

**УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

**ФАКУЛЬТЕТ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСАМИ ПЕРЕВЕЗЕНЬ**

**Кафедра вищої математики та фізики**

**КВАНТОВА ОПТИКА.  
АТОМНА І ЯДЕРНА ФІЗИКА**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
до практичних занять з дисципліни**

***«ФІЗИКА»***

**Частина 3**

**Харків 2021**

Методичні вказівки розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри вищої математики та фізики 09 лютого 2021 р., протокол № 2.

Призначені для проведення практичних занять зі студентами УкрДУЗТ, а також можуть використовуватись для самостійної підготовки до занять і модульного оцінювання знань з теми «Квантова оптика. Атомна і ядерна фізика».

Укладачі:

доценти К. А. Котвицька,  
А. Т. Котвицький,  
О. В. Самойлов

Рецензент

доц. В. Ю. Гресь

## ЗМІСТ

Вступ.....	5
ТЕМА 1.1. Квантова природа випромінювання.....	5
Основні теми розділу.....	5
1.1.1 Теплове випромінювання та його характеристики.....	5
1.1.2 Класифікація тіл.....	7
1.1.3 Закон Кірхгофа. Закони Стефана-Больцмана та зміщення Віна.....	8
1.1.4 Формула Релея-Джинса і формула Планка.....	10
1.1.5 Оптична пірометрія.....	11
Приклади розв'язання задач.....	12
Задачі до самостійного розв'язування.....	18
ТЕМА 1.2. Фотоефект. Тиск світла. Ефект Комптона.....	19
Основні теми розділу.....	19
1.2.1 Види фотоелектричного ефекту.....	20
1.2.2 Закони зовнішнього фотоефекту.....	20
1.2.3 Рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоефекту.....	21
1.2.4 Маса та імпульс фотона.....	22
1.2.5 Тиск світла. Ефект Комптона.....	23
Приклади розв'язання задач.....	24
Задачі до самостійного розв'язування.....	30
ТЕМА 2.1. Будова та властивості атомного ядра.....	31
Основні теми розділу.....	31
2.1.1 Заряд, розмір і склад атомного ядра.....	32
2.1.2 Масове та зарядове числа. Ізотопи.....	32
2.1.3 Поняття про властивості і природу ядерних сил.....	33
2.1.4 Дефект маси та енергія зв'язку в ядрі.....	34
Приклади розв'язання задач.....	
Задачі до самостійного розв'язування.....	40
ТЕМА 2.2. Радіоактивність. Ядерні реакції.....	40
Основні теми розділу.....	40
2.2.1 Природна і штучна радіоактивність.....	41
2.2.2 Закон радіоактивного розпаду. Період напіврозпаду.....	41
2.2.3 Типи радіоактивного розпаду. Основні характеристики $\alpha$ - і $\beta$ -розпадів.....	42
2.2.4 Поняття про ядерні реакції. Закони збереження в ядерних реакціях.....	44

2.2.5 Проходження гамма-випромінювання через речовину....	45
Приклади розв'язання задач.....	46
Задачі до самостійного розв'язування.....	49
Список літератури.....	51
Додаток А.....	52

## ВСТУП

Методичні вказівки до практичних занять з фізики складено для студентів всіх освітніх програм. Кожна окрема тема даної роботи супроводжується короткими теоретичними відомостями, прикладами розв'язування задач, приведеними задачами для самостійного опрацювання.

У першу чергу методичні вказівки призначені для організації та проведення практичних занять з курсу фізики студентами УкрДУЗТ. Велика кількість і різноманітність задач дозволяє організовувати самостійну та індивідуальну роботу студентів. Це дає змогу студентам більш ретельно підготуватися до модульного оцінювання знань з теми «Квантова оптика. Атомна і ядерна фізика».

### ТЕМА 1.1. Квантова природа випромінювання

#### *Основні теми розділу*

Теплове випромінювання та його характеристики. Класифікація тіл. Закон Кірхгофа. Закони Стефана-Больцмана і зміщення Віна. Формула Релея-Джинса та Планка. Оптична пірометрія.

#### 1.1.1 Теплове випромінювання та його характеристики

**Квантова фізика** – розділ фізики, що вивчає явища пов'язані з дискретним характером випромінювання. До них належать теплове випромінювання, фотоефект, ефект Комптона, тиск світла.

**Тепловим випромінюванням** називається випромінювання електромагнітних хвиль нагрітими тілами за рахунок їх внутрішньої енергії [8].

#### *Основні властивості:*

- 1 Теплове випромінювання є рівноважним.
- 2 Теплове випромінювання притаманне всім тілам при температурі вище 0 К (-273°C).
- 3 Теплове випромінювання має суцільний спектр частот, максимум якого не залежить від температури.

4 При високих температурах випромінюються короткі хвилі (ультрафіолетові, видимі хвилі).

5 При низьких температурах випромінюються довгі хвилі (інфрачервоні).

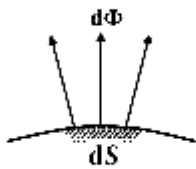
*Основні характеристики теплового випромінювання [8]*

**Потік випромінювання** - скалярна фізична величина, яка дорівнює кількості енергії, що випромінюється нагрітим тілом з поверхні в одиницю часу.

$$\Phi = \frac{dW}{dt}, \quad \Phi = \frac{W}{t}, \quad (1.1.1)$$

$$[\Phi] = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \text{Вт}.$$

**Енергетична світність тіла** – енергія, яку випромінює нагріте тіло в одиницю часу з одиниці площі в усьому інтервалі довжин хвиль ( $0 < \lambda < \infty$ ) (рисунок 1.1).



$$R_T = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{d^2W}{dSdt}, \quad R_T = \frac{W}{S \cdot t} = \frac{N}{S},$$

$$[R_T] = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}. \quad (1.1.2)$$

Рисунок 1.1

Потік випромінювання та енергетична світність залежать від температури.

**Спектральна густина енергетичної світності** (випромінювальна здатність) – кількість енергії, що випромінюється з одиниці площі за одиницю часу в одиничному інтервалі довжин хвиль.

$$r_{\lambda,T} = \frac{dR_T}{d\lambda}. \quad (1.1.3)$$

Зі співвідношення (1.1.3) можна знайти енергетичну світність (формула зв'язку між енергетичною світністю і випромінювальною здатністю):

$$R_T = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda, \quad (1.1.4)$$

$$[r_{\lambda,T}] = \frac{Вт}{М^3}.$$

Всі тіла в той чи інший спосіб поглинають енергію падаючих електромагнітних хвиль.

**Поглинальна здатність** (коефіцієнт поглинання) тіла  $a_{\lambda,T}$  – безрозмірна фізична величина, що показує, яка частка енергії, що падає в одиницю часу на одиницю поверхні тіла в інтервалі довжин хвиль від  $\lambda$  до  $\lambda+d\lambda$ , ним поглинається.

$$a_{\lambda,T} = \frac{dW_{\text{погл}}}{dW_{\text{пад}}}, \quad [a_{\lambda,T}] = 1. \quad (1.1.5)$$

Випромінювальна та поглинальна здатності тіл залежать від довжини хвиль, що випромінюються і поглинаються, температури тіла, його хімічного складу та стану поверхні.

### 1.1.2 Класифікація тіл

**Абсолютно чорним** тілом називається тіло, яке повністю поглинає всю енергію падаючих на нього електромагнітних хвиль незалежно від частоти [5].

$$a_{\lambda,T}^* = 1. \quad (1.1.6)$$

Абсолютно чорне тіло – це модель, всі реальні тіла не є абсолютно чорними. Але деякі тіла в певному інтервалі частот наближаються за своїми властивостями до абсолютно чорного тіла.

Тіло, поглинальна здатність якого менше одиниці, але однакова для всіх довжин хвиль і залежить лише від температури матеріалу та стану поверхні, називається **сірим** [5].

$$a_{\lambda,T} = \text{const} < 1. \quad (1.1.7)$$

Загальну енергію падаючого випромінювання можна записати у вигляді

$$dW_{\text{пад}} = dW_{\text{погл}} + dW_{\text{випром}}, \quad (1.1.8)$$

де  $dW_{\text{погл}}$  - відбита енергія;

$dW_{\text{випром}}$  - поглинальна енергія випромінювання.

Якщо розділити формулу (1.1.8) на множник  $dW_{\text{пад}}$ , отримаємо

$$1 = a_{\lambda, T} + \rho_{\lambda, T}, \quad (1.1.9)$$

де  $\rho_{\lambda, T} = \frac{dW_{\text{випром}}}{dW_{\text{пад}}}$  - випромінювальна здатність (коефіцієнт випромінювання).

**Випромінювальна здатність** (коефіцієнт випромінювання) тіла - фізична величина, що показує, яка частка енергії електромагнітних хвиль, що падає на тіло, випромінюється. Випромінювальна здатність залежить від властивостей речовини та спектральної здатності падаючого випромінювання [5]. Для реальних тіл

$$0 < a_{\lambda, T} < 1 \quad \text{та} \quad 0 < \rho_{\lambda, T} < 1. \quad (1.1.10)$$

Тіло, що повністю відбиває випромінювання всіх довжин хвиль, називається абсолютно **білим** [5].

$$a_{\lambda, T} = 0 \quad \text{та} \quad \rho_{\lambda, T} = 1. \quad (1.1.11)$$

### 1.1.3 Закон Кірхгофа. Закони Стефана-Больцмана та зміщення Віна

**Закон Кірхгофа:** відношення випромінювальної здатності тіла до його поглинальної здатності при даній довжині хвилі і температурі не залежить від природи тіла та є для всіх тіл універсальною функцією довжини хвилі і температури  $r_{\lambda, T}^*$  [1].



$$\left( \frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} \right)_{1\text{-тіла}} = \left( \frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} \right)_{2\text{-тіла}} = \dots = r_{\lambda,T}^*, \quad (1.1.12)$$

де  $r_{\lambda,T}$  – випромінювальна здатність;

$a_{\lambda,T}$  – поглинальна здатність.

Якщо тіло не поглинає електромагнітні хвилі деякої частоти, то воно їх і не випромінює.

$$a_{\lambda,T} = 0, \quad r_{\lambda,T} = 0. \quad (1.1.13)$$

*Наслідки [1]:*

1 Випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла є універсальною функцією частоти і температури.

2 При даній частоті та температурі випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла максимальна.

3 Для будь-якого сірого тіла  $r_{\lambda,T} = r_{\lambda,T}^* a$ .

4 При даній температурі тіло здатне випромінювати тільки ті частоти, які здатне поглинати.

**Закон Стефана-Больцмана:** Енергетична світність абсолютно чорного тіла пропорційна четвертому степеню його абсолютної температури [3].

$$R_T^* = \sigma T^4, \quad (1.1.14)$$

де  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}^4}$  – стала Стефана-Больцмана;

$T$  – абсолютна температура.

Для сірого тіла

$$R_T = k \sigma T^4, \quad (1.1.15)$$

де  $k$  – поглинальна здатність тіла, яка визначається відношенням поглинутої енергії до падаючої.

**Закон зміщення Віна:** довжина хвилі, яка відповідає максимальному значенню спектральної густини енергетичної світності абсолютно чорного тіла, обернено пропорційна абсолютній температурі [3].

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \quad (1.1.16)$$

де  $\lambda_{\max}$  – довжина хвилі, на якій енергія випромінювання абсолютно чорного тіла досягає максимуму;

$b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$  – стала Віна.

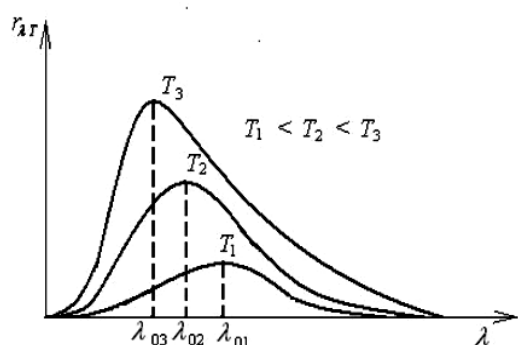


Рисунок 1.2

Із закону Віна видно, що при збільшенні температури чорного тіла максимум спектральної густини зміщується в область коротких довжин хвиль (рисунок 1.2). Значення максимуму спектральної густини абсолютно чорного тіла можна знайти з другого закону Віна.

**Другий закон Віна:** максимальне значення спектральної густини енергетичної світності абсолютно чорного тіла при даній температурі зростає пропорційно п'ятому степеню абсолютної температури [3].

$$(r_{\lambda, T}^*)_{\max} = \gamma T^5, \quad (1.1.17)$$

де  $\gamma = 1,29 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}^5}$  – постійна Віна.

#### 1.1.4 Формула Релея-Джинса і формула Планка

Пояснити закономірності теплового випромінювання на основі законів класичної фізики (формула Релея-Джинса) закінчилися невдачею, тому в 1900 році М. Планк розробив квантову гіпотезу теплового випромінювання. За гіпотезою Планка, світло випромінюється, поширюється та поглинається не

безперервно, а окремими порціями енергії, які називаються **квантами**.

Енергія одного кванта

$$E = h\nu = h\frac{c}{\lambda}, \quad (1.1.18)$$

де  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – стала Планка;

$\nu$  – частота випромінювання;

$\lambda$  – довжина хвилі;

$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  – швидкість світла.

На основі своєї гіпотези М. Планку вдалося знайти правильний вираз для функції Кірхгофа, тобто отримати формулу для розрахунку випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла у вигляді

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT, \quad (1.1.19)$$

де  $T$  – абсолютна температура;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – стала Больцмана.

### 1.1.5 Оптична пірометрія

**Оптичною пірометрією** називається сукупність методів вимірювання високих температур, оснований на використанні залежності спектральної густини енергетичної світності, або енергетичної світності досліджуваного тіла від температури [8]. Прилади, що застосовуються для цієї мети, називаються оптичними *пірометрами*.

**Радіаційна температура** – це температура чорного тіла, при якій його енергетична світність дорівнює енергетичній світності тіла  $R_T$  [9].

$$T_p = \sqrt[4]{\frac{R_T}{\sigma}} = \sqrt[4]{kT_\delta}, \quad (1.1.20)$$

де  $T_\delta$  – дійсна температура,  $T_\delta < T_p$ .

**Колірна температура** - це температура чорного тіла, при якій розподіл енергії у спектрі випромінювання даного тіла співпадає з енергією абсолютно чорного тіла, при такій самій температурі [9].

$$T_k = \frac{b_1}{\lambda_{\max}}, \quad (1.1.21)$$

для сірих тіл  $T_k = T_p$ .

## ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

**Приклад 1.1.1.** Яку енергію випромінює АЧТ (абсолютно чорне тіло) у формі куба з ребром 2 см за 1 хв, якщо довжина хвилі, на яку припадає максимум спектральної густини випромінювання, дорівнює 8 мкм?

Дано:	СІ:	Розв'язок:
$a = 2 \text{ см}$	$= 2 \text{ м}$	З закону Стефана-Больцмана для абсолютно чорного тіла (АЧТ)
$t = 1 \text{ хв}$	$= 60 \text{ с}$	
$\lambda_{\max} = 8 \text{ мкм}$	$= 8 \cdot 10^{-6} \text{ м}$	
$W - ?$		$R_T^* = \sigma T^4.$

З визначення енергетичної світності тіла

$$R_T = \frac{W}{S \cdot t},$$

тоді  $\frac{W}{S \cdot t} = \sigma T^4,$

де  $S = 6a^2$  - площа куба.

З закону Віна

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \quad T = \frac{b}{\lambda_{\max}}.$$

Енергетична світність

$$R_T = \frac{W}{6a^2 \cdot t} = \sigma \left( \frac{b}{\lambda_{\max}} \right)^4,$$

звідки

$$W = 6a^2 \cdot t \cdot \sigma \left( \frac{b}{\lambda_{\max}} \right)^4.$$

Перевірка розмірності

$$W = \text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4} \cdot \left( \frac{\text{м} \cdot \text{К}}{\text{м}} \right)^4 = \text{Вт} \cdot \text{с} = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} \cdot \text{с} = \text{Дж}.$$

Підставимо числові значення

$$W = 6 \cdot 0,02^2 \cdot 60 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \left( \frac{2,89 \cdot 10^{-3}}{8 \cdot 10^{-6}} \right)^4 = 139 \text{ Вт}.$$

Відповідь:  $W = 139 \text{ Вт}$ .

**Приклад 1.1.2.** Знайти площу поверхні вольфрамової спіралі 25-ватної лампи при температурі  $T = 2450 \text{ К}$ , якщо відношення енергетичної світності спіралі до енергетичної світності АЧТ при даній температурі дорівнює  $k = 0,3$ .

Дано:

$$N = 25 \text{ Вт}$$

$$T = 2450 \text{ К}$$

$$k = 0,3$$

$$S = ?$$

Розв'язок:

З закону Стефана-Больцмана для сірих тіл

$$R_T = k\sigma T^4,$$

де  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$  – стала Стефана-Больцмана;

$k$  – коефіцієнт сірості.

З визначення енергетичної світності тіла

$$R_T = \frac{N}{S}.$$

Прирівнюємо формули

$$\frac{N}{S} = k\sigma T^4,$$

звідки

$$S = \frac{N}{k\sigma T^4}.$$

Перевірка розмірності

$$[S] = \frac{\frac{\text{Вт}}{\text{Вт}}}{\frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}{\text{м}^2}} = \text{м}^2.$$

Підставимо числові значення

$$S = \frac{25}{0,3 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (2,45 \cdot 10^3)^4} = 0,41 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 = 0,41 \text{ см}^2.$$

Відповідь:  $S = 0,41 \text{ см}^2$ .

**Приклад 1.1.3.** Знайти початкову та кінцеву температури тіла, якщо температура абсолютно чорного тіла збільшилась у 2 рази. При чому довжина хвилі, на яку приходиться максимум спектральної густини енергетичної світності, змінилася на 0,6 мкм.

Дано:

$$T_2 = 2T_1$$

$$\Delta\lambda = 0,6 \text{ мкм} = 0,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

$$T_2 - ? T_1 - ?$$

Розв'язок:

Із законів Стефана-Больцмана та Віна

$$R_T^* = \sigma T^4,$$

$$\lambda = \frac{b}{T}.$$

Запишемо формули енергетичних станів для температур  $T_1$  і

$T_2$ :

$$R_1^* = \sigma T_1^4 = \sigma \left( \frac{b}{\lambda_1} \right)^4, \quad R_2^* = \sigma T_2^4 = \sigma \left( \frac{b}{\lambda_2} \right)^4.$$

Збільшення енергетичної світності

$$\frac{R_2^*}{R_1^*} = \frac{\sigma T_2^4}{\sigma T_1^4} = \frac{\left( \frac{b}{\lambda_{2\max}} \right)^4}{\left( \frac{b}{\lambda_{1\max}} \right)^4} = \left( \frac{\lambda_{1\max}}{\lambda_{2\max}} \right)^4.$$

Зміна довжини хвилі

$$\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2,$$

звідки

$$\lambda_2 = \lambda_1 - \Delta\lambda.$$

Проведемо скорочення у формулі

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \Delta\lambda} = 2,$$

звідки

$$\begin{aligned} 2(\lambda_1 - \Delta\lambda) &= \lambda_1, \\ 2\lambda_1 - 2\Delta\lambda &= \lambda_1. \end{aligned}$$

Знайдемо довжину хвилі і температуру в першому стані:

$$\lambda_1 = 2\Delta\lambda = 2 \cdot 0,6 \cdot 10^{-6} = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ м},$$

$$T = \frac{b}{\lambda_1} = \frac{2,89 \cdot 10^{-3}}{1,2 \cdot 10^{-6}} = 2408 \text{ К}.$$

Температура тіла в другому стані

$$T_2 = 2 \cdot 2408 = 4816 \text{ К.}$$

Відповідь:  $T_1 = 2408 \text{ К}$ ,  $T_2 = 4816 \text{ К}$ .

**Приклад 1.1.4.** З кожних  $10 \text{ см}^2$  АЧТ випромінюється потужність  $1,5 \text{ кВт}$ . Знайти масу фотона, довжина хвилі якого припадає на максимум спектральної густини енергетичної світності.

Дано $N =$ $1,5 \text{ кВт} = 1,5 \cdot 10^3 \text{ Вт}$ $S = 10 \text{ см}^2 = 10^{-3} \text{ м}^2$ $\lambda_{\phi} = \lambda_m$	Розв'язок: З визначення енергетичної світності $R_T = \frac{N}{S}.$ Підставимо числові значення $R_{\phi} = \frac{1,5 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^{-4}} = 150 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$
$m - ?$	

З формули закону Стефана-Больцмана

$$R_{\phi}^* = \sigma T^4,$$

звідки

$$T = \sqrt[4]{\frac{R_{\phi}}{\sigma}},$$

де  $T$  – температура;

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4} \text{ – стала Стефана-Больцмана.}$$

Підставимо числові значення

$$T = \sqrt[4]{\frac{R_{\phi}}{\sigma}} = \sqrt[4]{\frac{150 \cdot 10^4}{5,67 \cdot 10^{-8}}} = \sqrt[4]{26,4 \cdot 10^{12}} = 2,27 \cdot 10^{30} \text{ К.}$$

З закону зміщення Віна

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{b}{T}.$$

Підставимо числові значення



$$\lambda_{\max} = \frac{2,89 \cdot 10^{-3}}{2,27 \cdot 10^3} = 1,273 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

З визначення маси фотона

$$m_{\phi} = \frac{h}{\lambda c}.$$

Перевірка розмірності

$$[m] = \frac{\text{Дж} \cdot \text{с}}{\text{м} \cdot \text{м/с}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2}{\text{м}^2} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м/с}^2 \cdot \text{с}^2}{\text{м}} = \text{кг}.$$

Підставимо числові значення

$$m_{\phi} = \frac{6,627 \cdot 10^{-34}}{1,273 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^8} = 1,735 \cdot 10^{-36} \text{ кг.}$$

Відповідь:  $m_{\phi} = 1,735 \cdot 10^{-36} \text{ кг.}$

**Приклад 1.1.5.** Куб, нагрітий до 700 К за 1 с, випромінює 150 Дж. Знайти коефіцієнт сірості тіла, якщо ребро куба дорівнює 5 см.

Дано:	СІ	Розв'язок:
$T = 700 \text{ К}$		Із закону Стефана-Больцмана для
$t = 1 \text{ с}$		випромінювання сірого тіла
$W = 150 \text{ Дж}$		$R_T = k\sigma T^4,$
$a = 5 \text{ см}$	$= 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$	де $R_T$ – енергетична світність.
$k - ?$		

Енергетична світність знаходиться з формули

$$R_T = \frac{W}{S \cdot t}.$$

З геометрії відомо, що площа куба  $S_{\text{куба}} = 6a^2$ , тоді

$$R_T = \frac{W}{6a^2 \cdot t}.$$

Прирівняємо формули, отримаємо

$$k\sigma T^4 = \frac{W}{6a^2 \cdot t}.$$

Визначимо коефіцієнт сірості

$$k = \frac{W}{6a^2 \cdot t \cdot \sigma T^4}.$$

Перевірка розмірності

$$[k] = \frac{\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}}{\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4} \cdot \text{К}^4} = \frac{\text{Дж}}{\text{с} \cdot \frac{\text{Дж}}{\text{с}}} = 1.$$

Підставимо числові значення

$$k = \frac{150}{6 \cdot (5 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} (7 \cdot 10^2)^4} = 0,734.$$

Відповідь:  $k = 0,734$ .

## ЗАДАЧІ ДО САМОСТІЙНОГО РОЗВ'ЯЗУВАННЯ

1 Потік енергії, що випромінюється з оглядового вікна плавильної печі, дорівнює 40 Вт, площа вікна – 5 см<sup>2</sup>. Чому дорівнює температура в печі?

2 На скільки відсотків збільшиться енергетична світність абсолютно чорного тіла, якщо його абсолютна температура збільшиться на 20 %?

3 На яку відстань хвилі припадає максимум спектральної густини абсолютно чорного тіла при температурі  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ? Визначити енергетичну світність при даній температурі.

4 Довжина хвилі, на яку припадає максимум спектральної світності Сонця,  $\lambda = 0,5\text{ мкм}$ , його діаметр –  $1,4 \cdot 10^9\text{ м}$ . Знайти енергію  $\Delta E$ , яку втратить Сонце за 1000 років.

5 Початкова температура АЧТ дорівнює  $3000\text{ К}$ , а потужність випромінювання –  $2\text{ кВт}$ . Знайти температуру тіла, якщо площа випромінюючої поверхні збільшиться на  $12\text{ см}^2$ , а потужність випромінювання не змінюється.

6 Максимум інтенсивності випромінювання припадає на довжину хвилі  $2\text{ мкм}$ . Знайти температуру АЧТ після того, як енергетична світність збільшиться на  $3 \cdot 10^5\text{ Вт/м}^2$ .

7 Через електричну лампочку з опором  $3\text{ кОм}$  проходить струм  $750\text{ мА}$ . Температура нитки лампи дорівнює  $1355\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Знайти радіус спіралі, якщо її довжина  $17\text{ мм}$ . Спіраль нитки розжарювання вважати абсолютно чорним тілом.

8 Довжина хвилі, на яку припадає максимум спектральної густини випромінювання, збільшилась на  $30\%$ . Як при цьому зміниться енергетична світність тіла?

9 Плоский диск, нагрітий до температури  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , випромінює в усі боки  $30\text{ МДж}$  за  $20\text{ хв}$ . Знайти радіус диска, врахувавши, що тільки  $30\%$  енергії переходить у випромінювання.

10 Радіус кулі збільшується у два рази, а потужність її випромінювання залишилася сталою. Як при цьому змінюється температура кулі?

## **ТЕМА 1.2. Фотоефект. Тиск світла. Ефект Комптона**

### *Основні теми розділу*

Види фотоелектричного ефекту. Закони зовнішнього фотоефекту. Рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоефекту. Маса та імпульс фотона. Тиск світла. Ефект Комптона.

## 1.2.1 Види фотоелектричного ефекту

**Фотоелектром** називається явище випускання електронів речовиною під дією світла. Розрізняють три основних види фотоелектру: зовнішній, внутрішній і вентильний.

**Зовнішній фотоелектр** – явище випускання електронів речовиною під дією світла [3].

**Внутрішній фотоелектр** – фотоелектр, при якому електрони, що перебували у зв'язаному стані, стають електронами провідності і залишаються всередині речовини [3].

**Вентильний фотоелектр** – це явище виникнення ЕРС при освітленні контакту двох різних напівпровідників (р- і n-типу) або напівпровідника і металу під час відсутності зовнішнього електричного поля [8].

## 1.2.2 Закони зовнішнього фотоелектру

У 1888 році О. Столетов сформулював *закони фотоелектру*.

**Перший закон фотоелектру.** При фіксованій частоті падаючого світла сила фотоструму насичення  $I_n$  прямо пропорційна падаючому на катод світловому потоку  $\Phi$  [9].

**Другий закон фотоелектру.** Максимальна кінетична енергія вирваних електронів пропорційна частоті падаючого світла і не залежить від світлового потоку [9]:

$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = h\nu - A_{\text{вих}}. \quad (1.2.1)$$

**Третій закон фотоелектру.** Для кожної речовини існує мінімальна частота - «червона межа», за якої починається фотоелектр [9]:

$$\nu_c = \frac{A_{\text{вих}}}{h}, \quad (1.2.2)$$

де  $A_{\text{вих}}$  – робота виходу електрона з поверхні речовини;

$h$  – стала Планка.

Мінімальна частота  $\nu_c$  залежить від хімічної природи речовини і стану її поверхні. Цій частоті відповідає максимальна довжина хвилі

$$\lambda_c = \frac{hc}{A_{\text{вих}}}, \quad (1.2.3)$$

де  $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  – швидкість світла.

### 1.2.3 Рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоефекту

За рівнянням Ейнштейна, енергія фотона витрачається на виконання роботи виходу електрона з цієї речовини і надання електрону кінетичної енергії [5].

$$\begin{aligned} h\nu &= A_{\text{вих}} + \frac{m_e v_{\text{max}}^2}{2}, \\ E_{\phi} &= A_{\text{вих}} + E_{\kappa(\text{max})}, \end{aligned} \quad (1.2.4)$$

де  $E_{\phi} = h\nu$  – енергія фотона,

$A_{\text{вих}}$  – робота виходу електрона з поверхні металу;

$E_{\kappa(\text{max})} = \frac{m_e v_{\text{max}}^2}{2}$  – максимальна кінетична енергія фотоелектронів.

*Умова початку фотоефекту [5]*

$$h\nu_{\text{min}} = \frac{hc}{\lambda_{\text{max}}} = A_{\text{вих}}. \quad (1.2.5)$$

Якщо між електродами створити електричне поле, то рух вирваних фотоелектронів припиниться при досягненні затримуючої напруги.

$$\frac{m_e v_{\text{max}}^2}{2} = eU_z, \quad (1.2.6)$$

де  $U_z$  - затримуюча напруга, величина зворотної напруги, при якій фотострум повністю припиняється.

## 1.2.4 Маса та імпульс фотона

**Фотон** – частинка (квант) електромагнітного випромінювання, що рухається зі швидкістю світла. Запишемо основні властивості фотона [5]:

1 Фотон не має маси спокою ( $m_0 = 0$ ). Фотон існує тільки при русі зі швидкістю світла.

2 Фотон завжди рухається зі швидкістю світла  $c = 3 \cdot 10^8 \frac{м}{с}$ .

3 Фотону притаманний корпускулярно-хвильовий дуалізм: проявляє властивості і хвилі, і частинки.

4 Фотон не ділиться на частини – він випромінюється і поглинається тільки цілим.

5 Фотон має власний момент імпульсу – спіні. Спін фотона дорівнює  $\hbar$ .

*Енергія фотона*

$$E = h\nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}, \quad (1.2.7)$$

де  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с - стала Планка;

$c$  – швидкість світла у вакуумі.

*Масу фотона* можна знайти зі співвідношення  $E = mc^2$ .

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{h \cdot c}{\lambda \cdot c^2} = \frac{h}{c \cdot \lambda}. \quad (1.2.8)$$

*Імпульс фотона*  $p = mc$ , якщо підставити формулу (1.2.8), отримаємо

$$p = \frac{h}{\lambda \cdot c} c = \frac{h}{\lambda}. \quad (1.2.9)$$

Напрямок імпульсу фотона співпадає з напрямком розповсюдження електромагнітної хвилі.

Формули (1.2.7 - 1.2.9) зв'язують всі корпускулярні характеристики фотона - енергію, масу, імпульс з хвильовими характеристиками світла – частотою і довжиною хвилі.

## 1.2.5 Тиск світла. Ефект Комптона

**Тиск світла** – це тиск, який створює електромагнітна хвиля, що падає на поверхню тіла. Фотон при зіткненні з поверхнею передає імпульс.

Вперше теоретично обґрунтував тиск світла британський фізик і математик Д. К. Максвелл у 1873 році, а дослідив російський фізик П. М. Лебедев у 1901 році. Тиск світла добре пояснюється як з хвильової теорії світла, так і з корпускулярної.

Тиск світла при нормальному падінні на поверхню довільного тіла

$$P = \frac{E}{c}(1 + \rho) = \varpi(1 + \rho), \quad (1.2.10)$$

де  $E$  – кількість світлової енергії, яка падає на одиницю площі поверхні за одиницю часу;

$c$  – швидкість світла;

$\rho$  – коефіцієнт відбиття (для дзеркального тіла  $\rho = 1$ , для чорного  $\rho = 0$ );

$\varpi = \frac{E}{c}$  – об'ємна густина енергії.

Світло проявляє *корпускулярно-хвильову* природу. При поширенні світла проявляються хвильові властивості: інтерференція, дифракція, дисперсія та поляризація; а при

взаємодії з речовиною – корпускулярні: фотоефект, ефект Комптона, тиск світла.

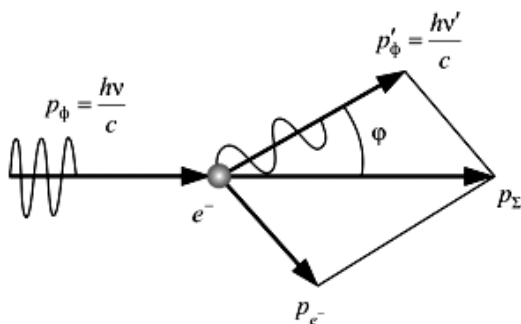


Рисунок 1.3

Ефект Комптона розглядається як пружне розсіювання фотона на вільному електроні, що знаходиться у стані спокою (рисунок 1.3).

Формула ефекту Комптона

$$\lambda' - \lambda = \Delta\lambda = \frac{h}{m_0 c}(1 - \cos\theta),$$

або

$$\lambda' - \lambda = \Delta\lambda = \frac{2h}{m_0c} \sin^2 \frac{\theta}{2}, \quad (1.2.11)$$

де  $\lambda'$  – довжина хвилі розсіяного під кутом  $\theta$  фотона;

$\lambda$  – довжина хвилі фотона, який падає на вільний або зв'язаний електрон;

$m_0$  – маса спокою електрона. Різниця  $\Delta\lambda$  не залежить від довжини хвилі падаючого випромінювання, а залежить тільки від кута  $\theta$ .

*Комптонівська довжина хвилі для електрона*

$$\lambda_k = \frac{h}{m_0c}. \quad (1.2.12)$$

*Комптонівська довжина хвилі для електрона  $\lambda_k = 2,426$  нм.*

## ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

**Приклад 1.2.1.** Знайти енергію, масу та імпульс фотона, якщо довжина хвилі дорівнює  $\lambda = 1,6$  нм.

Дано	Розв'язок:
$\lambda = 1,6 \text{ нм} = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}$	Енергія фотона обчислюється за формулою Планка
<hr/> $E - ? \quad m - ? \quad p - ?$	$E = h\nu.$

Із залежності швидкості з частотою  $c = \lambda \cdot \nu$  маємо

$$\nu = \frac{c}{\lambda}.$$

Можна записати формулу для енергії у вигляді

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



де  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж · с – стала Планка;  
 $c$  – швидкість світла у вакуумі.

Перевірка розмірності

$$E = \frac{\text{Дж} \cdot \text{с} \cdot \frac{\text{М}}{\text{с}}}{\text{М}} = \text{Дж}.$$

Підставимо числові значення

$$E = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{1,6 \cdot 10^{-12}} = 12,4 \cdot 10^{-14} \text{ Дж}.$$

Імпульс фотона обчислюється за формулою

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

Перевірка розмірності

$$[p] = \frac{\text{Дж} \cdot \text{с}}{\text{М}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{М}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{с}^2} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}.$$

Підставимо числові значення

$$p = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{1,6 \cdot 10^{-12}} = 4,14 \cdot 10^{-22} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}.$$

Оскільки фотони завжди рухаються із швидкістю світла, то вважається, що їх маса спокою дорівнює нулю, а маса частинки, що рухається зі швидкістю  $c$ ,

$$m = \frac{h}{c \cdot \lambda}.$$

Перевірка розмірності

$$[m] = \frac{\text{Дж} \cdot \text{с}}{\frac{\text{М}}{\text{с}} \cdot \text{М}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{М} \cdot \text{с}^2}{\text{М}^2} = \frac{\text{кг} \cdot \text{М} \cdot \text{с}^2}{\text{с}^2 \cdot \text{М}} = \text{кг}.$$

Підставимо числові значення

$$m = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{3 \cdot 10^8 \cdot 1,6 \cdot 10^{-12}} = 1,38 \cdot 10^{-30} \text{ кг}.$$

Відповідь:  $E = 12,4 \cdot 10^{-14} \text{ Дж}$ ;  $m = 1,38 \cdot 10^{-30} \text{ кг}$ ;

$$p = 4,14 \cdot 10^{-22} \frac{\text{кг} \cdot \text{М}}{\text{с}}.$$

**Приклад 1.2.2.** З якою швидкістю має рухатися електрон, щоб його імпульс дорівнював імпульсу фотона з довжиною хвилі  $\lambda = 520 \text{ нм}$ ?

Дано:

$$p_{el} = p_{\phi}$$

$$\lambda = 520 \text{ нм} = 5,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$v = ?$

Розв'язок:

Імпульс фотона визначається за формулою

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

Імпульс електрона

$$p_{el} = m_{el} v,$$

де  $m_{el} = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$  – маса електрона.

За умови задачі

$$p_{el} = p_{\phi},$$

тоді

$$\frac{h}{\lambda} = m_{el} v,$$

звідки

$$v = \frac{h}{\lambda \cdot m_{el}}.$$

## Перевірка розмірності

$$[v] = \frac{\text{Дж} \cdot \text{с}}{\text{м} \cdot \text{кг}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{м} \cdot \text{кг}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{с}^2 \cdot \text{кг}} = \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Підставимо числові значення

$$v = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{5,2 \cdot 10^{-7} \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}} = 1,4 \cdot 10^{30} \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Відповідь:  $v = 1,4 \cdot 10^{30} \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

**Приклад 1.2.3.** Довжина хвилі світла, що відповідає червоній межі фотоефекту, для деякого металу  $\lambda_{\text{ч}} = 275 \text{ нм}$ . Знайти роботу виходу електрона з металу та максимальну швидкість електронів, що вириваються з металу світлом з довжиною хвилі  $\lambda = 180 \text{ нм}$ .

Дано:

$$\lambda_{\text{ч}} = 275 \text{ нм} = 2,75 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$\lambda = 180 \text{ нм} = 1,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

Розв'язок:

Довжина хвилі фотона, що відповідає червоній межі фотоефекту, зв'язана з роботою виходу

$$A_{\text{вих}} - ? \quad v_{\text{max}} - ?$$

$$A_{\text{вих}} = \frac{hc}{\lambda_{\text{ч}}}.$$

Перевірка розмірності

$$[A_{\text{вих}}] = \frac{\text{Дж} \cdot \text{с} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}}{\text{м}} = \frac{\text{Дж} \cdot \text{м}}{\text{м}} = \text{м}.$$

Підставимо числові значення

$$A_{\text{вих}} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{2,75 \cdot 10^{-7}} = 7,23 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

З другого закону фотоефекту

$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = h\nu - A_{\text{вих}},$$

звідки

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2(h\nu - A_{\text{вих}})}{m}}.$$

З формули зв'язку швидкості світла з частотою  $c = \lambda \cdot \nu$  отримаємо, що  $\nu = \frac{c}{\lambda}$ , де  $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2\left(h \frac{c}{\lambda} - A_{\text{вих}}\right)}{m}},$$

тоді

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2\left(h \frac{c}{\lambda} - A_{\text{вих}}\right)}{m}},$$

де  $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  – маса електрона.

Підставимо числові значення

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2\left(6,626 \cdot 10^{-34} \frac{3 \cdot 10^8}{2,75 \cdot 10^{-7}} - 7,23 \cdot 10^{-19}\right)}{9,1 \cdot 10^{-31}}} = 0,91 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Відповідь:  $v_{\max} = 0,91 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

**Приклад 1.2.4.** Яка довжина хвилі кванта з енергією, що дорівнює середній кінетичній енергії атома гелію при температурі 100 °С? Постійна Больцмана  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ .

Дано:	Сі:	Розв'язок:
t=100 °С	=100+273=373 К	Енергія фотона
$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$		$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$ .
$\lambda - ?$		

Середня кінетична енергія дорівнює

$$E = \frac{i}{2} kT,$$

де  $i=3$  – для одноатомного газу (He).

Прирівнюємо формули

$$h \frac{c}{\lambda} = \frac{3}{2} kT,$$

звідки

$$\lambda = h \frac{2c}{3kT}.$$

Перевірка розмірності

$$[\lambda] = \frac{\text{Дж} \cdot \text{с} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}}{\frac{\text{Дж}}{\text{К}}} = \text{м}.$$

Підставимо числові значення

$$\lambda = 6,63 \cdot 10^{-34} \frac{2 \cdot 3 \cdot 10^8}{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 373} = 2,57 \cdot 10^{-5} \text{ м}.$$

Відповідь:  $\lambda = 2,57 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ .

**Приклад 1.2.5.** Маса фотона, що відповідає червоній межі фотоефекту, дорівнює  $m = 5,33 \cdot 10^{-33} \text{ г}$ . Затримуюча різниця потенціалів, при якій фотострум дорівнює нулю,  $U = 2,85 \text{ В}$ . Знайти імпульс падаючого фотона.

Дано:

$$m = 5,33 \cdot 10^{-33} \text{ г}$$

$$U_s = 2,85 \text{ В}$$

$$\lambda = ?$$

СІ:

$$m = 5,33 \cdot 10^{-36} \text{ кг}$$

Розв'язок:

З рівняння Ейнштейна для фотоефекту

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

Перепишемо рівняння Ейнштейна у вигляді

$$p \cdot c = m \cdot c^2 + eU_3,$$

де  $m$  - маса фотона;

$c$  - швидкість світла;

$e$  - заряд електрона;

$U_3$  - затримуюча різниця потенціалів.

Імпульс фотона

$$p = \frac{m \cdot c^2 + eU_3}{c}.$$

Перевірка розмірності

$$[p] = \frac{\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2} + \text{Кл} \cdot \text{В}}{\frac{\text{м}}{\text{с}}} = \frac{\text{Дж}}{\frac{\text{м}}{\text{с}}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}}{\text{с}^2 \cdot \text{м}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2}.$$

Підставимо числові значення

$$\lambda = \frac{5,33 \cdot 10^{-36} \cdot 9 \cdot 10^{18} + 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2,85}{3 \cdot 10^8} = 3,119 \cdot 10^{-27} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2}.$$

Відповідь:  $\lambda = 3,119 \cdot 10^{-27} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2}$ .

## ЗАДАЧІ ДО САМОСТІЙНОГО РОЗВ'ЯЗУВАННЯ

1 На деякий метал падає світло з довжиною хвиль 212 нм. Маса протона, що відповідає червоній межі фотоефекту, дорівнює  $5,33 \cdot 10^{-30}$  мг. Знайти максимальну швидкість вибитих електронів.

2 На вольфрам падають фотони з енергією 6,5 еВ. Знайдіть максимальну швидкість вибитих електронів.

3 Нейрон рухається зі швидкістю 25 км/с. Яку довжину хвиль повинен мати фотон, щоб його енергія дорівнювала кінетичній енергії нейтрона?

4 Яку різницю потенціалів має пройти  $\alpha$ -частинка, щоб її кінетична енергія дорівнювала енергії фотона з довжиною хвиль 130 пм?

5 Ядро дейтерію рухається зі швидкістю 0,15 км/с. Яку довжину хвилі повинен мати фотон, щоб його енергія дорівнювала кінетичній енергії ядра?

6 Яку довжину хвилі мають світлові хвилі, що падають на поверхню цезію, якщо фотоелектрони, що вилітають із металу, мають швидкість  $2 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ? Червона межа фотоелектру для цезію – 690 нм.

7 При напрузі між катодом і анодом рентгенівської трубки 20 кВ мінімальна довжина хвилі рентгенівського випромінювання складає 62 пм. При якій анодній напрузі мінімальна довжина хвилі випромінювання буде дорівнювати 31 пм?

8 При якій швидкості електрон буде мати кінетичну енергію, що дорівнює енергії кванта з довжиною хвилі 100 нм?

9 Частота фотонів, падаючих на метал, дорівнює  $1,41 \cdot 10^{15}$  Гц. Затримуюча різниця потенціалів - 2,85 В. Знайти довжину хвилі фотона, що відповідає червоній межі фотоелектру.

10 На метал падають фотони з масою  $1,04 \cdot 10^{-32}$  г. Робота виходу електронів із даного металу – 3 еВ. Знайти затримуючу різницю потенціалів, при якій фотострум дорівнює нулю.

## **ТЕМА 2.1. Будова та властивості атомного ядра**

### *Основні теми розділу*

Заряд, розмір і склад атомного ядра. Масове та зарядове числа. Ізотопи. Поняття про властивості та природу ядерних сил. Дефект маси та енергія зв'язку в ядрі. Стабільність ядер.

### 2.1.1. Заряд, розмір і склад атомного ядра

З планетарної моделі Резерфорда атом складається з ядра, навколо якого по певних орбітах рухаються електрони.

**Електричний заряд ядра** позитивний і дорівнює негативному заряду всіх електронів, які обертаються навколо ядра. Радіус ядра визначається формулою

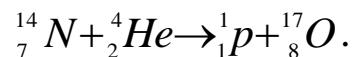
$$R = R_0 \sqrt[3]{A}, \quad (2.1.1)$$

де  $A$  - масове число,  $R_0 = (1,3 \dots 1,5) \cdot 10^{-15}$  м.

Лінійні розміри ядра склали  $10^{-14} - 10^{-15}$  м, а атома приблизно  $10^{-10}$  м.

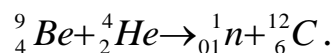
Доведено, що атомне ядро складається з елементарних частинок – протонів і нейтронів, загальна назва – *нуклони*.

**Протон ( $p$ )** – позитивна елементарна частинка, що входить до складу ядра; був відкритий у 1919 році Е. Резерфордом в результаті ядерної реакції



Заряд протона  $q_p = +1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, маса його спокою  $m_p = 1,00728 \text{ а.о.м} \approx 1,67 \cdot 10^{-27}$  кг.

**Нейтрон ( $n$ )** – нейтральна елементарна частинка, що входить до складу ядра, позначається  $n$ . Заряд нейтрона  $q_n = 0$ , його маса  $m_n = 1,00866 \text{ а.е.м} \approx 1,67 \cdot 10^{-27}$  кг. Нейтрон було відкрито в 1932 році Дж. Чедвіком у результаті реакції



### 2.1.2 Масове та зарядове числа. ізотопи

Ядро позначають символом

$${}^A_ZX, \quad (2.1.2)$$



де  $X$  – символ хімічного елемента.

Кількість протонів позначають символом  $Z$  і називають **зарядовим числом** або атомним номером. Зарядове число співпадає з порядковим номером у періодичній таблиці Менделєєва.

Заряд ядра дорівнює  $Ze$ , де  $e$  – елементарний заряд,  $Z$  – зарядове число.

Кількість нейтронів позначається символом  $N$  і визначається за формулою

$$N = A - Z. \quad (2.1.3)$$

Загальну кількість нуклонів називають **масовим числом**  $A$  і вимірюють в атомних одиницях маси (а.о.м.)

$$1 \text{ а.о.м.} = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Ядра з однаковим зарядовим числом (порядковим номером), але різним масовим числом називаються **ізотопами**. Наприклад: протій  ${}^1_1\text{H}$ , дейтерій  ${}^2_1\text{H}$ , тритій  ${}^3_1\text{H}$ .

Ядра, що мають однакове масове число, але різне зарядове, називаються **ізобарами**. Наприклад:  ${}^{10}_6\text{C}$ ,  ${}^{10}_4\text{Be}$ ,  ${}^{10}_5\text{B}$ .

### 2.1.3 Поняття про властивості і природу ядерних сил

Між нуклонами в ядрі діють ядерні сили. Енергія ядерних сил і кулонівської взаємодії протонів у ядрі дорівнює енергії зв'язку. Запишемо основні властивості ядерних сил [8]:

- 1 Ядерні взаємодії *найсильніші в природі*.
- 2 Ядерні сили не є центральними.
- 3 Ядерні сили є *короткодійними* з радіусом дії  $\sim 10^{-13}$  см.
- 4 Ядерним силам властива *зарядова незалежність*: ядерні сили, що діють між двома протонами або двома нейтронами, або між протоном і нейтроном, однакові за величиною. Звідси випливає, що ядерні сили мають неелектричну природу.
- 5 Ядерним силам притаманне *насичення*, тобто кожен нуклон в ядрі взаємодіє тільки з обмеженою кількістю найближчих до нього нуклонів.

6 Ядерні сили залежать від взаємної орієнтації спінів взаємодіючих нуклонів. Наприклад, протон і нейтрон утворюють дейтрон (ядро ізотопу  ${}^2_1\text{H}$ ) тільки за умови паралельної орієнтації їх спінів.

#### 2.1.4 Дефект маси та енергія зв'язку в ядрі. стабільність ядер

**Дефект мас атомного ядра** – це різниця суми мас нуклонів, що входять до складу ядра, та маси самого ядра

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}, \quad (2.1.4)$$

де  $m_p$  – маса протона;

$m_n$  – маса нейтрона;

$m_{\text{я}}$  – маса ядра атома (табличне значення).

**Енергія зв'язку атомного ядра** – це енергія, яку необхідно затратити, щоб розділити ядро на нуклони [3].

$$E_{\text{зв}} = \Delta mc^2 = [Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}]c^2, \quad (2.1.5)$$

де  $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  – швидкість світла у вакуумі.

Для зручності в ядерній фізиці масу вимірюють в атомних одиницях маси (а.о.м.), а енергію – мегаелектрон-вольтах (МеВ). Тоді формула для енергії зв'язку набуває вигляду

$$E_{\text{зв}} = 931,5 \Delta m \text{ МеВ}. \quad (2.1.6)$$

$$1 \text{ МеВ} = 10^6 \text{ еВ} = 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}.$$

Енергія зв'язку, яка припадає на один нуклон, називається **питомою енергією зв'язку** [3].

Знайти питому енергію можна по відношенню енергії зв'язку ядра до його масового числа

$$E_n = \frac{E_{зв}}{A}, \quad (2.1.7)$$

де  $A$  – масове число. Питома енергія зв'язку ядер  $E_n = (6-8)$  МеВ.

На рисунку 2.1 наведено графічну залежність енергії зв'язку від масового числа [3].

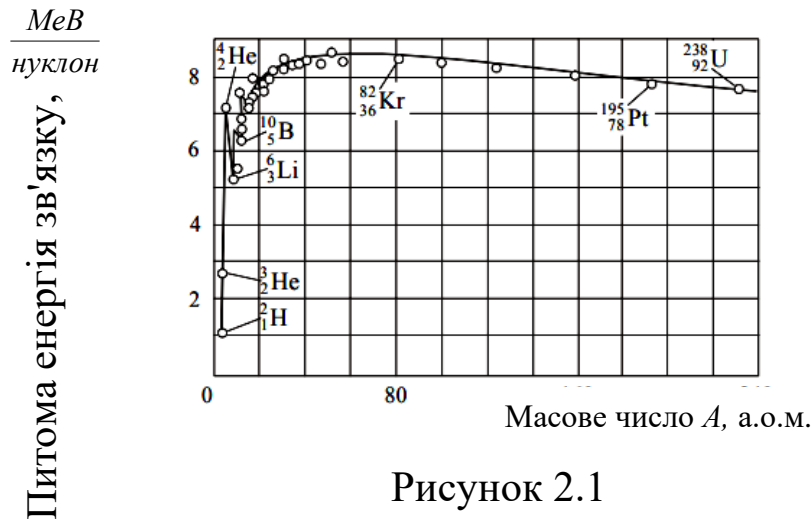


Рисунок 2.1

Питома енергія характеризує міру міцності ядра: чим більше  $E_{св}/A$ , тим міцніше ядро.

## ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

**Приклад 2.1.1.** Знайти енергію зв'язку ядра ізотопу літію  ${}^7_3\text{Li}$ .

Дано:

$$m({}^7_3\text{Li}) = 7,01601 \text{ а.о.м.}$$

$$m_p = 1,00783 \text{ а.о.м.}$$

$$m_n = 1,00867 \text{ а.о.м.}$$

$$E_{зв} - ?$$

Розв'язок:

Із загального виразу  ${}^A_Z\text{X}$  маємо, що кількість протонів  $Z=3$ , кількість нейтронів знайдемо з формули

$$N = A - Z, \text{ тоді } N = 7 - 3 = 4.$$

Обчислимо масу цього набору нуклонів

$$4m_n + 3m_p = 4 \cdot 1,00867 + 3 \cdot 1,00783 = 4,03464 + 3,02349 = 7,05813 \text{ а.о.м.,}$$

де  $1 \text{ а.о.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ .

Звернемо увагу на те, що маса нуклонів більше, ніж маса ядра літію (таблиця А.6)

$$7,01601 < 7,05813 .$$

Дефект маси

$$\Delta m = 7,05813 - 7,01601 = 0,04212 \text{ а.о.м.}$$

$$E_{зв} = 931,5 \Delta m .$$

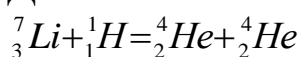
Підставимо числові значення

$$E_{зв} = \Delta m \cdot 931 = 0,04212 \cdot 931 = 39,21 \text{ МеВ.}$$

Відповідь:  $E_{зв} = 39,21 \text{ МеВ}$ .

**Приклад 2.1.2.** Знайти енергію, що виділяється при реакції  
 ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} = {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$ .

Дано:



$E - ?$

Розв'язок:

Обчислимо масу елементів до реакції і масу елементів після реакції.

З таблиці А.6 маємо

$$m({}^7_3\text{Li}) = 7,011601 \text{ а.о.м.};$$

$$m({}^1_1\text{H}) = 1,00783 \text{ а.о.м.};$$

$$m({}^4_2\text{He}) = 4,0026 \text{ а.о.м.}$$

Знайдемо масу елементів до реакції

$$m_1 = 7,011601 + 1,00783 = 8,019431 \text{ а.о.м.}$$

Маса елементів після реакції

$$m_2 = 4,00260 + 4,00260 = 8,0052 \text{ а.о.м.}$$

Різниця мас до та після реакції

$$\Delta m = m_1 - m_2.$$

$$\Delta m = 8,019431 - 8,0052 = 0,014231 \text{ а.о.м.}$$

Якщо  $\Delta m > 0$ , то реакція йде з виділенням енергії; якщо  $\Delta m < 0$ , то з поглинанням енергії.

Переводимо атомні одиниці маси (а.о.м.) в мегаелектронвольти (МеВ), помноживши  $\Delta m$  на 931, отримаємо

$$E = 0,014231 \cdot 931 = 13,25 \text{ МеВ.}$$

Відповідь:  $E = 13,25 \text{ МеВ.}$

**Приклад 2.1.3.** Знайти питому енергію зв'язку ядра ізотопу карбону  ${}^{12}_6\text{C}$ .

Дано:



$$m_p = 1,00783 \text{ а.о.м.}$$

$$m_n = 1,00867 \text{ а.о.м.}$$

$$E_n - ?$$

Розв'язок:

Знайдемо масу ядра  ${}^{12}_6\text{C}$  з таблиці А.6

$$m({}^{12}_6\text{C}) = 12,0000 \text{ а.о.м.}$$

Кількість нуклонів дорівнює 12.

Питома енергія – це енергія зв'язку, що припадає на один нуклон у ядрі.

$$E_n = \frac{E_{зв}}{A}.$$

Енергію зв'язку можна знайти за формулою

$$E_{зв} = 931 [Zm_p + (A - Z)m_n - m_{я}].$$

Підставимо числові значення

$$E_{зв} = 931 [6 \cdot 1,00867 + 6 \cdot 1,00783 - 12,0000] = 931 \cdot 0,09894 = 92,113 \text{ МеВ,}$$

тоді

$$E_n = \frac{92,113}{12} = 7,67 \frac{\text{MeV}}{\text{нуклон}}.$$

Відповідь:  $E_n = 7,67 \frac{\text{MeV}}{\text{нуклон}}.$

**Приклад 2.1.4.** D-лінія натрію випромінюється в результаті такого переходу електрона з однієї орбіти атома на іншу, при якому енергія атома зменшується на  $\Delta W = 3,37 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ . Знайти довжину хвилі  $\lambda$  D-лінії натрію.

Дано: $\Delta W = 3,37 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ $\lambda - ?$	Розв'язок: Енергія фотона визначається за формулою $E = \frac{h \cdot c}{\lambda},$
---	---

де  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$  – постійна Планка;

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$  – швидкість світла;

$\lambda$  – довжина хвилі.

За положеннями квантової фізики, атом випромінює електромагнітні хвилі тільки тоді, коли переходить зі стану з більшою енергією у стан з меншою енергією. При цьому енергія кванта світла (фотона) дорівнює зміні енергії атома, тобто

$$E = \Delta W, \text{ тоді } \Delta W = \frac{h \cdot c}{\lambda},$$

звідси знаходимо

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{\Delta W}.$$

Перевірка розмірності

$$[\lambda] = \frac{\text{Дж} \cdot \text{с} \cdot \text{м/с}}{\text{Дж}} = \text{м}.$$

Підставимо числові значення

$$\lambda = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{3,37 \cdot 10^{-19}} = 5,9 \cdot 10^{-7} = 590 \text{ нм.}$$

Відповідь:  $\lambda = 590 \text{ нм.}$

**Приклад 2.1.5.** Електрон, пройшовши різницю потенціалів  $U = 4,9 \text{ В}$ , зіштовхується з атомом ртуті і переводить його в перший збуджений стан. Яку довжину хвилі має фотон, що відповідає переходу атома ртуті в нормальний стан?

Дано:

$$U = 4,9 \text{ В}$$

---


$$\lambda - ?$$

Розв'язок:

Якщо електрон проходить різницю потенціалів, то його кінетична енергія змінюється на величину

$$E = U \cdot e,$$

де  $e$  – заряд електрона;

$U$  – різниця потенціалів.

Припустимо, що вся кінетична енергія електрона переходить в енергію збудження атома, а потім в енергію випромінюваного фотона.

Енергія фотона дорівнює

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

тоді

$$U \cdot e = \frac{h \cdot c}{\lambda},$$

звідки довжина хвилі

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{U \cdot e}.$$

Перевірка розмірності

$$[\lambda] = \frac{\text{Дж} \cdot \text{с} \cdot \text{м/с}}{\text{В} \cdot \text{Кл}} = \frac{\text{Дж} \cdot \text{м}}{\text{Дж}} = \text{м.}$$

Підставимо числові значення

$$\lambda = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{4,9 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 2,54 \cdot 10^{-7} = 254 \text{ нм.}$$

Відповідь:  $\lambda = 254 \text{ нм.}$

## ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО РОЗВ'ЯЗУВАННЯ

- 1 Знайти кількість протонів і нейтронів у ядрі атома  ${}^{45}_{20}\text{Ca}$ .
- 2 Визначити питому енергію зв'язку ядра  ${}^{16}_8\text{O}$ .
- 3 Визначити питому енергію зв'язку ядра урану  ${}^{235}_{92}\text{U}$ .
- 4 Визначити дефект маси в кілограмах атома неону  $\text{Ne}^{20}_{10}$ .
- 5 Чим відрізняються ізотопи  ${}^{229}_{90}\text{Th}$  і  ${}^{234}_{90}\text{Th}$ ?
- 6 Визначити дефект маси та енергію зв'язку для ядра атома  ${}^{10}_5\text{B}$ .
- 7 Виділяється або поглинається енергія в реакції  ${}^{27}_{13}\text{Al} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{30}_{14}\text{Si} + {}^1_1\text{H}$ ? Виразити енергію в джоулях.
- 8 Визначити енергетичний вихід реакції  ${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{H}$  в мегаелектрон-вольтах.
- 9 Виділяється або поглинається енергія при реакції  ${}^7_3\text{Li} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{10}_5\text{B} + {}^1_0\text{n}$ ? Виразити енергію в мегаелектрон-вольтах.
- 10 Визначити енергетичний вихід ядерної реакції  ${}^{15}_7\text{N} + {}^1_1\text{p} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^4_2\text{He}$  в джоулях.

## ТЕМА 2.2. Радіоактивність. Ядерні реакції

### Основні теми розділу

Природна і штучна радіоактивність. Закон радіоактивного розпаду. Період напіврозпаду. Типи радіоактивного розпаду. Основні характеристики  $\alpha$ - і  $\beta$ -розпадів. Поняття про ядерні реакції. Закони збереження в ядерних реакціях.



## 2.2.1 Природна та штучна радіоактивність

**Радіоактивністю** називається явище самовільного перетворення одних атомних ядер в інші з утворенням нового ядра та випусканням елементарних частинок.

Ядро, що відчуває розпад, називається материнським, ядро, що утворюється в результаті розпаду, – дочірнім [3]. Розрізняють природну і штучну радіоактивність.

**Природна радіоактивність** – це радіоактивність, яка спостерігається у ядер, що існують в природних умовах. Природна радіоактивність була відкрита А. Бекерелем у 1896 році.

**Штучна радіоактивність** – радіоактивність ядер, отриманих за допомогою ядерних реакцій.

## 2.2.2 Закон радіоактивного розпаду. період напіврозпаду

**Закон радіоактивного розпаду** показує кількість ядер, які залишилися за час порівняно з початковою кількістю ядер,

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (2.2.1)$$

де  $N_0$  – кількість ядер у початковий момент часу ( $t = 0$ );

$N$  – кількість ядер в момент часу  $t$ ;

$\lambda$  – постійна розпаду.

**Постійна розпаду** показує вірогідність розпаду ядер за 1 с і дорівнює частці ядер, що розпалися за одиницю часу.

Величина, обернена постійній розпаду, називається **середнім часом життя** радіоактивного ядра

$$\tau = \frac{1}{\lambda}. \quad (2.2.2)$$

**Період напіврозпаду** – час, упродовж якого розпадається половина початкової кількості ядер (рисунок 2.2) [3].

З формули (2.1.8) можна знайти період напіврозпаду

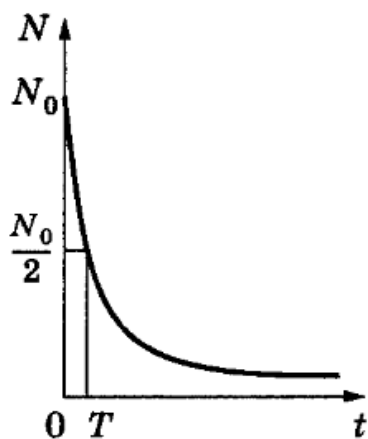


Рисунок 2.2

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T}, \quad (2.2.3)$$

звідки

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}. \quad (2.2.4)$$

Кількість ядер, що розпалися за час  $t$ , визначається за формулою

$$\Delta N = N_0 - N = N_0 (1 - e^{-\lambda t}). \quad (2.2.5)$$

У випадку, якщо інтервал часу  $\Delta t$  набагато менший за період напіврозпаду  $T$ , кількість ядер, які не розпалися за час  $t$ ,

$$\Delta N \approx \lambda N \Delta t. \quad (2.2.6)$$

**Активністю речовини** називається кількість розпадів в одиницю часу. Якщо є  $N$  атомів, здатних до радіоактивного розпаду, то активність радіоактивної речовини

$$A = \frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t}. \quad (2.2.7)$$

Експоненціальна залежність активності від часу виражається формулою

$$A = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\frac{t \ln 2}{T}}, \quad (2.2.8)$$

де  $A_0$  – активність ізотопу в початковий момент часу.

Одиницею вимірювання активності є бекерель  $[A] = \text{Бк} = 1/\text{с}$ .

$$1 \text{Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{Бк}.$$

### 2.2.3 Типи радіоактивного розпаду. Основні характеристики $\alpha$ - і $\beta$ -розпадів

**Альфа-розпад ( $\alpha$ -розпад)** – це розпад ядра з масовим числом  $A$  в ядра з масовим числом  $A-4$  при випусканні

$\alpha$ -частинки (ядро ізотопу гелію  ${}^4_2\text{He}$ ); протікає за реакцією [2]



де  ${}^A_Z\text{X}$  – материнське радіоактивне ядро;

${}^{A-4}_{Z-2}\text{Y}$  – дочірнє радіоактивне ядро.

З дослідів отримано, що  $\alpha$ -розпад відчують тільки важкі ядра з  $A > 200$ . Енергію, що виділяється при  $\alpha$ -розпаді, розраховують за формулою

$$Q = [m_A - m_{A-4} - m_\alpha]c^2, \quad (2.2.10)$$

де  $m_A$  і  $m_{A-4}$  – маси материнського і дочірнього ядер;

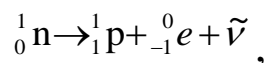
$m_\alpha$  – маса  $\alpha$ -частинки.

**Бета-розпад ( $\beta$ -розпад)** – це процес, в якому вихідне ядро з масовим числом  $A$  перетворюється в ядро з тим самим масовим числом  $A$ , але з зарядовим числом  $Z \pm 1$ . Розрізняють три види  $\beta$ -розпаду [2]:

- **електронний розпад ( $\beta^-$ )** – процес, що відбувається з випусканням електрона з зарядовим числом  $Z+1$ . Протікає за схемою



наприклад



де  ${}^1_0\text{n}$  – нейтрон;

${}^1_1\text{p}$  – протон;

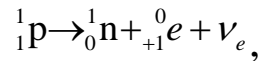
${}^0_{-1}\text{e}$  – електрон;

$\tilde{\nu}$  – нейтрино;

- **позитронний розпад ( $\beta^+$ )** – розпад, що відбувається з випусканням позитрона з зарядовим числом  $Z-1$  [2]. Протікає за схемою



наприклад

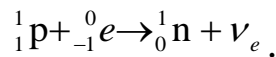


де  ${}^1_0\text{n}$  – нейтрон;  
 ${}^1_1\text{p}$  – протон;  
 ${}^0_{+1}\text{e}$  – позитрон;  
 $\tilde{\nu}$  – нейтрино;

- **К-захоплення** (електронне захоплення) – процес, в якому ядро захоплює один з електронів електронної оболонки атома. Цей процес завжди супроводжується рентгенівським випромінюванням [2]



наприклад



**Гамма-розпад** ( $\gamma$ -випромінювання) – жорстке електромагнітне випромінювання, енергія якого вивільняється при переході атомних ядер зі збудженого стану в основний, або в менш збуджений стан, а також при ядерних реакціях.

Перехід ядра зі збудженого стану в основний супроводжується випусканням одного або декількох  $\gamma$ -квантів, енергія яких може досягати декількох мегаелектрон-вольтів. При гамма-розпаді не відбувається зміни зарядового та масового чисел.

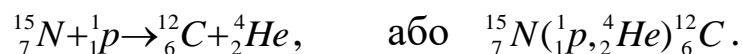
## 2.2.4 Поняття про ядерні реакції. Закони збереження в ядерних реакціях

**Ядерні реакції** – перетворення атомних ядер, викликані їх взаємодією з елементарними частинками, або один з одним. Загальний вигляд ядерної реакції записується так [4]:



де  $A$  – первинне ядро;  
 $a$  – первинна частинка в реакції;  
 $B$  – ядро, що отримується при реакції;  
 $b$  – частинка, що вилітає;  
 $Q$  – енергія ядерної реакції.

Наприклад



Якщо при  $Q < 0$  реакція відбувається з поглинанням енергії і називається *ендотермічною*, то при  $Q > 0$  реакція відбувається з виділенням енергії, має назву *екзотермічна*.

При ядерних реакціях виконуються *основні закони збереження*: закон збереження масового числа, сумарного електричного заряду, енергії, імпульсу взаємодіючих частинок і ядер.

### 2.1.5 Проходження гамма-випромінювання через речовину

При проходженні гамма-променів через речовину спостерігається фотоефект, що відбувається при енергіях  $E_\gamma \leq 0,5$  МеВ, ефект Комптона при енергіях  $0,5 \leq E_\gamma \leq 5$  МеВ та утворення пари електрон – позитрон при енергії  $E_\gamma \geq 0,5$  МеВ.

Послаблення інтенсивності гамма-променів у речовині

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x}, \quad (2.2.15)$$

де  $I$  – інтенсивність у речовині;

$I_0$  – інтенсивність рентгенівських променів, що падають на речовину;

$\mu$  – лінійний коефіцієнт поглинання.

*Лінійний коефіцієнт поглинання* – довжина, на якій випромінювання послаблюється в «e» разів ( $e=2,718$ ) [1]. Лінійний коефіцієнт поглинання  $\mu$  пов'язаний з масовим коефіцієнтом поглинання  $\mu_M$

$$\mu_M = \frac{\mu}{\rho}, \quad (2.2.16)$$

де  $\rho$  – густина речовини.

*Товщина шару половинного послаблення*

$$x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}. \quad (2.2.17)$$

Для жорстких гамма-променів з енергіями порядку  $10^6 - 10^8$  МеВ проникаюча здатність може досягати декількох метрів [1].

## ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

**Приклад 2.2.1.** Через 10 діб залишилося 60 % від первинної кількості радіоактивних атомів. Чому дорівнює період напіврозпаду?

Дано: $t=10$ діб; $N=0,6N_0$ <hr style="border: 0; border-top: 1px solid black;"/> $T - ?$	Розв'язок: Закон радіоактивного розпаду має вигляд $N = N_0 \cdot e^{-\lambda t},$ де $\lambda$ – постійна розпаду.
---	---

Використовуючи умову задачі

$$\begin{aligned} 0,6N_0 &= N_0 \cdot e^{-\lambda t}, \\ 0,6 &= e^{-\lambda t}, \end{aligned}$$

логарифмуємо це рівняння:

$$\begin{aligned} \ln 0,6 &= \ln e^{-\lambda t}, \\ \ln 0,6 &= -\lambda \cdot t, \\ \lambda &= -\frac{1}{t} \ln 0,6 = -\frac{1}{10} \ln 0,6 = 0,051. \end{aligned}$$

Період напіврозпаду

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}.$$

Підставимо числові значення

$$T = \frac{\ln 2}{0,051} \approx 13,6 \text{ діб}^{-1}.$$

Відповідь:  $T \approx 13,6 \text{ діб}^{-1}$ .

**Приклад 2.2.2.** Скільки атомів полонію розпадається за одну добу з  $N_0 = 10^6$  атомів?

Дано:

$$N_0 = 10^6$$

$$t = 1 \text{ доб}$$

$$T_{1/2} = 138 \text{ діб}$$

$$\Delta N - ?$$

Розв'язок:

Закон радіоактивного розпаду має вигляд

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}.$$

Його можна записати так:

$$N = N_0 \cdot 2^{-t/T_{1/2}},$$

де  $T_{1/2}$  – період напіврозпаду, тобто час, за який розпадається половина атомів.

Період напіврозпаду пов'язаний з постійною розпаду за формулою

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}.$$

Кількість атомів, які розпалися,  $\Delta N$  можна знайти як різницю між початковою кількістю атомів  $N_0$  і кількістю атомів  $N$ , які залишилися,

$$\Delta N = N_0 - N = N_0(1 - 2^{-t/T_{1/2}}).$$

Підставимо числові значення

$$\Delta N = 10^6(1 - 2^{-1/138}) = 10^6(1 - 2^{-0,00725}) = 10^6(1 - 0,995) = 0,005 \cdot 10^6 = 5 \cdot 10^3.$$

Відповідь:  $\Delta N = 5 \cdot 10^3$ .

**Приклад 2.2.3.** Знайти для алюмінію товщину шару половинного ослаблення для рентгенівських променів деякої довжини хвилі. Масовий коефіцієнт поглинання алюмінію для цієї довжини хвилі  $\mu_M = 5,3 \text{ м}^2 / \text{кг}$ .

Дано:

$$\rho_{AL} = 2,6 \cdot 10^3 \text{ кг} / \text{м}^3$$

$$\mu_M = 5,3 \text{ м}^2 / \text{кг}$$

$$x_{1/2} - ?$$

Розв'язок:

Інтенсивність пучка рентгенівських променів, які пройшли крізь пластинку товщиною  $x$ , визначається формулою

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x},$$

де  $I_0$  – інтенсивність рентгенівських променів, що падають на пластинку;

$\mu$  – лінійний коефіцієнт поглинання.

Якщо товщина пластинки дорівнює товщині шару половинного ослаблення, тобто

$$x = x_{1/2},$$

це означає, що інтенсивність  $I$  променів, які пройшли крізь пластинку, у два рази менше

$$I = I_0 / 2.$$

Підставимо в першу формулу

$$\frac{I_0}{2} = I_0 \cdot e^{-\mu x_{1/2}},$$

звідки

$$\frac{1}{2} = e^{-\mu x_{1/2}},$$

$$\ln 2 = \mu \cdot x_{1/2}.$$

Товщину шару половинного послаблення знаходимо за формулою

$$x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}.$$

Врахуємо, що лінійний коефіцієнт поглинання  $\mu$  пов'язаний з масовим коефіцієнтом поглинання  $\mu_M$  таким чином:



$$\mu_M = \frac{\mu}{\rho},$$

де  $\rho$  – густина речовини,  
тоді

$$\mu = \mu_M \cdot \rho.$$

Кінцева формула набуває вигляду

$$x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\rho \cdot \mu_M}.$$

Перевірка розмірності

$$[x_{1/2}] = \frac{1}{\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \frac{\text{м}^2}{\text{кг}}} = \text{м}.$$

Підставимо числові значення

$$x_{1/2} = \frac{0,693}{5,3 \cdot 2,6 \cdot 10^3} = 0,048 \cdot 10^{-3} = 0,048 \text{ мм}.$$

Відповідь:  $x_{1/2} = 0,048 \text{ мм}$ .

## ЗАДАЧІ ДО САМОСТІЙНОГО РОЗВ'ЯЗУВАННЯ

1 Через 5 діб залишилось 70 % від початкової кількості радіоактивних атомів. Чому дорівнює період напіврозпаду?

2 Товщина деякого матеріалу зменшується на 0,9 см, при цьому у півтора разу збільшується інтенсивність випромінювання. Знайти лінійний коефіцієнт поглинання даного матеріалу.

3 Стала розпаду початкової речовини –  $0,5 \text{ міс}^{-1}$ , а період напіврозпаду другої речовини – 1,5 міс. Через півроку після початку спостережень кількість двох речовин співпала. У скільки разів і якої речовини було більше в початковий момент часу?

4 Знайти період напіврозпаду радіо  ${}^{226}_{8}\text{Ra}$  в роках, якщо активність 1 г речовини дорівнює  $3,681 \cdot 10^{10}$  Бк.

5 Визначити кількість атомів урану  ${}^{239}_{92}\text{U}$ , які розпалися протягом року, якщо початкова маса урану – 1 г. Період напіврозпаду урану  $T = 4,5 \cdot 10^9$  років, молярна маса - 0,238 кг/моль.

6 Ізотоп урану  ${}^{235}_{92}\text{U}$ , випробувавши ряд радіоактивних перетворень, перетворився на свинець  ${}^{207}_{82}\text{Pb}$ . Скільки альфа- і бета-розпадів відбулося при цьому?

7 При однаковій товщині перший матеріал поглинає 70 % випромінювання, а другий – 50 % падаючого випромінювання. Як співвідносяться коефіцієнти поглинання даних матеріалів?

8 Стала розпаду першої речовини –  $0,8 \text{ років}^{-1}$ , а другої –  $0,3 \text{ років}^{-1}$ . Якої (і в скільки разів) речовини буде більше через 10 років? Початкова кількість атомів обох речовин однакова.

9 У яку речовину перетворюється  $\text{Pb}^{210}_{81}$  після трьох послідовних  $\beta$ -розпадів і одного  $\alpha$ -розпаду?

10 Скільки шарів половинного послаблення необхідно для зменшення рентгенівського випромінювання у 150 разів?

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1 Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Загальний курс фізики. Т. 3. Оптика. Квантова фізика / за ред. І. М. Кучерука. Київ : Техніка, 1999. 520 с.

2 Волков О. Ф., Лумпієва Т. П. Курс фізики: у 2-х т. Т. 2. Коливання і хвилі. Хвильова і квантова оптика. Елементи квантової механіки. Основи фізики твердого тіла. Елементи фізики атомного ядра : навч. посіб. для студ. інж.-техн. спец. вищ. навч. закл. Донецьк : ДонНТУ, 2009. 222 с.

3 Курс фізики : навч. підр. / І. Р. Зачек, Б. М. Романишин, В. М. Габа, Ф. М. Гончар. Львів : Бескид-Біт, 2002. 376 с.

4 Савельєв І. В. Курс общей физики : учеб. пособ. для вузов: в 5 кн. Кн. 5. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. Москва : АСТ: Астрель, 2006. 368 с.

5 Детлаф А. А., Яворский Б. М. Курс физики : учеб. пособ. для вузов. Изд. 4-ое, испр. Москва : Высш. шк., 2002. 718 с.

6 Вовк Р. В., Гресь В. Ю., Руда Л. М. Електромагнетизм. Квантова оптика та ядерна фізика : метод. вказівки до контр. робіт з фізики № 3, 4 для студ. заочн. скороч. форми навчання всіх спец. Харків : УкрДУЗТ, 2018. 39 с.

7 Трофимова Т. И. Курс физики : учеб. пособ. для вузов. Москва : Издат. центр «Академия», 2006. 560 с.

8 Вдовин Н. А., Харламова Н. А. Физика : учеб. пособ. Ч. III. Оптика. Атомная физика / под общ. ред. А. И. Цаплина; Перм. гос. техн. ун-т. Пермь, 2006. 100 с.

## ДОДАТОК А

Таблиця А.1 – Основні фізичні постійні

Фізична постійна	Загальне позначення	Значення величини
Прискорення вільного падіння	g	$9,81 \text{ м/с}^2$
Постійна Больцмана	k	$1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Швидкість світла у вакуумі	c	$3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Постійна Планка	h	$6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$
Атомна одиниця маси	а.о.м.	$1,66057 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Постійна Стефана-Больцмана	$\sigma$	$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$
Постійна закону зміщення Віна	b	$2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}\cdot\text{К}$
Постійна другого закону Віна	$\gamma$	$\gamma = 1,29 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}^5)$
Одиниця енергії – електрон-вольт	1 eВ	$1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$
Комптонівська довжина хвилі	$\lambda_{\kappa}$	2,426 пм

Таблиця А.2 – Множники і префікси для утворення десяткових кратних і часткових одиниць та їх назви

Множник	Префікс	Позначення	Множник	Префікс	Позначення
піко	п	$10^{-12}$	тера	Т	$10^{12}$
нано	н	$10^{-9}$	гіга	Г	$10^9$
мікро	мк	$10^{-6}$	мега	М	$10^6$
мілі	м	$10^{-3}$	кіло	к	$10^3$
санті	с	$10^{-2}$	гекто	г	$10^2$
деци	д	$10^{-1}$	дека	да	$10^1$

Таблиця А.3 – Маса спокою елементарних частинок

Назва елементарної частинки	кг	а.о.м.	МеВ
електрон	$9,11 \cdot 10^{-31}$ кг	0,00055	0,511
протон	$1,6726 \cdot 10^{-27}$ кг	1,00728	938,3
нейтрон	$1,6749 \cdot 10^{-27}$ кг	1,00866	939,6

Таблиця А.4 – Робота виходу  $A$  електронів з металу, еВ

Метал	Робота виходу $A$	Метал	Робота виходу $A$	Метал	Робота виходу $A$
Алюміній	4,25	Золото	4,3	Натрій	2,35
Барій	2,49	Індій	3,8	Нікель	4,5
Берилій	3,92	Калій	2,22	Олово	4,38
Бор	4,5	Кальцій	2,8	Платина	5,32
Ванадій	4,12	Кобальт	4,41	Родій	4,75
Вісмут	4,4	Кремній	4,8	Меркурій	4,52
Вольфрам	4,54	Літій	2,38	Свинець	4,0
Галій	3,96	Магній	3,64	Срібло	4,3
Германій	4,76	Мідь	4,4	Карбон	4,7
Залізо	4,31	Молібден	4,3	Хром	4,58
Цезій	2,7	Цинк	4,24	Уран	3,3

Таблиця А.5 - Періоди напіврозпаду деяких ізотопів

Натрій	${}^{24}_{11}\text{Na}$	15,3 год
Магній	${}^{27}_{12}\text{Na}$	10 хв
Фосфор	${}^{32}_{15}\text{P}$	14,3 доб
Кальцій	${}^{45}_{20}\text{Ca}$	164 доб
Стронцій	${}^{90}_{38}\text{Sr}$	28 років
Йод	${}^{131}_{53}\text{I}$	8 діб
Полоній	${}^{210}_{84}\text{Po}$	138 діб
Радій	${}^{226}_{88}\text{Ra}$	1620 років
Торій	${}^{229}_{90}\text{Th}$ ${}^{234}_{90}\text{Th}$	7000 років 24 доб
Уран	${}^{235}_{92}\text{U}$ ${}^{238}_{92}\text{U}$	$7,1 \cdot 10^8$ років $4,5 \cdot 10^9$ років

Таблиця А.6 – Маса деяких нейтральних атомів

Елемент	Символ хімічного елемента	Маса, а. о. м.	Елемент	Символ хімічного елемента	Маса, а. о. м.
Гідроген	${}^1_1H$	1,00783	Берилій	${}^7_4Be$	7,01693
	${}^2_1H$	2,01410		${}^8_4Be$	8,00531
	${}^3_1H$	3,01605		${}^{10}_4Be$	10,01354
Гелій	${}^3_2He$	3,01602	Літій	${}^6_3Li$	6,01513
	${}^4_2He$	4,00260		${}^7_3Li$	7,011601
Бор	${}^9_5B$	9,01333	Нітроген	${}^{13}_7N$	13,00574
	${}^{10}_5B$	10,01294		${}^{14}_7N$	14,00307
	${}^{11}_5B$	11,00931		${}^{15}_7N$	15,00011
Карбон	${}^{10}_6C$	10,00168	Оксиген	${}^{16}_8O$	15,99491
	${}^{12}_6C$	12,00000		${}^{17}_8O$	16,99913
	${}^{13}_6C$	13,00335		${}^{18}_8O$	17,99916
	${}^{14}_6C$	14,00324	Фосфор	${}^{31}_{15}P$	30,97376
Алюміній	${}^{30}_{13}Al$	29,99817	Кремній	${}^{31}_{14}Si$	30,97376
Калій	${}^{41}_{19}K$	40,96184	Кальцій	${}^{44}_{20}Ca$	43,95549

КВАНТОВА ОПТИКА.  
АТОМНА І ЯДЕРНА ФІЗИКА

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
до практичних занять з дисципліни

«ФІЗИКА»

Частина 3

Відповідальний за випуск Котвицька К. А.

Редактор Третьякова К. А.

---

Підписано до друку 16.03.21 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 3,5. Тираж 5. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Український державний університет  
залізничного транспорту,  
61050, Харків-50, майдан Фейербаха, 7.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.