта.

1. Повторити фотоефект, закони фотоефекта, рівняння Ейнштейна для фотоефекта, умови виникнення зовнішнього фотоефекта.

2. Повторити пояснення фотоефекта за допомогою квантової теорії світла.

3. Повторити поняття фотона — як часток електромагнітного випромінювання.

4. Основні властивості фотона.

а) є часткою електромагнітного поля,

б) рухається зі швидкістю світла;

в) існує тільки в русі;

г) не має маси спокою;

д) фотон не можна зупинити, він або рухається або не існує, при спробі зупинити він поглинається й передає свою енергію.

5. Розглянути завдання з застосуванням законів фотоефекта; самостійна робота з карток із книги «Мартынов И.М., Хозяинова Э.Н., Буров В.А. Дидактический материал по физике. 10 класс. Пособие для учителей. М.: Просвещение, 1980. 62 с.»

6. Розглянути з усіма учнями завдання на закріплення квантових властивостей світла з посібника по фізиці для підготовчих відділень.

Енергія фотона дорівнює кінетичній енергії електрона, що мав початкову швидкість 10^6 м/с і прискореного електричним полем на ділянці з різницею потенціалів. Знайти довжину хвилі фотона.

Дано

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

$$E_{\text{ф}} = E_{\text{эл}}$$

$$v_0 = 10^6 \text{ м/с}$$

$$U = 4 \text{ В}$$

Знайти

λ - ?

Розв'язання

$$E_{\text{ф}} = h\nu \quad \lambda = \frac{c}{\nu} \quad E_{\text{ф}} = h \frac{c}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{hc}{E_{\text{ф}}} = \frac{hc}{E_{\text{эл}}} \quad E_{\text{эл}} = E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2}$$

$$A_{\text{эл}} = \Delta E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}$$

$$A_{\text{эл}} = qU = e \cdot U \quad eU = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}$$

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{mv_0^2}{2} + eU$$

$$\lambda = \frac{hc}{\frac{mv_0^2}{2} + eU} = \frac{2hc}{mv_0^2 + 2eU} \approx \dots \approx 1,8 \cdot 10^{-7} \text{ (м)}$$

7. Основний постулат корпускулярної теорії електромагнітного випромінювання звучить так: електромагнітне випромінювання (і зокрема світло) — це потік часток, названих фотонами. Фотони поширюються у вакуумі зі швидкістю, рівної граничній швидкості поширення взаємодії, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, маса та енергія спокою будь-якого фотона дорівнюють нулю, енергія фотона E пов'язана з частотою електромагнітного випромінювання ν і довжиною хвилі λ формулою

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}. \quad (1)$$

Зверніть увагу: формула (1) пов'язує корпускулярну характеристику електромагнітного випромінювання, енергію фотона, із хвильовими характеристиками — частотою й довжиною хвилі. Вона являє собою місток між корпускулярною й хвильовою теоріями. Існування цього містка неминуче, тому що й фотон, і електромагнітна хвиля — це всього-на-всього дві моделі того самого реально існуючого об'єкта — електромагнітного випромінювання.

Будь-яка частка, що рухається (корпускула) має імпульс, причому відповідно до теорії відносності, енергія частки E та її імпульс p зв'язані формулою

$$E = \sqrt{E_0^2 + (cp)^2}, \quad (2)$$

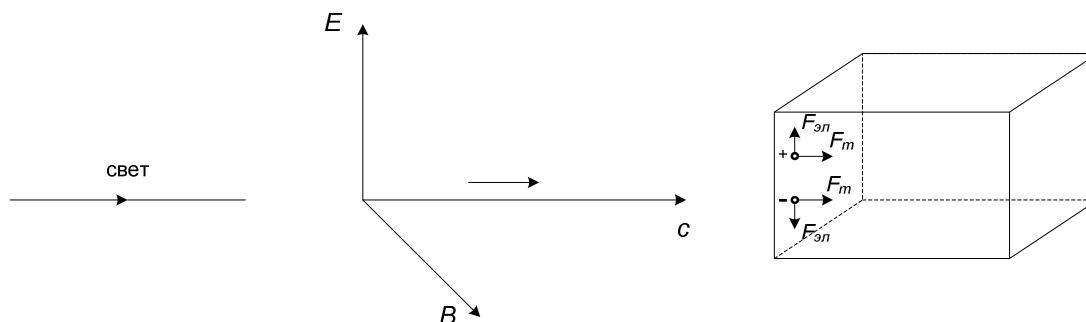
де E_0 — енергія спокою частки. Тому що енергія спокою фотона дорівнює нулю, то з (1) і (2) випливають дві дуже важливі формули:

$$E = c \cdot p, \quad p = \frac{h}{\lambda}.$$

8. Таким чином, існування світлового тиску з'явилося важливим підтвердженням електромагнітної природи світла. Воно також є одночасно й підтвердженням квантових властивостей світла, зокрема, того факту, що фотони мають імпульс і можуть здійснювати тиск на перешкоду.

9. Повторити магнітне поле, дія магнітного поля на заряд, що рухається, сила Лоренца, визначення напрямку сили Лоренца за допомогою правила лівої руки.

10. Відзначити, що якщо вважати, що світло має електромагнітну природу, то можна показати, що на електрони, що рухаються в магнітному полі електромагнітної хвилі, діє сила Лоренца, спрямована убік поширення хвилі. Ця сила повинна тиснути на перешкоду. Тому світло повинен натискати на предмети, на які він падає.

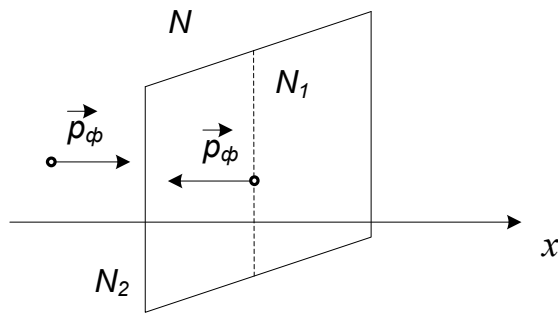


Існування світлового тиску було теоретично обґрунтоване Д. Максвеллом в 1864 році й експериментально було визначено П. Н. Лебедєвим в 1900 році.

Тиск електромагнітного випромінювання, тиск світла — це дія (тиск), цього випромінювання, що падає на поверхню тіла.

11. Показати формули й способи розрахунку тиску, що робить світло на різні тіла. Оцінити величину світлового тиску.

Позначимо: N — число падаючих фотонів; N_1 — число поглинутих тілом фотонів; N_2 — число відбитих фотонів; $\rho = N_2/N_1$ — коефіцієнт відбиття світла.



Дзеркальна поверхня

$$\Delta p = p_2 - p_1 = -p_\phi - p_\phi = -2 \cdot p_\phi = -2 mc$$

$$\Delta p_{cm1} = 2 p_\phi = 2 mc = 2 \frac{h\nu}{c^2} c = 2 \frac{h\nu}{c}$$

$$p = \frac{F}{S} = \frac{ma}{S} = \frac{m \Delta v}{S \Delta t} = \frac{\Delta p_{cm}}{S \Delta t} = \frac{2 N mc}{S \Delta t}$$

$$\Delta p_\phi = \Delta p_{нозл} + \Delta p_{опр} = N_1 p_\phi + N_2 2 p_\phi = p_\phi (N_1 + 2 N_2) = p_\phi (N_1 + N_2 + N_2) =$$

$$= p_\phi (N + N_2) = p_\phi N \left(1 + \frac{N_2}{N}\right) = p_\phi N (1 + \rho) = N mc (1 + \rho) = \frac{N h\nu}{c} (1 + \rho)$$

$$p = \frac{F}{S} = \frac{\Delta p_{cm}}{S \Delta t} = \frac{N p_\phi}{S \Delta t} = \frac{N h\nu}{S \Delta t \cdot c} (1 + \rho) = \frac{N E_1}{S \Delta t \cdot c} (1 + \rho) = \frac{\Delta E}{S \Delta t \cdot c} (1 + \rho) = \frac{I}{c} (1 + \rho)$$

$$p = \frac{I}{c} (1 + \rho),$$

де $I = \frac{\Delta E}{S \Delta t}$ — інтенсивність світла (випромінювання);

ρ — коефіцієнт відбиття світла,

$\rho = 1$ — повне відбиття світла,

$\rho = 0$ — повне поглинання світла;

$p = \frac{I}{c} (1 + \rho)$ — формула для визначення величини тиску світла (електромагнітного випромінювання) на перешкоду, перпендикулярне йому.

Квантова теорія світла пояснює світловий тиск як результат передачі фотонами свого імпульсу атомам або молекулам речовини.

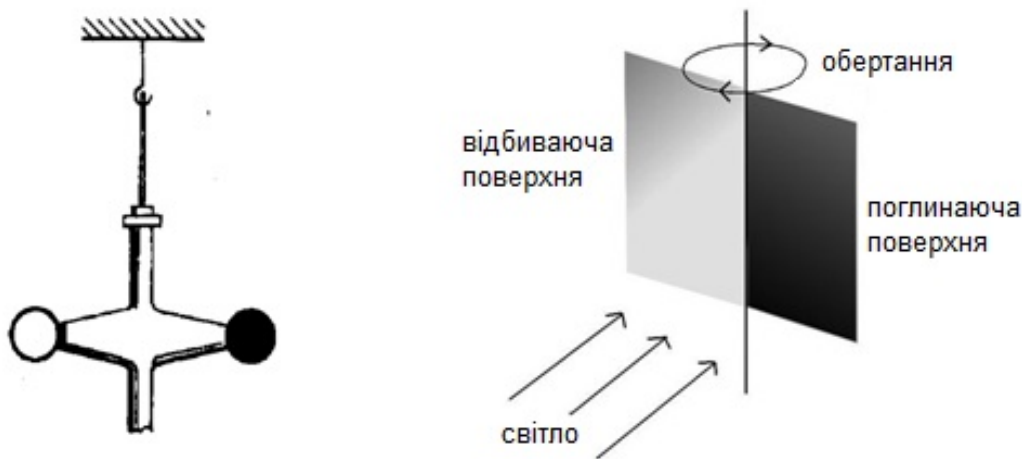
12. Визначили, що величина світлового тиску у звичайних умовах дуже мала $p \approx 4,8 \cdot 10^{-8}$ Н/м². Однак у надрах зірок при температурі кілька десятків мільйонів Кельвін тиск електромагнітного випромінювання досягає величезних значень. Сили світлового тиску поряд із гравітаційними силами відіграють істотну роль у внутрізоряних процесах і інших астрофізичних явищах.

Відзначити, що утворення кометних хвостів поблизу Сонця пояснюється в такий спосіб. Розміри малих часток комети такі, що дія світла й корпускулярного потоку від Сонця на ці частки («сонячний вітер») перевершує дію тяжіння. Внаслідок цього хвост комет завжди спрямовані у бік, протилежний Сонцю, і їхня довжина не скрізь однакова.

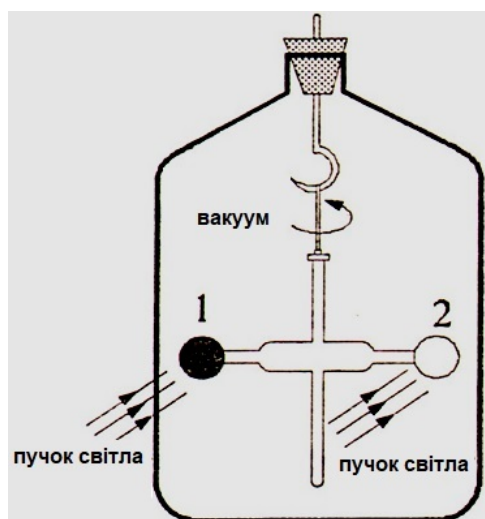
13. Розглянути досвіди Лебедева по виявленню й виміру світлового тиску на тверді тіла. Відзначити труднощі здійснення й унікальність цих досвідів.

Труднощі при проведенні досвідів:

- а) неоднакове нагрівання крилець;
- б) неможливість створити глибокий вакуум;
- в) дуже мала величина світлового тиску.



Освітлена поверхня нагрівалася більше, ніж неосвітлена й зміна імпульсу молекул, відбитих від більше нагрітої поверхні, була більше, ніж при відбитті від менш нагрітої поверхні. У такий спосіб крильце одержувало додатковий імпульс, спрямований у той же бік, що й світловий тиск. На рух крилець сильно впливають також і конвекційні потоки, що виникають внаслідок неоднакового нагрівання крилець і стінок посудини. Ці труднощі були блискуче переборені. Крильця робилися настільки тонкими, що температура обох поверхонь була практично однаковою (товщина їх становила 0,1–0,01 мм)



Щоб зменшити конвекційні потоки, Лебедев брав дуже велику посудину й направляв пучки світла на крильця те з одного, то з іншої боку. Таким чином, сили, що діють на крильця, врівноважувалися.

Для збільшення кута закручування нитки було використано явища резонансу — періодично переривалося освітлення. Пізніше П.Н. Лебедеву вдалося здійснити ще більш тонкий експеримент — виміряти світловий тиск на газу.

Лорд Кельвін: «Ви, можливо знаєте, що я все життя воював з Максвеллом, не визнаючи його світлового тиску, і от ваш Лебедев змусив мене здатися перед його дослідками».

Поява квантової теорії світла дозволило більш просто пояснити причину тиску світла. Фотони мають імпульс. При поглинанні їх тілом вони передають йому свій імпульс.

За виконання серії експериментів з визначення світлового тиску Петро Миколайович Лебедев одержав державну премію з фізики.

14. Для закріплення матеріалу, можливо показати навчальний фільм «Тиск світла».

15. Розібрати рішення якісних завдань на закріплення механізму світлового тиску: завдання №1601(Д) і 1602(Д).

16. Повторити основні, найбільш важкі моменти досліджуваного матеріалу, зробити короткі висновки, відповісти на питання.

Завдання. На поверхню тіла площею 1 м^2 падає за 1 с 10^5 фотонів з довжиною хвилі 500 нм . Визначите світловий тиск, якщо всі фотони відбиваються тілом.

Дано :

$$S = 1 \text{ м}^2$$

$$\Delta t = 1 \text{ с}$$

$$N = 10^5$$

$$\lambda = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

Знайти

$$p_{\text{дав}} - ?$$

Розв'язання.

$$p = \frac{F}{S} = \frac{ma}{S} = \frac{m \Delta v}{S \Delta t} = \frac{\Delta p_{cm}}{S \Delta t}$$

$$\Delta p_{cm} = 2 \Delta p_{\phi} = 2 N \Delta p_{\phi 1}$$

$$\lambda = cT = \frac{c}{\nu} \quad \nu = \frac{c}{\lambda}$$

$$p = \frac{F}{S} = \frac{\Delta p_{cm}}{S \Delta t} = \frac{2 N h}{S \Delta t \lambda}$$

$$\Delta p_{\phi 1} = mc = \frac{h\nu}{c}$$

$$\Delta p_{\phi 1} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{c} \frac{c}{\lambda} = \frac{h}{\lambda}$$

$$p = \frac{F}{S} = \frac{2 N h}{S \Delta t \lambda} = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 6,63 \cdot 10^{-34}}{1 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 10^{-7}} = \frac{2 \cdot 6,63 \cdot 10^{-29}}{5 \cdot 10^{-7}} = 2,652 \cdot 10^{-22} \text{ (Па)}$$

Відповідь. Тиск, створений світлом у цьому випадку дорівнює $p = 2,652 \cdot 10^{-22} \text{ Па}$.

Деякі дані біографії Петра Миколайовича Лебедева.



Петро Лебедев народився в 1866 році. У юнацькі роки він захоплювався фізикою, але вступити до університету не мав права, тому що закінчив реальне училище. Через цього Лебедев продовжив навчання в Імператорському московському технічному училищі. В 1887 році, не закінчивши навчання, Петро Лебедев виїхав до Німеччини, де працював під керівництвом відомого фізика Августа Кундта.

В 1899 році Петро Лебедев експериментально довів теоретичне припущення Максвелла про тиск світла на тверді тіла, а в 1907 році — і на газі. Ця робота внесла величезний вклад у розвиток досліджень електромагнітних явищ.

Крім цього, Лебедев займався вивченням хвостів комет і впливу гравітації на перерозподіл зарядів у провідниках.

Петро Лебедев займався й викладацькою діяльністю — саме він став творцем першої в Росії фізичної школи, вплив якої відчувається дотепер. Прожив видатний фізик усього 46 років — він помер в 1912 році через хворе серце.

Висновки

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

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

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. М. : Наука. ГРФМЛ, 1985. 384 с.
4. Физика микромира : Маленькая энциклопедия. М. : Советская энциклопедия, 1980. 528 с. Гл. ред. Д.В. Ширков.
5. *Тарасов Л.В.* Современная физика в средней школе. М. : Просв-ие, 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. *Лазарев П.П.* К двадцатипятилетию со дня смерти П.Н. Лебедева. Успехи физических наук, №17, 405 (1937).
10. Музей Оптики, Радиометр Крукса, 2017.
URL: <http://optimus.ifmo.ru/ru/exhibit/6/>

11. *Войнов О.Л., Белошанка 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>
-

Voinov Oleg, Beloshapka Alexander.

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.

Pressure of light and its features. Experience Lebedev

This article discusses the study of light pressure 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 pressure, light quanta, photons, photoelectric effect, nature of light, wave-particle duality.*