

УРОК 14/72

Тема. Зародження квантової теорії

Мета уроку: ознайомити учнів з історією зародження квантової теорії.

Тип уроку: урок вивчення нового матеріалу.

ПЛАН УРОКУ

Вивчення нового матеріалу	30 хв	1. Суперечності між теорією й дослідом. 2. Гіпотеза Планка. 3. Фотони
Закріплення вивченого матеріалу	15 хв	1. Якісні питання. 2. Навчаємося розв'язувати задачі

ВИВЧЕННЯ НОВОГО МАТЕРІАЛУ

1. Суперечності між теорією й дослідом

Однією з проблем, з якою фізики зіштовхнулися наприкінці XIX сторіччя, було встановлення закономірностей випромінювання абсолютно чорного тіла.

➤ **Абсолютно чорне тіло** — це фізична модель тіла, що повністю поглинає будь-яке падаюче на нього випромінювання.

Експериментально було отримано розподіл енергії в спектрі випромінювання абсолютно чорного тіла. Однак аналітичний вид відповідної до цього графіка функції $W_\lambda = f(\lambda)$ нікому не був відомий. Більше того, всі спроби вчених одержати експериментально цю функцію закінчувалися невдачею.

2. Гіпотеза Планка

Щоб досягти згоди між теорією й дослідом, треба було прийняти, що світло випромінюється й поглинається окремими порціями (квантами). Це означало, що світло має властивості не тільки хвиль, але й частинок.

14 грудня 1900 р. німецький фізик Макс Планк виступив на засіданні Німецького фізичного товариства з доповіддю, присвяченою проблемі розподілу енергії в спектрі випромінювання абсолютно

чорного тіла. Запропоноване ним розв'язання проблеми стало першим кроком у створенні сучасної фізики мікросвіту.

Світло випромінюється й поглинається речовиною не безупинно, а окремими порціями — *квантами*.

Причому енергія такого кванта визначалася величиною $E = h\nu$, де h — стала Планка.

За сучасним даними $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Однак у той час не було прямих експериментальних доказів існування квантів випромінювання. У результаті ідею Планка більшість фізиків сприйняли як «спритний фокус», що не мав серйозних наукових підстав.

Після відкриття Планка почала розвиватися нова, найсучасніша й глибока фізична теорія — квантова теорія. Розвиток її не завершений і донині.

3. Фотони

Планк спочатку вирішив, що світло тільки випромінюється квантами, а поширюється й поглинається безупинно. Ситуація змінилася докорінно, коли Альберт Ейнштейн дійшов висновку, що монохроматичне випромінювання поводить ся так, начебто складається з $N = \frac{W}{h\nu}$ незалежних один від одного квантів енергії величиною $h\nu$ кожний. Ейнштейн припустив, що справа не просто у квантах енергії, а в реальних частинках, з яких складається будь-яке електромагнітне випромінювання. Пізніше частинки світла (кванти світла) почали називати *фотонами*.

Фотони мають такі властивості:

1. Фотон є електрично нейтральною частинкою; його заряд дорівнює нулю.
2. Швидкість руху фотона не залежить від вибору системи відліку й завжди дорівнює швидкості світла у вакуумі.
3. Енергія фотона пропорційна частоті електромагнітного випромінювання, квантом якого він є: $E = h\nu$.
4. Імпульс фотона дорівнює: $p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$.
5. Маса фотона дорівнює нулю.

Остання властивість стосується тільки окремого фотона, а світло в цілому (як потік фотонів) має масу. Наприклад, для системи із

двох фотонів, які мають однакову енергію й летять під кутом θ один до одного, масу визначають співвідношенням:

$$M = \frac{2E}{c^2} \sin \frac{\theta}{2}.$$

6. Фотони випромінюються під час: переходів частинок речовини зі збудженого стану в стан з меншою енергією; прискорення заряджених частинок; розпаду деяких частинок; анігіляції. Під час поглинання світла речовиною фотон цілком передає всю енергію частинкам речовини.

ПИТАННЯ ДО УЧНІВ У ХОДІ ВИКЛАДУ НОВОГО МАТЕРІАЛУ

Перший рівень

1. Наведіть приклади абсолютно чорних тіл.
2. Як пов'язана енергія кванта й частота випромінювання?
3. Яку мікрочастинку називають фотоном?

Другий рівень

1. Які факти свідчать про наявність у світла корпускулярних властивостей?
2. У чому сутність квантових уявлень про поширення й поглинання світла?

ЗАКРІПЛЕННЯ ВИВЧЕНОГО МАТЕРІАЛУ

1. Якісні питання

1. Як змінюється енергія фотона у разі збільшення довжини хвилі світла?
2. Що нового вніс Ейнштейн у розвиток квантових уявлень порівняно з гіпотезою Планка?

2. Навчаємося розв'язувати задачі

1. Визначте енергію кванта видимого світла довжиною хвилі 500 нм.
2. Скільки фотонів за секунду випромінює волосок електричної лампи накалювання потужністю 100 В, якщо на випромінювання світла затрачається 4,4 % електричної енергії? Довжину хвилі випромінювання вважайте рівною 600 нм.

Розв'язання. Оскільки кожний фотон має енергію E , то сумарна енергія N фотонів дорівнює $W = EN$, а потужність випромінювання $P_{\text{корисн}} = \frac{W}{t}$, де t — час, за який лампа випромінює N фотонів. Корисну потужність можна знайти зі співвідношення:

$$\eta = \frac{P_{\text{корисн}}}{P_{\text{вигр}}}$$

Оскільки енергія фотона дорівнює $E = \frac{hc}{\lambda}$, то

$$P_{\text{корисн}} = \frac{EN}{t} = \frac{h\nu N}{t} = \frac{hcN}{\lambda t}$$

З формули ККД маємо: $P_{\text{корисн}} = \eta P_{\text{вигр}}$, звідки:

$$\eta P_{\text{вигр}} = \frac{hcN}{\lambda t} \Rightarrow N = \frac{\eta P_{\text{вигр}} \lambda t}{hc}$$

Перевіривши одиниці величин і підставивши числові значення, одержуємо $N = 1,3 \cdot 10^{19}$.

3. Чутливість сітківки ока до жовтого світла становить $3,33 \cdot 10^{-18}$ Вт. Скільки фотонів має щомиті поглинати сітківка, щоб виникло зорове відчуття? Довжину хвилі прийміть рівною 600 нм.

ЩО МИ ДІЗНАЛИСЯ НА УРОЦІ

- Абсолютно чорне тіло — це фізична модель тіла, яке повністю поглинає будь-яке випромінювання, що падає на нього.
- Світло випромінюється й поглинається речовиною не безупинно, а окремими порціями — квантами.
- Властивості фотонів:
 - 1) заряд дорівнює нулю;
 - 2) рухається зі швидкістю світла у вакуумі;
 - 3) енергія фотона: $E = h\nu$.
 - 4) імпульс фотона: $p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$.
 - 5) маса фотона дорівнює нулю.

Домашнє завдання

Підр-1: § 47; підр-2: § 23 (п. 1).

УРОК 15/73

Тема. Фотоефект

Мета уроку: роз'яснити учням явище фотоефекту й зміст його законів.

Тип уроку: урок вивчення нового матеріалу.

ПЛАН УРОКУ

Контроль знань	3 хв	1. Гіпотеза Планка. 2. Властивості фотонів
Демонстрації	5 хв	1. Фотоефект на цинковій пластинці. 2. Відеофрагменти фільму «Фотоефект»
Вивчення нового матеріалу	25 хв	1. Закони фотоефекту. 2. Пояснення фотоефекту за допомогою хвильової теорії світла. 3. Квантове пояснення фотоефекту. 4. Застосування фотоефекту
Закріплення вивченого матеріалу	12 хв	1. Якісні питання. 2. Навчаємося розв'язувати задачі

ВИВЧЕННЯ НОВОГО МАТЕРІАЛУ

1. Закони фотоефекту

Фотоефект було відкрито 1887 року Генріхом Герцом, однак перші експериментальні дослідження були виконані російським ученим О. Г. Столетовим.

➤ *Явище взаємодії світла з речовиною, що супроводжується випусканням електронів, називають **фотоефектом**.*

Розрізняють *зовнішній фотоефект*, за якого фотоелектрони вилітають за межі тіла, і *внутрішній фотоефект*, за якого електрони, виврані світлом з атомів, залишаються усередині речовини.

Численні експерименти й спостереження дозволили зробити висновок: явище фотоефекту практично безінерційне; інтенсивність фотоефекту залежить від роду металу, величини світлового потоку й спектрального складу випромінювання.

Закони фотоефекту були експериментально встановлені професором Московського університету О. Г. Столетовим:

1. Число фотоелектронів, які щомиті вириваються з поверхні металу, прямо пропорційне інтенсивності світла.

2. Максимальна початкова швидкість фотоелектронів збільшується в разі збільшення частоти світла, що падає, і не залежить від інтенсивності світла.
3. Для кожної речовини існує максимальна довжина світлової хвилі (червона границя фотоелефекту), за якої починається фотоелефект. Опромінення речовини світловими хвилями більшої довжини фотоелефекту не спричиняє.

Якщо перший закон фотоелефекту ще можна було пояснити, використовуючи класичну електромагнітну теорію світла, то наступні два закони прямо суперечили уявленням, що існували у той час. Знадобилося більше 20 років, щоб розгадати цю загадку.

2. Пояснення фотоелефекту за допомогою хвильової теорії світла

Отримані дослідним шляхом закони фотоелефекту не вдалося пояснити на основі електромагнітної хвильової теорії світла. З погляду цієї теорії електромагнітна хвиля, досягнувши поверхні металу, зумовлює вимушені коливання електронів, відриваючи їх від металу. Але тоді потрібен час для «розгойдування» електронів, і за малої освітленості металу повинне виникнути помітне запізнення між початком освітлення й моментом вильоту електронів, а фотоелефект практично безінерційний.

Крім того, кінетична енергія електронів, що залишають метал, повинна залежати від амплітуди змущувальної сили, а значить, і від напруженості електричного поля в електромагнітній хвилі.

3. Квантове пояснення фотоелефекту

1905 року Альберт Ейнштейн запропонував теорію, що давала пояснення відразу всієї сукупності експериментальних фактів про фотоелефект. Розвинувши й поглибивши ідеї Планка, Ейнштейн дійшов висновку, що світло повинне не тільки випромінюватися й поглинатися, але також і поширюватися у вигляді окремих порцій енергії — квантів електромагнітного поля. Ці кванти інакше називають *фотонами*.

Ейнштейн уважав, що під час взаємодії з речовиною фотон поводить себе подібно до частинки й передає свою енергію не речовині загалом і навіть не атому, а тільки окремим електронам. Щойно метал поглине фотон, енергія останнього $E = h\nu$ передається вільному

електрону. Вона витрачається на звільнення електрона з металу — на роботу виходу й на передання йому кінетичної енергії. При цьому енергія фотона передається електрону в металі тільки повністю, а сам фотон перестає існувати.

Рівняння Ейнштейна для фотоефекту: $h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$, де $h\nu$ — енергія поглиненого фотона; A — робота виходу електрона з металу; $\frac{mv^2}{2}$ — кінетична енергія, з якою електрон залишає поверхню металу.

Рівняння Ейнштейна можна розглядати як вираження закону збереження енергії для одиничного акту взаємодії фотона з електроном. Воно дозволяє пояснити всі закони фотоефекту.

Кінетична енергія фотона може бути виражена так:

$$\frac{mv^2}{2} = h\nu - A, \text{ а його швидкість: } v = \sqrt{\frac{2(h\nu - A)}{m}}.$$

Звідси випливає, що максимальна кінетична енергія фотоелектрона, а, отже, і його максимальна початкова швидкість залежать від частоти світла й не залежать від інтенсивності світла.

За рівності $h\nu = A$ швидкість фотоелектрона й кінетична енергія дорівнюють нулю. У цьому випадку електрон ніби «випадає» з металу з нульовою швидкістю. Спостерігаємо поріг фотоефекту:

$$v_{\min} = \frac{A}{h} \text{ або } \lambda_{\max} = \frac{hc}{A}.$$

Інтенсивність світла прямо пропорційна числу фотонів n_{ϕ} і енергії кожного з них $h\nu$. Кожного фотона цілком поглинає тільки один електрон. Тому кількість вирваних світлом фотоелектронів, а отже, і фотострум насичення пропорційні n_{ϕ} , тобто інтенсивності світла (перший закон фотоефекту).

4. Застосування фотоефекту

Явище фотоефекту широко застосовують в науці й техніці: воно дозволяє здійснити безпосереднє перетворення енергії світла в електричну енергію. Прилади, в основі принципу дії яких лежить явище фотоефекту, називають фотоелементами. У фотоелементах енергія світла керує енергією електричного струму або перетворюється в неї.

Фотоелементи використовують для зчитування інформації (зображення, звуку або даних) з оптичних дисків (компакт-дисків), які є сьогодні однією з найпоширеніших форм запису й зберігання інформації.

Важливим застосуванням фотоелементів є використання їх для виготовлення сонячних батарей на космічних кораблях. Сонячні батареї використовують сьогодні і як джерело електричного струму в спекотних місцевостях: таку батарею розміщують на даху будинку, а електроенергія, яку вона дає, живить кондиționери, що охолоджують приміщення. Таким чином, сонячна енергія, коли її виявляється в надлишку, сама ж допомагає послабити небажані наслідки цього надлишку.

Застосування фото ефекту в техніці: кіно (відтворення звуку); фототелеграф; фотометрія (для вимірювання сили світла, яскравості, освітленості); керування виробничими процесами.

ПИТАННЯ ДО УЧНІВ У ХОДІ ВИКЛАДУ НОВОГО МАТЕРІАЛУ

Перший рівень

1. Чим відрізняється зовнішній фото ефект від внутрішнього фото ефекту?
2. Які факти свідчать про наявність у світла корпускулярних властивостей?
3. Які факти свідчать про наявність у світла хвильових властивостей?

Другий рівень

1. Які закони фото ефекту не можна пояснити на основі хвильової теорії світла?
2. Чому, відповідно до класичної електродинаміки, хвилі повинні були б відібрати в частинок всю енергію теплового руху?

ЗАКРІПЛЕННЯ ВИВЧЕНОГО МАТЕРІАЛУ

1. Якісні питання

1. Чому за частот, менших від червоної границі, фото ефект не спостерігається?
2. Чому для різних речовин червона границя фото ефекту має різні значення?
3. У чому розбіжності фото ефекту в напівпровідниках і в металах?

2. Навчаємося розв'язувати задачі

1. Робота виходу електронів з калію дорівнює $3,55 \cdot 10^{-19}$ Дж. Визначте довжину хвилі червоної границі фотоефекту.
2. Цинкова пластинка освітлюється монохроматичним світлом довжиною хвилі 300 нм. Якого максимального потенціалу набуває пластина? Червона границя фотоефекту для цинку дорівнює 332 нм.
3. Робота виходу електронів з калію дорівнює 2,25 еВ. З якою швидкістю вилітають електрони з калію, якщо його освітили монохроматичним світлом довжиною хвилі 365 нм?
4. Якою найменшою напругою повністю втримуються електрони, вирвані ультрафіолетовими променями довжиною хвилі 0,1 мкм із вольфрамової пластинки? Робота виходу для вольфраму 4,5 еВ.

ЩО МИ ДІЗНАЛИСЯ НА УРОЦІ

- Явище взаємодії світла з речовиною, що супроводжується випусканням електронів, називають фотоефектом.
- Закони фотоефекту:
 1. Число фотоелектронів, які щомиті вириваються з поверхні металу, прямо пропорційне інтенсивності світла.
 2. Максимальна початкова швидкість фотоелектронів збільшується в разі збільшення частоти падаючого світла й не залежить від інтенсивності світла.
 3. Для кожної речовини існує максимальна довжина світлової хвилі (червона границя фотоефекту), за якої починається фотоефект. Опромінення речовини світловими хвилями більшої довжини фотоефекту не спричиняє.
- Рівняння Ейнштейна для фотоефекту: $h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$.

Домашнє завдання

1. Підр-1: § 48; підр-2: § 23 (п. 1, 2).
2. 36.:

Рів1 № 15.3; 15.5; 15.11; 15.13.

Рів2 № 15.16; 15.18; 15.19; 15.20.

Рів3 № 15.32, 15.33; 15.34; 15.35.

УРОК 16/74

Тема. Розв'язування задач

Мета уроку: закріпити знання учнів про закони фотоефекту під час розв'язування конкретних задач.

Тип уроку: урок закріплення знань.

Контроль знань:

1. Явище фотоефекту.
2. Закони фотоефекту.
3. Застосування фотоефекту.

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

Засвоєнню теоретичного матеріалу про закони фотоефекту добре допомагають правильно організовані заняття з розв'язуванням відповідних задач. Залежно від рівня підготовки класу вчитель підбирає такі завдання, які повною мірою відповідають пізнавальним запитам учнів. Нижче наводимо орієнтовний набір якісних і розрахункових задач, з яких учитель може вибрати необхідні для цього уроку.

Дуже часто для вимірювання енергії заряджених частинок в атомній і ядерній фізиці застосовують одиницю, яку називають електрон-вольт:

1 електрон-вольт (1 еВ) — це енергія, якої набуває частинка із зарядом, що дорівнює заряду електрона ($q_e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл), під час проходження різниці потенціалів в 1 В.

$$1 \text{ еВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1 \text{ В} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

Якісні задачі

1. На що витрачають енергію, затрачувану в процесі здійснення роботи виходу електрона з металу?
2. Цинкова пластинка, заряджена негативно й приєднана до електрометра, освітлюється світлом електричної дуги. Чому стрілка електрометра спочатку повертається в нульове положення, а потім знову відхиляється?
3. Жовте світло, що падає на поверхню катода, спричиняє фотоефект. Чи обов'язково виникне фотоефект у разі освітлення катода синім світлом? жовтогарячим світлом?
4. У якого світла — червона чи зеленого — енергія фотона більше?
5. Порівняйте енергії фотонів видимого світла, інфрачервоного, ультрафіолетового й рентгенівського випромінювань.

Розрахункові задачі

1. Коли довжину хвилі випромінювання, що падає на катод фотоелемента, зменшили від $\lambda_1 = 500$ нм до $\lambda_2 = 400$ нм, максимальна швидкість фотоелектронів збільшилася в 2 рази. Визначте червону границю фотоелемента λ_{\max} для цього катода.

Розв'язання. Після зміни довжини хвилі випромінювання максимальна кінетична енергія фотоелектронів збільшилася в 4 рази. Відповідно до рівняння Ейнштейна для фотоелемента

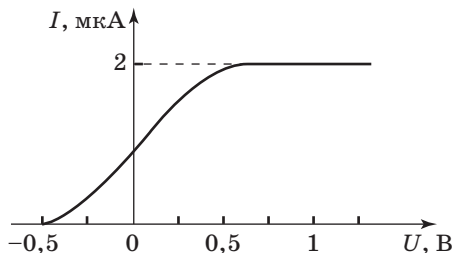
$$\frac{hc}{\lambda_1} = A + E_{k1}, \quad \frac{hc}{\lambda_2} = A + E_{k2} = A + 4E_{k1}.$$

Виключаючи із цих рівнянь E_{k1} , знайдемо $A = \frac{hc(4\lambda_2 - \lambda_1)}{3\lambda_1\lambda_2}$.

Оскільки $A = \frac{hc}{\lambda_{\max}}$, одержуємо $\lambda_{\max} = \frac{3\lambda_1\lambda_2}{4\lambda_2 - \lambda_1}$. Перевіривши

одиниці величин і підставивши числові значення, знаходимо червону границю фотоелемента: 545 нм.

2. Визначте сталу Планка, якщо зі збільшенням частоти електромагнітного випромінювання в процесі фотоелемента на $1,21 \cdot 10^{11}$ кГц затримувальний потенціал зріс на 0,5 В.
3. У разі освітлення поверхні деякого металу світлом частотою $5 \cdot 10^{14}$ Гц вилітають фотоелектрони. Яка робота виходу електронів з металу, якщо максимальна кінетична енергія фотоелектронів 1,2 еВ?
4. На рисунку показана вольт-амперна характеристика вакуумного фотоелемента, на катод якого діє світло довжиною хвилі 450 нм. Знайдіть червону границю фотоелемента для цього катода.



Домашнє завдання

1. Підр.: § 23 (п. 1, 2).
2. 36.:
Рів1 № 15.4; 15.6; 15.8; 15.12.
Рів2 № 15.21; 15.22; 15.23; 15.26.
Рів3 № 15.31, 15.36; 15.37.
3. Д: підготуватися до самостійної роботи № 12.

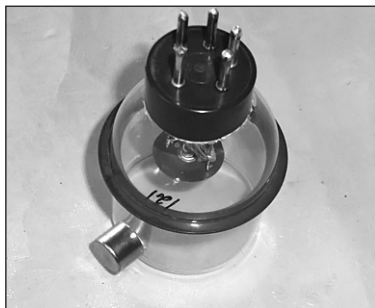
**ЗАВДАННЯ ІЗ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ № 12 «КВАНТОВІ
ВЛАСТИВОСТІ СВІТЛА. ЗАКОНИ ФОТОЕФЕКТУ»****Завдання 1 (1,5 бала)**

Учень спостерігає явище дифракції світла, розглядаючи лампочку крізь капронову тканину.

- А Лампочка випромінює світло окремими квантами.
- Б Корпускулярна теорія пояснює дифракцію світла.
- В Корпускулярні властивості світла проявляються тільки під час його поширення.
- Г Хвильові властивості світла спостерігаються тільки під час фотоелекту.

Завдання 2 (2,5 бала)

Після освітлення катода вакуумного фотоелемента світлом з катода вилітають фотоелектрони. Інтенсивність світлового потоку збільшили у 2 рази.



- А Максимальна кінетична енергія фотоелектронів збільшилася.
- Б Максимальна швидкість фотоелектронів збільшилася.

- В** Максимальна кінетична енергія фотоелектронів не залежить від частоти падаючого світла.
- Г** У фотоелементі світлова енергія перетворюється в енергію електричного струму.

Завдання 3 (3 бали)

Завдання 3 має на меті встановити відповідність (логічна пара). До кожного рядка, позначеного буквою, підберіть твердження, позначене цифрою.

- А** Фотоефект.
 - Б** Перший закон фотоефекту.
 - В** Другий закон фотоефекту.
 - Г** Третій закон фотоефекту.
- 1** Максимальна кінетична енергія вирваних електронів лінійно зростає у разі збільшення частоти падаючого світла.
 - 2** Явище фотоефекту практично безінерційне; інтенсивність фотоефекту залежить від роду металу й спектрального складу випромінювання.
 - 3** Для кожної речовини існує мінімальна частота світла, названа червоною границею фотоефекту, нижче від якої фотоефект неможливий.
 - 4** Виривання електронів з речовини під дією світла.
 - 5** Кількість електронів, що вириваються світлом щомиті з поверхні металу, пропорційна поглиненій енергії світла.

Завдання 4 (5 балів)

Робота виходу електронів з деякого металу дорівнює $7,55 \cdot 10^{-19}$ Дж. Визначте довжину хвилі червоної границі фотоефекту для цього металу. Що це за метал?

УРОК 17/75

Тема. Тиск світла

Мета уроку: пояснити фізичну природу тиску світла з погляду електромагнітної й квантової теорій.

Тип уроку: комбінований урок.

ПЛАН УРОКУ

Контроль знань	15 хв	Самостійна робота № 11 «Квантові властивості світла. Закони фотоелекту»
Вивчення нового матеріалу	25 хв	1. Чому світло чинить тиск. 2. Квантове пояснення тиску світла. 3. Корпускулярно-хвильовий дуалізм
Закріплення вивченого матеріалу	5 хв	1. Якісні питання. 2. Навчаємося розв'язувати задачі

ВИВЧЕННЯ НОВОГО МАТЕРІАЛУ

1. Чому світло чинить тиск

Для пояснення світлового тиску розглянемо дію електромагнітної хвилі, що падає на металеву пластину перпендикулярно до її поверхні. Під дією електричного поля хвилі вільні електрони будуть рухатися з деякою швидкістю \vec{v} в напрямку, протилежному до напрямку вектора напруженості \vec{E} . З боку магнітного поля хвилі на рухомий електрон діє сила Лоренца. Якщо, скориставшись правилом лівої руки, визначити напрямок сили Лоренца, то побачимо, що він збігається з напрямком поширення хвилі. Сумарна сила Лоренца, що діє на електрони пластини, і є силою тиску, а відношення цієї сили до площі поверхні визначає тиск електромагнітної хвилі.

Максвелл теоретично довів, що *тиск, створюваний електромагнітною хвилею на абсолютно непрозоре тіло можна визначити за формулою:*

$$p = (1 + R)w_{\text{cp}},$$

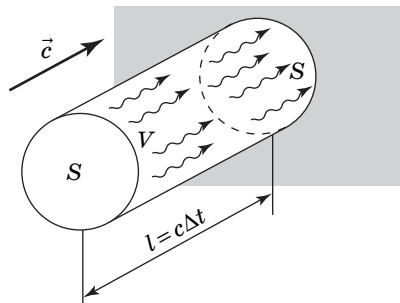
де R — коефіцієнт відбиття, w_{cp} — середня густина енергії хвилі.

Дзеркальна поверхня повністю відбиває світло, тому $R_s = 1$. Чорна поверхня, навпаки, повністю поглинає світло, тому R_q і $p_q = w_{cp}$. Отже, тиск, створюваний світлом на дзеркальну поверхню, удвічі більший, ніж тиск на чорну поверхню.

Передбачене Максвеллом існування світлового тиску було експериментально підтвержене П. М. Лебедевим, що 1900 р. виміряв тиск світла на тверді тіла, використовуючи для цього чутливі крутильні ваги. Теорія й експеримент збіглися. Досліди Лебедева — експериментальне свідчення факту: фотони мають імпульс.

2. Квантове пояснення тиску світла

Нехай паралельний пучок монохроматичного світла падає на тіло перпендикулярно до його поверхні.



За інтервал часу Δt на поверхню падає N фотонів. Кожен з поглинутих фотонів передає тілу імпульс, що дорівнює $p_v = \frac{h\nu}{c}$, а кожний з відбитих — $p_v = \frac{2h\nu}{c}$.

Якщо R — коефіцієнт відбиття фотонів, то RN фотонів відбивається від тіла, а $(1 - R)N$ — поглинається. Сумарний імпульс, що передають тілу все N фотонів, дорівнює:

$$\Delta p = (1 - R)N \frac{h\nu}{c} + RN \frac{2h\nu}{c} = (1 + R) \frac{Nh\nu}{c} = (1 + R) \frac{W}{c},$$

де $W = Nh\nu$ — сумарна енергія всіх фотонів.

Сила тиску, відповідно до другого закону Ньютона, дорівнює $F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$, тому тиск світла визначають зі співвідношення:

$$p = \frac{F}{S} = \frac{\Delta p}{S \Delta t} = \frac{(1+R)W}{cS \Delta t} = \frac{(1+R)W}{V} = (1+R)w,$$

де $w = \frac{W}{V}$ — об'ємна густина енергії падаючого світла.

Таким чином, вираз для тиску світла, отриманий у рамках квантової теорії, повністю збігається з виразом для тиску світла, передбаченим теорією Максвелла.

3. Корпускулярно-хвильовий дуалізм

Класична фізика завжди чітко розмежовувала об'єкти, що мають хвильову природу (наприклад, світло й звук), і об'єкти, що мають дискретну корпускулярну структуру (наприклад, системи матеріальних точок). Одне з найбільш значних досягнень сучасної фізики — переконання в помилковості протиставлень хвильових і квантових властивостей світла. Розглядаючи світло як потік фотонів, а фотони як кванти електромагнітного випромінювання, що мають одночасно хвильові й корпускулярні властивості, сучасна фізика змогла об'єднати, здавалося б, непримиренні теорії — хвильову й корпускулярну. У результаті виникло уявлення про корпускулярно-хвильовий дуалізм, що лежить в основі всієї сучасної фізики.

➤ *Корпускулярно-хвильовий дуалізм* — проявлення у поведженні того самого об'єкта як корпускулярних, так і хвильових властивостей.

Отже, квант світла — це не хвиля, але й не корпускула в розумінні Ньютона. Фотони — особливі мікрочастинки, енергія й імпульс яких (на відміну від звичайних матеріальних точок) виражаються через хвильові характеристики — частоту й довжину хвилі.

ПИТАННЯ ДО УЧНІВ У ХОДІ ВИКЛАДУ НОВОГО МАТЕРІАЛУ

Перший рівень

1. Що називають тиском? силою тиску?
2. У якому випадку тиск світла більше: під час його падіння на дзеркальну поверхню чи на чорну?
3. Чому тиск світла залежить від типу поверхні?

Другий рівень

1. Як напрямлені електричне й магнітне поля в електромагнітній хвилі?

2. Назвіть відмітні властивості частинок речовини й частинок електромагнітного поля (фотонів).
3. Чи змінюється енергія фотона під час переходу з одного середовища в інше?

ЗАКРІПЛЕННЯ ВИВЧЕНОГО МАТЕРІАЛУ

1. Якісні питання

1. Світло нормально падає на поверхню твердого тіла. Порівняйте тиск світла на цю поверхню в трьох випадках: а) поверхня дзеркальна; б) поверхня чорна; в) поверхня біла. Обґрунтуйте свою відповідь.
2. Чому хвіст комети, що летить до Сонця, напрямлений від Сонця?

2. Навчаємося розв'язувати задачі

1. Знайдіть імпульс фотона видимого світла довжиною хвилі у вакуумі 600 нм.
2. Знайдіть імпульс фотона ультрафіолетового випромінювання частотою $1,5 \cdot 10^{15}$ Гц.
3. На поверхню твердого тіла нормально падає випромінювання лазера довжиною хвилі 660 нм. Який імпульс передає поверхні кожний фотон, що падає? Розгляньте два випадки: а) поверхня чорна; б) поверхня дзеркальна.
4. На один квадратний метр поверхні тіла за 1 с падає 10^5 фотонів довжиною хвилі 500 нм. Визначте світловий тиск, якщо всі фотони: а) тіло відбиває; б) тіло поглинає.

ЩО МИ ДІЗНАЛИСЯ НА УРОЦІ

- Досліди Лебедева — експериментальне свідчення того, що фотони мають імпульс.
- Корпускулярно-хвильовий дуалізм — проявлення у того самого об'єкта як корпускулярних, так і хвильових властивостей.

Домашнє завдання

1. Підр-1: § 49; підр-2: § 23 (п. 3).
2. 36.:

Рів1 № 15.1; 15.2; 15.7; 15.9.

Рів2 № 15.24; 15.28; 15.29; 15.30.

Рів3 № 15.40, 15.41; 15.42; 15.43.

УРОК 18/76

Тема. Узагальнювальний урок з теми «Хвильова й квантова оптика»

Мета уроку: узагальнити вивчений матеріал і підготувати учнів до тематичного оцінювання знань.

Тип уроку: урок закріплення знань.

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

Урок необхідно присвятити підготовці учнів до тематичного оцінювання знань. Узагальнюючи вивчений матеріал, учням можна запропонувати завдання у вигляді тестів.

З метою поступової підготовки до перевірки знань учням можна запропонувати набір тестів з однією правильною відповіддю. Ці тести призначені для підготовки до самостійної роботи, їх пропонують всьому класу для обговорення без оцінювання.

Таке застосування тестів надає можливість для встановлення оперативного зворотного зв'язка й оцінювання вчителем ступеня готовності учнів до цієї роботи. Варіант правильної відповіді (А, Б, В або Г) учні можуть показувати, піднімаючи, наприклад, 1, 2, 3 або 4 пальці. При цьому працює весь клас, і ні в кого немає страху одержати погану оцінку.

ТРЕНУВАЛЬНІ ТЕСТИ

- Показник заломлення оптичного скла дорівнює 1,73. Визначте, за якого значення кута падіння променя з повітря на поверхню цього скла заломлений промінь буде перпендикулярним до відбитого.
А 75°.
Б 60°.
В 30°.
Г 15°.
- Визначте, який з оптичних пристроїв може давати дійсне зображення предметів.
А Оптичний мікроскоп.
Б Окуляри короткозорі людини.
В Проекційний апарат.
Г Плоске дзеркало.

3. Запалена свічка розташована перед лінзою з оптичною силою -10 дптр на відстані 20 см від неї. У скільки разів висота зображення полум'я менше від висоти власне полум'я?
А У 4 рази. **В** У 2 рази.
Б У 3 рази. **Г** У 1,5 раза.
4. Які з наведених прикладів можна пояснити дифракцією світла?
А Неможливість побачити атоми в мікроскоп.
Б Кольорове забарвлення крилець метеликів.
В Кольорове забарвлення DVD-диска.
Г Кольорове забарвлення мильної плівки.
5. Дві когерентні світлові хвилі у вакуумі мають частоту $7,5 \cdot 10^{14}$ Гц. За якої різниці ходу цих хвиль буде спостерігатися інтерференційний максимум?
А $0,9$ мкм. **В** $1,1$ мкм.
Б $1,0$ мкм. **Г** $1,2$ мкм.
6. Коли світло частотою 10^{15} Гц падає на поверхню металу, максимальна кінетична енергія фотоелектронів дорівнює $2,4 \cdot 10^{-19}$ Дж. Визначте мінімальну енергію фотонів, за якої можливий фотоэффект для цього металу.
А $1,7 \cdot 10^{-19}$ Дж. **В** $4,2 \cdot 10^{-19}$ Дж.
Б $3,1 \cdot 10^{-19}$ Дж. **Г** $9,0 \cdot 10^{-19}$ Дж.
7. Частоту випромінювання, що падає на поверхню металу, поступово збільшують. Фотоэффект починається за частоти ν_0 . У скільки разів збільшується максимальна кінетична енергія фотоелектронів, коли частота збільшується від $1,5\nu_0$ до $3,5\nu_0$?
А У 2 рази. **В** У 4 рази.
Б У 3 рази. **Г** У 5 разів.
8. Внаслідок розсіювання рентгенівського випромінювання на електронах частота цього випромінювання зменшується від $6 \cdot 10^{19}$ до $4 \cdot 10^{19}$ Гц. Визначте, якої кінетичної енергії набувають електрони внаслідок цього процесу.
А $1,3 \cdot 10^{-14}$ Дж. **В** $3,3 \cdot 10^{-14}$ Дж.
Б $2,6 \cdot 10^{-14}$ Дж. **Г** $6,6 \cdot 10^{-14}$ Дж.

УРОК 19/77

Тема. Тематичне оцінювання з теми «Хвильова й квантова оптика»

Мета уроку: контроль і оцінювання знань, умінь і навичок учнів з вивченої теми.

Тип уроку: урок контролю й оцінювання знань.

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

Підсумкове тематичне оцінювання можна провести у вигляді контрольної роботи. Кожний варіант контрольної роботи містить шість задач. Більш докладно можна прочитати в передмові до уроку № 11/11.

Нижче пропонувано один з варіантів контрольної роботи № 5 «Хвильова й квантова оптика».

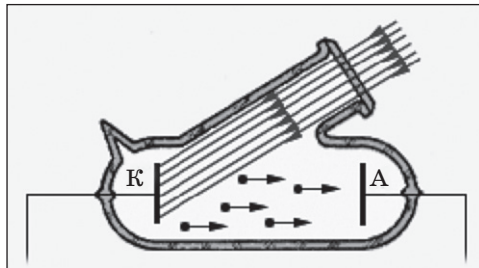
Завдання 1 (0,5 бала)

У разі накладення двох світлових хвиль із однаковою частотою й постійною різницею фаз спостерігається...

- А** ...відбиття світла.
- Б** ...заломлення світла.
- В** ...дифракція світла.
- Г** ...інтерференція світла.

Завдання 2 (1 бал)

У балон, з якого відкачано повітря, поміщені два електроди. Потік світла падає на один з електродів і вириває з нього електрони.



- А** У разі збільшення напруги між електродами сила фотоструму зменшується.
- Б** Кількість електронів, які світло вириває з поверхні металу, обернено пропорційна поглинутій енергії.

- В** Максимальна кінетична енергія вирваних електронів лінійно зростає в разі збільшення частоти падаючого світла.
- Г** Максимальна початкова швидкість фотоелектронів не залежить від частоти світла.

Завдання 3 (1,5 бала)

За яких умов непрозорий предмет дає тінь без півтіні?

Завдання 4 (2 бали)

Знайдіть імпульс фотона ультрафіолетового випромінювання частотою $1,5 \cdot 10^{15}$ Гц.

Завдання 5 (3 бали)

Завдання 5 має на меті встановити відповідність (логічна пара). До кожного рядка, позначеного буквою, підберіть формулу, позначену цифрою.

- А** Енергія кванта.
Б Рівняння Ейнштейна для фотоефекту.
В Червона границя фотоефекту.
Г Швидкість фотоелектрона.

1 $h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$.

2 $\sqrt{\frac{2(h\nu - A)}{m}}$.

3 $\frac{hc}{\lambda}$.

4 $\lambda_{\max} = \frac{hc}{A}$.

5 $h\nu > A$.

Завдання 6 (4 бали)

Якщо по черзі освітлювати поверхню металу випромінюванням різної довжини хвиль — 350 і 540 нм, то максимальні швидкості фотоелектронів будуть відрізнятися удвічі. Визначте роботу виходу електрона для цього металу.