

Фізика 11 Урок 67 Формула Планка. Світлові кванти

Мета уроку:

Навчальна. Формувати знання учнів про історію виникнення квантової теорії, формулу Планку, фотони як кванти світла з певними властивостями; формувати навички та вміння визначати масу, енергію та імпульс фотона, розв'язувати фізичні задачі, застосовуючи отримані знання.

Розвивальна. Розвивати пізнавальні навички учнів; вміння аналізувати навчальний матеріал, умову задачі, хід розв'язання задачі; вміння стисло і грамотно висловлювати свої міркування та обґрунтовувати їхню правильність.

Виховна. Виховувати уважність, зібраність, спостережливість.

Тип уроку: урок вивчення нового матеріалу.

Наочність і обладнання: навчальна презентація, комп'ютер, підручник.

Хід уроку

I. ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ ЕТАП

II. АКТУАЛІЗАЦІЯ ОПОРНИХ ЗНАТЬ ТА ВМІНЬ

«...Ми знаємо, що світло – це хвильовий рух. Сумніватися в цих фактах більше неможливо, спростовувати ці погляди незбагненно для фізика...» – писав у 1889 р. Г. Герц. Наприкінці XIX ст. фізики не мали сумнівів у тому, що світло – це хвиля. Проте ми знаємо, що світло – це одночасно і хвиля, і частинка. Як зароджувалася наука про частинки світла? Які властивості мають ці частинки?

III. ВИВЧЕННЯ НОВОГО МАТЕРІАЛУ

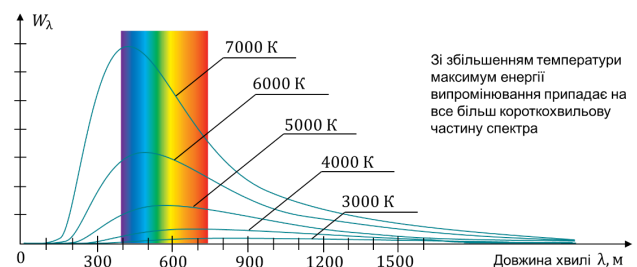
1. Зародження квантової теорії

Зародження квантової теорії пов'язане з установленням закономірностей випромінювання абсолютно чорного тіла.

Абсолютно чорне тіло – це фізична модель тіла, яке повністю поглинає будь-яке випромінювання, що падає на нього (абсолютно чорне тіло може випромінювати світло).

До випромінювання абсолютно чорного тіла близьке випромінювання багаття, нитки розжарення лампи, випромінювання більшості зір. Спектр випромінювання абсолютно чорного тіла залежить лише від його температури. Експериментальні дослідження показали, що розподіл енергії випромінювання залежно від довжини хвилі має вигляд низки кривих. Але всі спроби вчених одержати універсальну формулу цієї залежності зазнавали поразки.

Рисунок 1. Залежність енергії W_λ електромагнітних хвиль, випромінюваних за 1 с з одиниці площі поверхні абсолютно чорного тіла, від довжини λ хвилі. Графік показує, яка частина всієї енергії випромінювання припадає на хвилі певної довжини



Восени 1900 р., зіставивши всі відомі на той час результати досліджень, німецький фізик Макс Планк нарешті встановив формулу, яка повністю відповідала експериментальним кривим. Точніше, вчений цю формулу просто вгадав, він так і не зміг її вивести, спираючись на закони класичної електродинаміки Максвелла. Тому Планк був змушений висунути гіпотезу, яка суперечила класичним уявленням про природу світла.

Гіпотеза Планка:

Випромінювання електромагнітних хвиль атомами і молекулами речовини відбувається не безперервно, а дискретно, тобто окремими порціями, енергія E кожної з яких прямо пропорційна частоті ν випромінювання.

$$E = h\nu, \quad h - \text{стала Планка. } h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

2. Фотони

Планк спочатку вирішив, що світло тільки випромінюється квантами, а поширюється й поглинається безперервно. Ситуація докорінно змінилася, коли Альберт Ейнштейн (1879-1955) дійшов висновку, що монохроматичне випромінювання поводить себе так, начебто складається з $N = \frac{W}{h\nu}$ незалежних один від одного квантів енергії величиною $h\nu$ кожний. Ейнштейн

припустив, що річ не просто у квантах енергії, а в реальних частинках, з яких складається будь-яке електромагнітне випромінювання. Згодом частинки світла (кванти світла) стали називати *фотонами*.

Властивості фотонів:

1. *Заряд фотона дорівнює нулю: $q = 0$* – фотон є електрично нейтральною частинкою.
2. *Маса фотона дорівнює нулю: $m = 0$* – фотон є безмасовою частинкою. Ця властивість стосується тільки окремого фотона, а світло в цілому (як потік фотонів) має масу.
3. *Швидкість руху фотона не залежить від вибору системи відліку, завжди дорівнює швидкості поширення світла у вакуумі $(v_\phi = c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}})$* і пов'язана з частотою і довжиною відповідної світлової хвилі *формулою хвилі: $c = \lambda \nu$* .
- Зверніть увагу! Не слід плутати швидкість поширення світлової хвилі в речовині зі швидкістю руху фотона. Фотони в речовині рухаються від атома до атома, поглинаються ними і знову випромінюються.
4. *Енергія фотона* прямо пропорційна частоті електромагнітного випромінювання, квантом якого і є цей фотон: $E = h\nu$. У разі поглинання світла речовиною фотон передає всю енергію частинкам речовини.
5. *Імпульс фотона* дорівнює відношенню його енергії до швидкості руху та обернено пропорційний довжині хвилі фотона:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

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.

Наведені властивості фотонів були встановлені не відразу. На початку ХХ ст. навіть ідея існування частинок світла зустрічала різке неприйняття. Адже інтерференція і дифракція світла показували, що світло – це хвилі. Через 50 років після появи гіпотези М. Планка, коли існування фотонів уже не викликало сумнівів, А. Ейнштейн писав: «...після 50 років роздумів я так і не зміг наблизитися до відповіді на питання, що ж таке світловий квант*».

ІV. ЗАКРІПЛЕННЯ НОВИХ ЗНАНЬ І ВМІНЬ

1. Знайдіть енергію фотона інфрачервоного випромінювання, довжина хвилі якого 10 мкм.

Дано:

$$\lambda = 10 \text{ мкм} = 10 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$E = ?$$

Розв'язання

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad E = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{10 \cdot 10^{-6}} \approx 2 \cdot 10^{-20} \text{ (Дж)}$$

Відповідь: $E \approx 2 \cdot 10^{-20} \text{ Дж}$.

2. Знайдіть імпульс фотона, довжина хвилі якого 720 нм.

Дано:

$$\lambda = 720 \text{ нм} = 7,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$p = ?$$

Розв'язання

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

$$p = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{7,2 \cdot 10^{-7}} \approx 9,2 \cdot 10^{-28} \left(\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}} \right)$$

Відповідь: $p \approx 9,2 \cdot 10^{-28} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$.

3. Знайдіть частоту ультрафіолетового випромінювання, імпульс кванта якого дорівнює $3 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$.

Дано:

$$p = 3 \cdot 10^{-27} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$\nu = ?$$

Розв'язання

$$p = \frac{h\nu}{c} \Rightarrow \nu = \frac{pc}{h}$$

$$\nu = \frac{3 \cdot 10^{-27} \cdot 3 \cdot 10^8}{6,63 \cdot 10^{-34}} \approx 1,36 \cdot 10^{15} \text{ (Гц)}$$

Відповідь: $\nu \approx 1,36 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$.

4. Знайдіть довжину хвилі випромінювання, енергія фотонів якого відповідає енергії протона, що рухається зі швидкістю $4,6 \cdot 10^4 \text{ м/с}$.

Дано:

$$v = 4,6 \cdot 10^4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$\lambda = ?$$

Розв'язання

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad E = \frac{m_p v^2}{2}$$

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{m_p v^2}{2} \Rightarrow \lambda = \frac{2hc}{m_p v^2}$$

$$\lambda = \frac{2 \cdot 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{1,67 \cdot 10^{-27} \cdot (4,6 \cdot 10^4)^2} \approx 1,13 \cdot 10^{-7} \text{ (м)}$$

Відповідь: $\lambda \approx 1,13 \cdot 10^{-7} \text{ м}$.

5. Світло потужністю 0,5 кВт із довжиною хвилі 20 нм падає перпендикулярно до поверхні. Скільки фотонів щосекунди падає на цю поверхню?

Дано:

$$P = 0,5 \text{ кВт} = 500 \text{ Вт}$$

$$\lambda = 20 \text{ нм} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ м}$$

$$t = 1 \text{ с}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$N = ?$$

Розв'язання

Потужність випромінювання: $P = \frac{W}{t}$

Сумарна енергія випромінювання фотонів: $W = NE$

Енергія одного фотона:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$$P = \frac{N \cdot \frac{hc}{\lambda}}{t} = \frac{Nhc}{\lambda t} \Rightarrow N = \frac{P\lambda t}{hc}$$

$$N = \frac{500 \cdot 2 \cdot 10^{-8} \cdot 1}{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8} \approx 5 \cdot 10^{19}$$

Відповідь: $N \approx 5 \cdot 10^{19}$.

6. Яку енергію має приносити світлове випромінювання на кожний квадратний міліметр абсолютно чорної поверхні за секунду, щоб світловий тиск на неї становив 1 Па?

Дано:

$$S = 1 \text{ мм}^2 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

$$p_{\text{тиск}} = 1 \text{ Па}$$

$$t = 1 \text{ с}$$

Розв'язання

Тиск, який чинить світлове випромінювання на поверхню $p_{\text{тиск}}$

, будемо шукати за наступною формулою:

$$p_{\text{тиск}} = \frac{F}{S}$$

Силу тиску світлового випромінювання на поверхню F будемо знаходити з другого закону Ньютона, записаного в загальному вигляді:

$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$	$F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$
$W - ?$	Загальна зміна імпульсу пучка дорівнює: $\Delta p = \frac{W}{c}$ $F = \frac{W}{ct} \quad p_{\text{тиск}} = \frac{W}{Sct} \Rightarrow W = p_{\text{тиск}} Sct$ $W = 1 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 1 = 300 \text{ (Дж)}$ Відповідь: $W = 300 \text{ Дж.}$

7. На кожний квадратний сантиметр поверхні, що повністю відбиває світло, щосекунди падає $4 \cdot 10^{18}$ фотонів з довжиною хвилі 600 нм. Який тиск на поверхню створює це випромінювання?

Дано: $S = 1 \text{ см}^2 = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ $t = 1 \text{ с}$ $N = 4 \cdot 10^{18}$ $\lambda = 600 \text{ нм} = 6 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$	Розв'язання Тиск, який чинить світлове випромінювання на поверхню $p_{\text{тиск}}$, будемо шукати за наступною формулою: $p_{\text{тиск}} = \frac{F}{S}$ Силу тиску світлового випромінювання на поверхню F будемо знаходити з другого закону Ньютона, записаного в загальному вигляді: $F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$ Загальна зміна імпульсу пучка дорівнює: $\Delta p = Np_0$ Із законів збереження енергії та імпульсу випливає, що імпульс фотона при його повному відбиванні: $p_0 = \frac{2h}{\lambda}$ $p_{\text{тиск}} = \frac{\frac{N \cdot 2h}{\lambda}}{S} = \frac{2Nh}{\lambda St}$ $p = \frac{2 \cdot 4 \cdot 10^{18} \cdot 6,63 \cdot 10^{-34}}{6 \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 10^{-4} \cdot 1} \approx 88 \cdot 10^{-6} \text{ (Па)}$ Відповідь: $p \approx 88 \text{ мкПа.}$
$p_{\text{тиск}} - ?$	

V. ПІДБИТТЯ ПІДСУМКІВ УРОКУ

Бесіда за питаннями

1. Що таке абсолютно чорне тіло?
2. Як пов'язані температура тіла, довжина світлової хвилі та енергія, яку випромінює тіло?
3. У чому полягає гіпотеза М. Планка?
4. Як розрахувати енергію кванта випромінювання?
5. Що таке фотон? Які властивості він має?

VI. ДОМАШНЄ ЗАВДАННЯ

Повторити § 33, Вправа № 33 (2, 4)

Додаткові задачі

1. Знайдіть частоту випромінювання, енергія фотонів якого дорівнює $6,4 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$

Дано: $E = 6,4 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$	Розв'язання $E = h\nu \Rightarrow \nu = \frac{E}{h} \quad \nu = \frac{6,4 \cdot 10^{-19}}{6,63 \cdot 10^{-34}} \approx 9,7 \cdot 10^{14} \text{ (Гц)}$ Відповідь: $\nu \approx 9,7 \cdot 10^{14} \text{ Гц.}$
--	---

ν – ?	
2. Знайдіть імпульс фотона із частотою $5 \cdot 10^{14}$ Гц. Дано: $\nu = 5 \cdot 10^{14}$ Гц $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с	Розв'язання $p = \frac{h\nu}{c}$ $p = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 5 \cdot 10^{14}}{3 \cdot 10^8} \approx 1,1 \cdot 10^{-27} \left(\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}} \right)$ Відповідь: $p \approx 1,1 \cdot 10^{-27} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$.
p – ?	

3. Знайдіть імпульс фотона, енергія якого дорівнює 1 МеВ. Дано: $E = 1 \text{ МеВ} = 1,6 \cdot 10^{-13}$ Дж $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$	Розв'язання $p = \frac{E}{c}$ $p = \frac{1,6 \cdot 10^{-13}}{3 \cdot 10^8} \approx 5,33 \cdot 10^{-22} \left(\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}} \right)$ Відповідь: $p \approx 5,33 \cdot 10^{-22} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$.
p – ?	

4. Довжина світлової хвилі у воді дорівнює 500 нм. Визначте довжину цієї світлової хвилі в повітрі. Дано: $\lambda_1 = 500 \text{ нм} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ $n_1 = 1,33$ $n_2 = 1$	Розв'язання Формула хвилі: $\nu_1 = \lambda_1 \nu$ $\nu_2 = \lambda_2 \nu$ $\frac{\nu_1}{\nu_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$ $\frac{\nu_1}{\nu_2} = \frac{n_2}{n_1}$ $\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \lambda_2 = \lambda_1 \frac{n_1}{n_2}$ $\lambda_2 = 500 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{1,33}{1} = 665 \cdot 10^{-9} \text{ (м)}$ Відповідь: $\lambda_2 = 665 \text{ нм}$.
λ_2 – ?	

5. Швидкість поширення фіолетового світла із частотою $7,5 \cdot 10^{14}$ Гц у воді дорівнює $2,23 \cdot 10^8$ м/с. Як змінюються частота й довжина світлової хвилі при переході з води у вакуум? Дано: $\nu = 7,5 \cdot 10^{14}$ Гц $\nu_1 = 2,23 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ $\nu_2 = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$	Розв'язання Формула хвилі: $\nu_1 = \lambda_1 \nu$ $\nu_2 = \lambda_2 \nu$ ν – частота світла, що не змінюється під час переходу світла з одного середовища в інше. $\lambda_1 = \frac{\nu_1}{\nu} \quad \lambda_2 = \frac{\nu_2}{\nu}$ $\Delta \lambda = \frac{1}{\nu} (\nu_2 - \nu_1) \quad \Delta \lambda = \frac{1}{7,5 \cdot 10^{14}} \cdot (3 \cdot 10^8 - 2,23 \cdot 10^8) \approx 1,03 \cdot 10^{-7} \text{ (м)}$ Відповідь: $\Delta \lambda \approx 1,03 \cdot 10^{-7} \text{ м}$.
$\Delta \lambda$ – ?	

6. Знайдіть частоту квантів випромінювання, які мають таку саму енергію, що й електрон, що пройшов зі стану спокою прискорювальну різницю потенціалів 50 В.

Дано:

$$\Delta\varphi = 50 \text{ В}$$

$$e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$$

$$\nu - ?$$

Розв'язання

$$E = h\nu \quad E = |e|\Delta\varphi$$

$$h\nu = |e|\Delta\varphi \Rightarrow \nu = \frac{|e|\Delta\varphi}{h}$$

$$\nu = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 50}{6,63 \cdot 10^{-34}} \approx 1,2 \cdot 10^{16} \text{ (Гц)}$$

Відповідь: $\nu \approx 1,2 \cdot 10^{16} \text{ Гц}$.

7. Монохроматичне джерело світла потужністю 500 Вт випускає 10^{21} фотонів за секунду. Знайдіть середню довжину хвилі випромінювання.

Дано:

$$P = 500 \text{ Вт}$$

$$N = 10^{21}$$

$$t = 1 \text{ с}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$$

$$\lambda - ?$$

Розв'язання

$$\text{Потужність випромінювання: } P = \frac{W}{t}$$

$$\text{Сумарна енергія випромінювання фотонів: } W = NE$$

$$\text{Енергія одного фотона:}$$

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$$P = \frac{N \cdot \frac{hc}{\lambda}}{t} = \frac{Nhc}{\lambda t} \Rightarrow \lambda = \frac{Nhc}{Pt}$$

$$\lambda = \frac{10^{21} \cdot 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{500 \cdot 1} \approx 4 \cdot 10^{-7} \text{ (м)}$$

Відповідь: $\lambda \approx 400 \text{ нм}$.

8. Знайдіть імпульс фотона, довжина хвилі якого 700 нм, при його повному поглинанні й повному відбиванні поверхнею.

Дано:

$$\lambda = 700 \text{ нм} = 7 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$$

$$p_{\text{погл}} - ?$$

$$p_{\text{відб}} - ?$$

Розв'язання

Із законів збереження енергії та імпульсу випливає, що імпульс фотона:

$$\text{- при його повному поглинанні: } p_{\text{погл}} = \frac{h}{\lambda}$$

$$\text{- при його повному відбиванні: } p_{\text{відб}} = \frac{2h}{\lambda}$$

$$p_{\text{погл}} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{7 \cdot 10^{-7}} \approx 0,95 \cdot 10^{-27} \left(\frac{\text{кг}\cdot\text{м}}{\text{с}} \right)$$

$$p_{\text{відб}} = \frac{2 \cdot 6,63 \cdot 10^{-34}}{7 \cdot 10^{-7}} \approx 1,9 \cdot 10^{-27} \left(\frac{\text{кг}\cdot\text{м}}{\text{с}} \right)$$

Відповідь: $p_{\text{погл}} \approx 0,95 \cdot 10^{-27} \frac{\text{кг}\cdot\text{м}}{\text{с}}; p_{\text{відб}} \approx 1,9 \cdot 10^{-27} \frac{\text{кг}\cdot\text{м}}{\text{с}}$.

9. На кожний квадратний дециметр поверхні, що повністю поглинає світло, щосекунди падає $5 \cdot 10^{20}$ фотонів з довжиною хвилі 700 нм. Який тиск на поверхню створює це випромінювання?

Дано:

$$S = 1 \text{ дм}^2 = 1 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$$

$$N = 5 \cdot 10^{20}$$

$$t = 1 \text{ с}$$

$$\lambda = 700 \text{ нм} = 7 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

Розв'язання

Тиск, який чинить світлове випромінювання на поверхню $p_{\text{тиск}}$, будемо шукати за наступною формулою:

$$p_{\text{тиск}} = \frac{F}{S}$$

Силу тиску світлового випромінювання на поверхню F будемо знаходити з другого закону Ньютона, записаного в загальному вигляді:

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$$

$$p_{\text{тиск}} - ?$$

Загальна зміна імпульсу пучка дорівнює: $\Delta p = Np_0$

Із законів збереження енергії та імпульсу випливає, що імпульс фотона при його повному поглинанні:

$$p_0 = \frac{h}{\lambda}$$

$$p_{\text{тиск}} = \frac{\frac{N \cdot h}{\lambda}}{S} = \frac{Nh}{\lambda St}$$

$$p_{\text{тиск}} = \frac{5 \cdot 10^{20} \cdot 6,63 \cdot 10^{-34}}{7 \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 10^{-2} \cdot 1} \approx 47 \cdot 10^{-6} \text{ (Па)}$$

Відповідь: $p_{\text{тиск}} \approx 47 \text{ мкПа}$.

10. Скільки фотонів з довжиною хвилі 550 нм падає на кожний квадратний міліметр абсолютно чорної поверхні за секунду, якщо це випромінювання створює тиск 1 Па?

Дано:

$$\lambda = 550 \text{ нм} = 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$S = 1 \text{ мм}^2 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

$$t = 1 \text{ с}$$

$$p_{\text{тиск}} = 1 \text{ Па}$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

Розв'язання

Тиск, який чинить світлове випромінювання на поверхню $p_{\text{тиск}}$, будемо шукати за наступною формулою:

$$p_{\text{тиск}} = \frac{F}{S}$$

Силу тиску світлового випромінювання на поверхню F будемо знаходити з другого закону Ньютона, записаного в загальному вигляді:

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$$

Загальна зміна імпульсу пучка дорівнює: $\Delta p = Np_0$

Із законів збереження енергії та імпульсу випливає, що імпульс фотона при його повному поглинанні:

$$p_0 = \frac{h}{\lambda}$$

$$p_{\text{тиск}} = \frac{\frac{N \cdot h}{\lambda}}{S} = \frac{Nh}{\lambda St} \Rightarrow N = \frac{p \lambda St}{h}$$

$$N = \frac{1 \cdot 5,5 \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 10^{-6} \cdot 1}{6,63 \cdot 10^{-34}} \approx 8,3 \cdot 10^{20}$$

Відповідь: $N \approx 8,3 \cdot 10^{20}$.

11. Сонячні промені протягом року приносять на Землю $5,4 \cdot 10^{24}$ Дж енергії. На скільки змінилася б маса Землі за рік, якби планета цю енергію не випромінювала в простір?

Дано:

$$\Delta E = 5,4 \cdot 10^{24} \text{ Дж}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\Delta m - ?$$

Розв'язання

$$\Delta E = \Delta mc^2 \Rightarrow \Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}$$

$$\Delta m = \frac{5,4 \cdot 10^{24}}{(3 \cdot 10^8)^2} = 6 \cdot 10^7 \text{ (кг)}$$

Відповідь: $\Delta m = 6 \cdot 10^7 \text{ кг}$.

12. Знайдіть, при якій температурі середня кінетична енергія поступального руху молекул ідеального газу дорівнює енергії фотонів рентгенівських променів з довжиною хвилі 10^{-10} м.

Дано:

$$\lambda = 1 \cdot 10^{-10} \text{ м}$$

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$T = ?$$

Розв'язання

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad E = \frac{3}{2} kT$$

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{3}{2} kT \quad \Rightarrow \quad T = \frac{2hc}{3\lambda k}$$

$$T = \frac{2 \cdot 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{3 \cdot 1 \cdot 10^{-10} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23}} \approx 9,6 \cdot 10^7 \text{ (К)}$$

Відповідь: $T \approx 9,6 \cdot 10^7 \text{ К}$.

13. Знайдіть довжину хвилі, що відповідає середній квадратичній швидкості молекули Водню при температурі 20°C .

Дано:

$$T = (20 + 273)\text{К} = 293 \text{ К}$$

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$\lambda = ?$$

Розв'язання

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad E = \frac{3}{2} kT$$

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{3}{2} kT \quad \Rightarrow \quad \lambda = \frac{2hc}{3kT}$$

$$\lambda = \frac{2 \cdot 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293} \approx 3,3 \cdot 10^{-5} \text{ (м)}$$

Відповідь: $\lambda \approx 3,3 \cdot 10^{-5} \text{ м}$.

14. У скільки разів енергія фотона з довжиною хвилі 550 нм більша за середню кінетичну енергію поступального руху молекули Кисню при температурі 17°C ?

Дано:

$$\lambda = 550 \text{ нм} = 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$T = (17 + 273)\text{К} = 290 \text{ К}$$

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$\frac{E_\phi}{E_k} = ?$$

Розв'язання

$$E_\phi = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad E_k = \frac{3}{2} kT$$

$$\frac{E_\phi}{E_k} = \frac{\frac{hc}{\lambda}}{\frac{3}{2} kT} = \frac{2hc}{3\lambda kT}$$

$$\frac{E_\phi}{E_k} = \frac{\frac{hc}{\lambda}}{\frac{3}{2} kT} = \frac{2 \cdot 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{3 \cdot 5,5 \cdot 10^{-7} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 290} \approx 60$$

Відповідь: $\frac{E_\phi}{E_k} \approx 60$.

15. Знайдіть масу фотона, імпульс якого дорівнює імпульсу молекули Водню при температурі 20°C .

Дано:

$$T = (20 + 273)\text{К}$$

$$= 293 \text{ К}$$

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

Розв'язання

$$\text{Імпульс фотона: } p_\phi = m_\phi c$$

$$\text{Імпульс молекули Водню: } p_B = m_B \bar{v}_{\text{КВ}}$$

Середня квадратична швидкість молекули Водню:

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$

$$m_\phi - ?$$

$$\bar{v}_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_{\text{в}}}}$$

Маса молекули Водню:

$$m_{\text{в}} = \frac{M}{N_A}$$

Молекулярна маса Водню:

$$M = 2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

За умовою: $p_\phi = p_{\text{в}}$

$$m_\phi c = \frac{M}{N_A} \cdot \sqrt{\frac{3kT}{\frac{M}{N_A}}}$$

$$m_\phi = \frac{M}{N_A c} \cdot \sqrt{\frac{3kTN_A}{M}} = \sqrt{\frac{3kTN_A}{M}} \cdot \left(\frac{M}{N_A c}\right)^2 = \sqrt{\frac{3kTM}{N_A c^2}}$$

$$m_\phi = \sqrt{\frac{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{6,02 \cdot 10^{23} \cdot (3 \cdot 10^8)^2}} \approx 2,1 \cdot 10^{-32} \text{ (кг)}$$

Відповідь: $m_\phi \approx 2,1 \cdot 10^{-32} \text{ кг}$.

16. Знайдіть довжину хвилі фотона, імпульс якого дорівнює імпульсу молекули Кисню при температурі 27 °С.

Дано:

$$T = (27 + 273)\text{К} = 300 \text{ К}$$

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$

$$\lambda - ?$$

Розв'язання

$$\text{Імпульс фотона: } p_\phi = \frac{h}{\lambda}$$

$$\text{Імпульс молекули Кисню: } p_{\text{к}} = m_{\text{к}} \bar{v}_{\text{кв}}$$

Середня квадратична швидкість молекули Кисню:

$$\bar{v}_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_{\text{к}}}}$$

Маса молекули Кисню:

$$m_{\text{к}} = \frac{M}{N_A}$$

Молекулярна маса Кисню:

$$M = 32 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

За умовою: $p_\phi = p_{\text{к}}$

$$\frac{h}{\lambda} = \frac{M}{N_A} \cdot \sqrt{\frac{3kT}{\frac{M}{N_A}}}$$

$$\frac{h}{\lambda} = \sqrt{\frac{3kTM}{N_A}} \Rightarrow \lambda = h \sqrt{\frac{N_A}{3kTM}}$$

$$\lambda = 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot \sqrt{\frac{6,02 \cdot 10^{23}}{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293 \cdot 32 \cdot 10^{-3}}} \approx 2,6 \cdot 10^{-11} \text{ (м)}$$

Відповідь: $\lambda \approx 2,6 \cdot 10^{-11} \text{ м.}$